

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований Российской академии наук

На правах рукописи

НАЗИРОВА КСЕНИЯ РАВИЛЬЕВНА

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЛЮМОВ
РЕЧНЫХ И ЛАГУННЫХ ВОД ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ
И СИНХРОННЫМ НАТУРНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ**

Специальность 1.6.17 — Океанология

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:

доцент,

кандидат физико-математических наук

Лаврова Ольга Юрьевна

Москва-2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 КРАТКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИЗУЧЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РЕЧНЫХ И ЛАГУННЫХ ВОД	16
1.1 Предмет исследования	16
1.2 Восстановление количественных данных о концентрации взвешенного вещества в приустьевых районах Мирового океана	19
1.3 Обзор современного состояния изученности прибрежной части Балтийского моря, находящейся под влиянием выноса из Балтийского пролива	22
1.4 Обзор современного состояния изученности прибрежной части Чёрного моря в районе выноса реки Мзымты	22
1.5 Обзор современного состояния изученности прибрежной части Среднего Каспия в районе выносов рек Терек и Сулак	23
1.6 Выводы к главе 1	23
ГЛАВА 2 ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ	25
2.1 Информация об экспедиционных исследованиях	25
2.2 Судовые натурные измерения	28
2.3 Метеорологические данные	33
2.4 Лабораторные исследования	34
2.5 Данные дистанционного зондирования	37
2.6 Методика восстановления поля мутности на основе натурных и дистанционных методов исследования	42
2.7 Выводы к главе 2	44
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОД КАЛИНИНГРАДСКОГО ЗАЛИВА ЧЕРЕЗ БАЛТИЙСКИЙ ПРОЛИВ В АКВАТОРИИ ГДАНЬСКОГО ЗАЛИВА	46
3.1 Основные физико-географические особенности района исследования в юго-восточной части Балтийского моря	46
3.1.1 Балтийское море	46
3.1.2 Южная часть Балтийского моря. Гданьский залив	48
3.2 Результаты спутникового мониторинга выноса из Калининградского залива	51
3.3. Результаты натурных измерений	61
3.4 Выводы к главе 3	78
ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЮМА РЕКИ МЗЫМТЫ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	81
4.1 Основные физико-географические особенности района исследования в северо-восточной части Чёрного моря	81
4.1.1 Чёрное море	81
4.1.2 Шельфовая зона северо-восточной части Чёрного моря. Река Мзымта	84

4.2 Влияние материкового стока на гидрологическую структуру прибрежных вод	86
4.2.1 Пространственное распределение основных гидрологических параметров (температура, солёность, мутность морской воды) в плюме по данным измерений <i>in situ</i> в 2018 г.	90
4.2.2 Изменчивость основных гидрологических параметров (температуры, солёности и мутности морской воды) в поверхностном слое в приустьевой зоне (на примере судовых измерений 2019 г.)..	93
4.2.3 Пространственное распределение температуры, солёности и мутности морской воды непосредственно внутри речного плюма реки Мзымты.....	95
4.2.4 Оценка положения нижней границы выноса речных вод на основе вертикального профилирования толщи морской воды в районе устья реки Мзымты	97
4.3 Влияние ветрового режима и прибрежных течений на распространение речного плюма.....	100
4.4 Определение полей мутности и концентрации взвешенного вещества в приустьевой зоне по спутниковым данным и измерениям <i>in situ</i>	102
4.4.1. Корреляционный анализ двух типов натуральных данных мутности морской воды	102
4.4.2 Корреляционный анализ мутности морской воды и концентрации взвешенного вещества, измеренных <i>in situ</i>	105
4.4.3 Корреляционный анализ данных о концентрации взвешенного вещества, полученных весовым методом и рассчитанных по спутниковым данным при помощи стандартного алгоритма C2RCC ...	107
4.4.4 Корреляционный анализ концентрации взвешенного вещества и мутности морской воды по данным контактных натуральных измерений и данным дистанционного зондирования с использованием различных спутниковых алгоритмов	111
4.4.5 Масса и минеральный состав взвешенного вещества в приустьевой области, находящейся под влиянием стока реки Мзымты.....	116
4.4.6 Изменение мутности воды в зависимости от минерального состава взвешенного вещества в плюме.....	117
4.5 Выводы к главе 4	119
ГЛАВА 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЮМОВ РЕК ТЕРЕК И СУЛАК НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	122
5.1 Основные физико-географические особенности района исследования в северо-западной части Каспийского моря.....	122
5.1.1 Каспийское море.....	122
5.1.2 Шельфовая зона северо-западной части Среднего Каспия. Реки Терек и Сулак.....	127
5.2 Результаты спутникового мониторинга плюмов рек Терек и Сулак.....	129
5.3 Результаты натуральных измерений	132
5.3.1 Результаты исследования трёхмерной структуры плюма реки Терек.....	132
5.3.2. Результаты исследования трёхмерной структуры плюма реки Сулак	141
5.4 Определение полей мутности и концентрации взвешенного вещества в приустьевых зонах рек Терек и Сулак по спутниковым данным и измерениям <i>in situ</i>	146
5.4.1 Выявление зависимости между мутностью воды и концентрацией взвеси, определённых по данным натуральных измерений	146
5.4.2 Сравнение измерений мутности воды по данным спутникового зондирования и подспутниковых измерений	147

5.4.3 Минеральный состав взвеси в пробах воды рек Терек и Сулак.....	149
5.4.4 Изменение параметров плюма реки Сулак после схода селевых потоков в горах Дагестана в 2023 г.....	153
5.5 Основные выводы по главе 5	157
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	159
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	162
ПРИЛОЖЕНИЕ А	176
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	180
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	187
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	192
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	194
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	196
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	201
ПРИЛОЖЕНИЕ И	206
ПРИЛОЖЕНИЕ К.....	208
ПРИЛОЖЕНИЕ Л.....	210
ПРИЛОЖЕНИЕ М.....	212

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Речной сток играет важную роль в физических, химических и биологических процессах в шельфовых зонах, являясь основным источником поступления в море взвешенных и растворённых терригенных и биогенных веществ, а также антропогенного загрязнения. Эти вещества оказывают значительное и во многих случаях негативное воздействие на прибрежную экосистему, включая продуктивность фитопланктона, перенос загрязняющих веществ в прибрежную зону, эрозию берегов, образование искусственных пляжей, динамику питательных веществ и т.д. Влияние огромного количества географических факторов, гидрометеорологических условий и гидрофизических процессов, при большой сложности и стоимости полевых измерений создают определенную фрагментарность информации о процессах распространения речных вод в море. Эта проблема может быть решена только с помощью спутниковых методов дистанционного зондирования, которые дают уникальную возможность наблюдать практически одновременно весь интересующий регион многократно, изо дня в день, в течение многих лет.

Попадая из реки в море, материковые воды образуют прилежащие к устью мезомасштабные структуры, выделяющиеся пониженной солёностью и отличной от окружающей воды температурой, а так же, как правило, повышенной мутностью, высоким содержанием взвеси и растворённой органики [Завьялов и др., 2014]. Под плюмом лагунных вод понимается вынос из лагун вод, отличающихся по своим параметрам от вод прилегающих морей, через проливы или каналы в море. Особый интерес представляет собой возможность получения различных параметров плюмов, таких как их пространственные характеристики, направление распространения в зависимости от гидродинамических процессов в прибрежной зоне и гидрометеорологической ситуации, определение их пространственно-временной изменчивости, значений мутности и концентрации взвешенного вещества на основе спутниковых данных. Для района речного плюма основная трудность заключается в получении количественных оценок концентрации взвешенного вещества и мутности воды, опираясь только на спутниковые данные. Необходимо проводить верификацию результатов, полученных по спутниковым данным, данными *in-situ*, получаемых во время синхронных подспутниковых измерений.

Основное внимание в настоящей работе уделяется трем районам: приустьевая зона р. Мзымта (Черное море), вынос лагунных вод из Калининградского залива (Балтийское море) и приустьевые зоны рек Терек и Сулак (Каспийское море). Исследуемые районы различаются не только своими физико-географическими характеристиками, но и трассерами, за счёт которых плюмы проявляются на спутниковых изображениях. В то же время это одни из

основных в Российской Федерации рекреационных зон, что определяет актуальность исследования их экологического состояния.

Несмотря на то, что спутниковые методы исследования районов речных плумов широко используются во всем мире, степень изученности пространственно-временной изменчивости плумов в перечисленных районах крайне мала, особенно с точки зрения получения количественной оценки мутности и содержания взвешенного вещества в приповерхностном слое. Наиболее изученными являются районы выносов рек в северо-восточной части Черного моря, где в течение ряда лет проводились *in-situ* измерения сотрудниками Института океанологии РАН им. П.П. Ширшова (ИО РАН) под руководством проф. Завьялова П.О. [Завьялов и др., 2014; Зацепин и др., 2010; Короткина и др., 2011]. В этих исследованиях малых рек российского побережья Чёрного моря, на основе многолетних судовых измерений получены количественные характеристики отклика гидрофизических полей в шельфовой зоне на воздействие материкового стока, описаны основные закономерности динамики плума при тех или иных воздействиях. Но как отмечают сами авторы, данные исследования имеют очень локальный и периодический характер, а для таких процессов необходим непрерывный мониторинг. Для этих целей необходимо использовать данные дистанционного зондирования. В данных работах совместное использование результатов измерений *in situ* и данных дистанционного зондирования (ДДЗ) являлось номинальным, каждый источник информации использовался отдельно, притом чаще отдавалось предпочтение прямым (натурным) измерениям, а ДДЗ применялось как вспомогательный метод для получения только качественных характеристик.

Для районов выноса лагунных вод из Калининградского залива регулярного спутникового мониторинга не проводилось. Оценки биооптических характеристик вод юго-восточной Балтики с использованием разработанных в ИО РАН регионального алгоритма хоть и дают более качественные результаты, чем при использовании стандартных алгоритмов для одних и тех же спутниковых данных среднего разрешения, недостаточны для восстановления мелкомасштабных особенностей в зоне плума [Буканова и др., 2011; Гоголев и др., 2020а; Копелевич и др., 2008, 2016].

Что касается плумов рек Терек и Сулак ни спутниковый мониторинг этих районов, ни измерения *in-situ* там ранее не проводились.

Всем выше сказанным определяется актуальность темы исследования и поставленных в работе научных задач, заключающихся в необходимости совершенствования методов проведения судовых и дистанционных океанологических наблюдений, их обработки и анализа с целью получения пространственно-временных и количественных характеристик плумов на основе совместного анализа данных ДЗЗ и синхронных подспутниковых измерений.

Цель диссертационной работы — исследование пространственно-временной изменчивости речного плюма рек Мзымта, Терек, Сулак и выноса вод из Калининградского залива в Гданьский залив по спутниковым оптическим данным высокого пространственного разрешения и синхронным измерениям *in situ*.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Восстановление и оценка трёхмерной структуры плюмов речных и лагунных вод на основе серии подспутниковых *in situ* измерений.
2. Выявить закономерности влияния метеорологических процессов на распространение лагунных и речных вод в Гданьском заливе, в северо-восточной части Чёрного моря и в северо-западной части Каспийского моря.
3. Выявить основные особенности межгодовой и сезонной изменчивости поверхностных проявлений плюмов лагунных и речных вод на основе спутниковых данных высокого пространственного разрешения за период с 2014 по 2023 г.
4. Осуществить верификацию и сравнительный анализ полученных количественных данных о концентрации взвешенного вещества и мутности морской воды в прибрежных районах исследуемых полигонов на основе судовых и оптических спутниковых измерений.
5. Установить границы применимости стандартных спутниковых алгоритмов последнего поколения в зависимости от значений мутности в исследуемых районах.

В данной диссертационной работе рассмотрены три вида плюмов, соответствующие разным научно-исследовательским полигонам: первый — это прибрежная область юго-восточной части Балтийского моря в районе смешения вод Калининградского и Гданьского заливов; второй — приустьевая область в районе реки Мзымты в северо-восточной части Чёрного моря; третий — выносы рек Терек и Сулак в северо-западной части Каспийского моря.

Методология и методы научного исследования. Диссертационное исследование основано на использовании методического подхода, заключающегося в комплексном анализе контактных и дистанционных данных: квазисинхронных подспутниковых натурных судовых измерений, метеорологических данных и спутниковых оптических данных высокого пространственного разрешения (10–30 м).

Научная новизна диссертационного исследования. В результате выполненных исследований **впервые** установлено:

1. На основе комплексного анализа данных натурных измерений и спутниковых наблюдений получены характеристики вертикального и горизонтального распределения основных параметров плюма лагунных вод в зоне выноса из Калининградского залива в Гданьский залив и плюмов рек Сулак и Терек в летний период: температуры, солёности, концентрации взвешенного вещества и хлорофилла *a*.

2. В результате многолетнего спутникового мониторинга получена информация о межгодовой и сезонной изменчивости поверхностных проявлений плюма лагунных вод Калининградского залива. В результате многолетнего спутникового мониторинга в период с января 2014 года по декабрь 2020 года были выявлены основные межгодовые и сезонные морфометрические характеристики плюма, его поверхностные проявления. Установлено, что размеры, площадь, форма и направление распространения плюма может существенно изменяться как от сезона к сезону, так и от года к году.
3. Установлены закономерности влияния ветрового поля на форму плюма лагунных вод и направление распространения его в прибрежной зоне. Существенное влияние на пространственное распространение плюма помимо прибрежных поверхностных течений оказывает ветровое воздействие. В более чем 80% случаев вынос сконцентрирован в прибрежной зоне Балтийского пролива, не превышающей в размерах 10 км от береговой зоны и не более 8 км на юго-запад и северо-восток от створа пролива.
4. На основе комплексного анализа спутниковых данных и синхронных контактных измерений выявлено, что для проявления чёткой границы плюма реки Мзымты на спутниковых изображениях достаточно тонкого (менее 1 м) подповерхностного слоя с небольшими величинами мутности (по нашим данным ≤ 5 НТУ). Температурные и плотностные градиенты не играют существенной роли.
5. Проведены оценки мутности и концентрации взвешенного вещества в плюмах рек Терек и Сулак на основе измерений *in-situ*. Выявлена длительность влияния и изменение параметров плюма реки Сулак после схода селевых потоков в горах Дагестана в 2023 г.
6. Для плюмов рек Мзымта, Терек и Сулак приведены результаты использования четырёх различных алгоритмов восстановления количественных характеристик мутности и концентрации взвешенного вещества на основе спутниковых оптических данных высокого пространственного разрешения. На основе сравнения с данными синхронных подспутниковых измерений *in situ* проведена их валидация. Установлены границы их применимости в зависимости от значений мутности.

Положения, выносимые на защиту:

1. Оценка трёхмерной структуры и основных характеристик (температура, солёность, концентрация взвешенного вещества и хлорофилла *a*) плюмов рек Сулак, Терек, Мзымта и плюма лагунных вод Калининградского залива на основе спутниковых данных и измерений *in situ*.
2. Закономерности влияния метеорологических процессов на распространение лагунных вод Калининградского залива и речных вод в северо-западной части Каспийского моря.
3. Особенности межгодовой и сезонной изменчивости поверхностных проявлений плюмов лагунных и речных вод на основе данных многолетнего спутникового мониторинга.

4. Результаты сравнительного анализа и валидация на основе измерений *in situ* различных стандартных спутниковых алгоритмов последнего поколения, используемых для расчёта значений мутности и концентрации взвешенного вещества в плюмах рек Мзымта, Терек и Сулак.

Достоверность полученных результатов обеспечивается: использованием современного высокоточного океанологического оборудования для получения натурных данных; использованием спутниковых данных высокого пространственного разрешения, обрабатываемых с применением современных сертифицированных алгоритмов; хорошей сопоставимостью результатов натурных измерений и спутниковых наблюдений; соответствием полученных результатов, имеющимся литературным данным.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности 1.6.17 «Океанология» обеспечивается следующими направлениями исследования: физические и химические свойства морской воды; динамические процессы (волны, вихри, течения, пограничные слои) в океане; методы проведения судовых, береговых и дистанционных океанологических наблюдений, их обработки и анализа.

Научная и практическая значимость работы способствует расширению возможностей изучения параметров речного стока и вод внутренних водоёмов в шельфовой зоне и процессов их распространения на основе комплексного использования данных новейших оптических сенсоров спутникового базирования, предоставляющих информацию с высоким пространственным разрешением (от 10 до 30 м) и синхронных подспутниковых натурных измерений. Научная и практическая значимость результатов определяется их вкладом в экологическую оценку состояния прибрежной зоны для прогнозирования, предотвращения и ликвидации её загрязнения, поскольку именно с материковым стоком связаны такие актуальные процессы, как пространственное распределение и динамика взвешенного вещества, размыв берегов, искусственное пляжеобразование, антропогенное загрязнение моря и т.д.

Личный вклад автора заключается в том, что она принимала активное участие в планировании и выполнении полевых работ в девяти морских прибрежных экспедициях Института космических исследований РАН (ИКИ РАН), в том числе руководила работами в экспедициях в 2018–2023 гг. в Чёрном, Балтийском и Каспийском морях; лично обрабатывала и анализировала собранные в этих экспедициях натурные данные, а также лично подбирала, обрабатывала и анализировала архивные и оперативные спутниковые данные, использованные в настоящей диссертации.

Лично автором сформулированы и поставлены задачи диссертационной работы, ею лично осуществлялся выбор методов исследований, подготовлены материалы публикаций и доклады по теме работы.

Все опубликованные работы автора, основаны на натурных данных, собранных лично автором диссертационной работы. Личный вклад автора в статьях 1, 2, 6-8 состоит в выполнении всех этапов работы над научной статьей: сбор, обработка, интерпретация, анализ данных и полное написание текста. Личный вклад автора в статьях 3-5 и 9-11 заключался в подготовке, обработке и анализе натурных данных, и частичное написания текста статьи (введения, описания данных, методов и района исследования и раздела посвященного результатам натурных измерений).

Связь с научными программами, планами, темами. Работа выполнялась в соответствии с научными планами и программами исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук и в рамках следующих проектов:

- проект РНФ «Современные алгоритмы расчёта концентрации взвешенного вещества и мутности в приустьевых зонах морей по оптическим спутниковым данным высокого пространственного разрешения: анализ и верификация», № 23-27-00124 (2023–2024), руководитель проекта;
- проект РНФ «Оценка изменчивости экологического состояния Каспийского моря в текущем столетии по данным спутникового дистанционного зондирования», № 23-27-00124 (2019–2022), исполнитель;
- проект РНФ «Исследование влияния динамических и циркуляционных процессов на распространение антропогенных и биогенных загрязнений морской поверхности на основе комплексного использования спутниковой информации», РНФ № 14-17-00555 (2017–2018), исполнитель;
- проект РФФИ «Гидродинамические процессы, связанные с распространением речных и лагунных вод в море, и методы их дистанционной диагностики», № 17-05-00715-а (2017–2019), исполнитель;
- тема «Мониторинг» в рамках исполнения работ по параграфу 4.3 «Развитие методов количественной оценки параметров гидродинамических процессов в верхнем слое океана и в приземном слое атмосферы на основе многолетних данных дистанционного зондирования из космоса», Государственное задание Института космических исследований РАН, госрегистрация № 122042500031-8 (2021-2023 гг.), исполнитель.

Апробация работы. Основные результаты, составившие содержание данной работы, докладывались на заседаниях: научно-технического совета 55 отдела Института космических исследований РАН (2017–2019, 2022, 2023, 2025); учёного совета Физического направления Института океанологии РАН (2022); учёного совета Морского гидрофизического института РАН (2023); на семинаре «Оперативная океанография» МГИ РАН (2023 г.).

Основные результаты диссертации докладывались на российских и международных конференциях, включая: ежегодная Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, ИКИ РАН, 2017–2024 гг.); Международная конференция по дистанционному зондированию Общества оптики и фотоники (SPIE) в Страсбурге, Франция (2019 г.) и в формате on-line в 2018 и в 2021 гг.; Международный симпозиум по геонаукам и дистанционному зондированию (IGARSS) в Валенсии, Испания (2019 г.); XI международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли» (Таруса, 2020 г.); VI Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» в Майкопе, Россия (2021 г.); Первая Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Россия в Десятилетии ООН наук об океане» в Москве, Россия (2022 г.); VII Всероссийская научная конференция молодых учёных (КИМО) в Санкт-Петербурге, Россия (2023 г.).

За результаты, вошедшие в диссертацию, соискатель был награждён премиями ИКИ РАН в номинации «Лучшая работа, выполненная молодыми учёными» в 2019, 2020, 2024 гг., а также был отмечен наградой «Лучший постерный доклад» на конференции КИМО в 2023 г.

Публикации соискателя по теме диссертации. Материалы диссертации полностью изложены в работах, опубликованных соискателем. По теме диссертации опубликовано 27 научных работ, в том числе 11 статей в рецензируемых научных изданиях из списка, рекомендованного ВАК, 5 статей в международных рецензируемых сборниках научных трудов из списка, рекомендованного ВАК, 10 тезисов в сборниках докладов на Всероссийских и Международных конференциях (РИНЦ). В их числе 15 работ в рецензируемых научных изданиях, входящих в наукометрические базы Web of Science и SCOPUS, и 1 в журнале из списка Q1.

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:

1. **Назирова К.Р.,** Жаданова П.Д., Князев Н.А. Результаты многолетних исследований полей мутности и концентрации взвешенного вещества в приустьевой зоне р. Мзымты на основе натурных измерений и спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 321–332. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-321-332.
2. **Назирова К.Р.,** Лаврова О.Ю., Алферьева Я.О., Князев Н.А. Пространственно-временная изменчивость плумов рек Терек и Сулак по спутниковым данным и синхронным натурным измерениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 256–274. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-256-274.
3. Жаданова П.Д., **Назирова К.Р.** Анализ и верификация алгоритмов определения мутности и концентрации взвешенного вещества, имплементированных в программный комплекс

- ACOLITE // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 50–68. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-50-68.
4. Лаврова О.Ю., **Назирова К.Р.**, Алферьева Я.О., Соловьев Д.М., Жук Е.В. Изменение параметров плюма реки Сулак после схода селевых потоков в горах Дагестана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 323–329. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-323-329.
 5. Лаврова О.Ю., **Назирова К.Р.**, Алферьева Я.О., Жаданова П.Д., Строчков А.Я. Сопоставление параметров рек Сулак и Терек на основе спутниковых данных и измерений in situ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 264–283. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-264-283.
 6. **Назирова К.Р.**, Краюшкин Е.В. Мониторинг распространения вод Калининградского залива в акватории Гданьского залива (Юго-Восточная Балтика) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 271–284. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-271-284.
 7. **Nazirova K.**, Alferyeva Y., Lavrova O., Shur Y., Soloviev D. Bocharova T., Strochkov A., Comparison of In situ and Remote-Sensing Methods to Determine Turbidity and Concentration of Suspended Matter in the Estuary Zone of the Mzymta River, Black Sea // Remote Sensing. 2021. V. 13(1). Art. No. 143. <https://doi.org/10.3390/rs13010143>.
 8. **Назирова К.Р.**, Лаврова О.Ю., Краюшкин Е.В., Соловьев Д.М., Жук Е.В., Алферьева Я.О. Особенности выявления параметров речного плюма контактными и дистанционными методами // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 227–243. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-227-243.
 9. Lavrova O.Yu., **Nazirova K.R.**, Krayushkin E.V., Strochkov A.Ya. Concurrent field experiments and satellite surveys for assessing environmental risk in the coastal zone of Southeast Baltic // Ecologica Montenegrina. 2019. V. 25. P. 44–54. <https://doi.org/10.37828/em.2019.25.5>.
 10. Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М., Строчков А.Я., **Назирова К.Р.**, Краюшкин Е.В., Жук Е.В. Использование мини-дрифтеров для проведения подспутниковых измерений параметров прибрежных течений // Исследование Земли из космоса. 2019. № 5. С. 36–49. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019536-49>.
 11. Краюшкин Е.В., Лаврова О.Ю., **Назирова К.Р.**, Алферьева Я.О., Соловьев Д.М. Формирование и распространение вихревого диполя за мысом Таран в Юго-Восточной Балтике // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 214–221. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-214-221.

Статьи в рецензируемых сборниках научных трудов:

1. Lavrova O.Yu., **Nazirova K.R.**, Soloviev D.M., Alferyeva Y.O., Storchkov A.Y., Bocharova T.Y. Remote sensing of suspended particulate matter: case studies of the Sulak (Caspian Sea) and the Mzymta (Black Sea) mouth areas // Proc. SPIE. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2021. V. 11857. Article 1185705. DOI: 10.1117/12.2599809.
2. **Nazirova K.**, Lavrova O., Krayushkin E. Features of monitoring near the mouth zones by contact and contactless methods // Proc. SPIE. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2019. V. 11150. Article 111500H. DOI: 10.1117/12.253316.
3. Krayushkin E., Lavrova O., **Nazirova K.** Distinctive features of the Vistula lagoon outflow by remote sensing and oceanographic experiments data // Proc. SPIE. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2019. V. 11150. Article 111500W. DOI: 10.1117/12.2533024.
4. Lavrova O., **Nazirova K.**, Soloviev D. Internal Waves on River Plumes // Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS): Proc. 2018. P. 7937–7940. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517318.
5. Lavrova O.Y., Krayushkin E.V., **Nazirova K.R.**, Storchkov A.Y. Vortex structures in the Southeastern Baltic Sea: Satellite observations and concurrent measurements // Proc. SPIE Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2018. Article 1078404. DOI: 10.1117/12.2325463.
6. Лаврова О.Ю., Краюшкин Е.В., **Назирова К.Р.**, Строчков А.Я. Возможность получения динамических и пространственных характеристик процессов и явлений в прибрежной зоне на основе комплексного использования квазисинхронных спутниковых данных // Вестн. Тверского гос. ун-та. Сер.: География и геоэкология. 2018. № 3. С. 108–124. <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2018-3-108-124>.

Тезисы докладов на Всероссийских и Международных конференциях:

1. **Назирова К.Р.** Восстановление концентрации взвешенного вещества и мутности морской воды в приустьевых зонах морей на основе синхронных спутниковых и натурных измерений // Комплекс. исслед. Мирового океана: Материалы 7-й Всероссийской науч. конф. молодых учёных. Санкт-Петербург, 15–19 мая 2023. Санкт-Петербург: Своё изд-во, 2023. С. 495-496. ISBN 978-5-4386-2269-7.
2. **Назирова К.Р.** Результаты исследования плюмов р. Сулак и р. Терек на основе данных контактных и дистанционных измерений // 1-я Всероссийская научно-практ. конф. с международ. участием «Россия в Десятилетии ООН наук об океане»: тез. докл. М.: МИРЭА — Российский технологический университет. 2022. С. 264–266.

3. Лаврова О.Ю., **Назирова К.Р.**, Назирова К.Р. Верификация различных алгоритмов определения концентрации взвешенного вещества и мутности по данным MSI Sentinel-2 и OLI Landsat-8 во время подспутниковых измерений в приустьевых зонах рек Сулак и Мзымта // Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2021. С. 245. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
4. **Назирова К.Р.** Результаты исследования распространения вод Калининградского залива в акватории Гданьского залива с 2014 по 2021 г. // Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2021. С. 260. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
5. **Назирова К.Р.**, Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М. Распространение речных и лагунных вод в Каспийском, Чёрном и Балтийском морях // Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информац. технологий: материалы 6-й Международ. научно-практ. конф. 2021. Майкоп: МГТУ. С. 57–62. ISBN: 978-5-907004-77-1.
6. **Назирова К.Р.**, Краюшкин Е.В., Лаврова О.Ю., Князев Н.А. Результаты исследования распространения вод Калининградского залива через Балтийский канал на основе подспутниковых измерений в августе 2020 г. // Материалы 18-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2020. С. 233. DOI: 10.21046/19DZZconf-2020a.
7. **Назирова К.Р.**, Лаврова О.Ю., Алферьева Я.О. и др. Особенности восстановления гидрофизических полей в приустьевой зоне рек контактными и дистанционными методами // Материалы 17-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2019. С. 319. DOI: 10.21046/19DZZconf-2019a.
8. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Краюшкин Е.В., **Назирова К.Р.**, Строчков А.Я. Исследование субмезомасштабных процессов в прибрежной зоне: спутниковые наблюдения и синхронные натурные измерения // Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в гидросфере и атмосфере МСП-2018: сб. тр. Международ. симп. / Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова РАН; Московский ун-т им. С.Ю. Витте. 2018. С. 220–222.
9. **Назирова К.Р.**, Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М. и др. Определение характеристик плюма реки Мзымты на основе спутниковых данных и измерений in situ в апреле 2018 г. // Материалы 16-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2018. XVI.E.778. DOI: 10.21046/19DZZconf-2018a.

10. Краюшкин Е.В., Лаврова О.Ю., **Назирова К.Р.**, Соловьев Д.М. Результаты подспутниковых океанографических экспериментов в Юго-Восточной части Балтийского моря в период 2014–2017 г. // Материалы 15-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2017. XV.E.432. DOI: 10.21046/19DZZconf-2017a.

Благодарности. Автор выражает признательность своему научному руководителю кандидату физико-математических наук О.Ю. Лавровой за неоценимый вклад и наставничество на всех этапах научной работы. Автор также благодарит соавторов публикаций за плодотворное сотрудничество и помощь в сборе необходимых экспедиционных данных. Особая благодарность выражается семье и друзьям за терпение и поддержку при подготовке автором диссертации.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения и Приложений. Объём работы составляет 213 страниц. Текст диссертации иллюстрирован 86 рисунками и 15 таблицами. Библиографический список включает в себя 161 наименование, в том числе 70 на иностранных языках. В приложениях содержится 13 таблиц и 27 иллюстраций.

ГЛАВА 1 КРАТКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИЗУЧЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РЕЧНЫХ И ЛАГУННЫХ ВОД

1.1 Предмет исследования

Приустьевые области и прибрежные районы, характеризующиеся наличием проливов и каналов, соединяющих морские водные массы и воды заливов, представляются одними из наиболее сложных и интересных областей Мирового океана. Речные воды и воды внутренних водоёмов перемешиваются с солёной морской водой, в результате чего в прибрежной зоне формируется динамическая структура — плюм (англ. plume) [Завьялов и др., 2014]. Как правило, смешивающиеся водные массы, будь то морская вода, речная вода или воды заливов, существенно отличаются друг от друга по многим физическим и химическим характеристикам, включая солёность, температуру, плотность, концентрацию взвешенных и растворенных веществ и т.д. В результате этого, сформированный плюм, за счёт градиента плотности, во-первых, распространяется в тонком поверхностном слое моря в силу мощной вертикальной стратификации, и во-вторых, имеет собственную внутреннюю динамику отличную от окружающих его вод моря [Осадчиев, 2021]. Поскольку вместе с речным стоком и водами внутренних водоёмов в прибрежные морские воды могут поступать продукты антропогенного загрязнения, мониторинг и понимание динамики распространения плюмов в прибрежных зонах морей является важной практической задачей океанологии.

Пространственные размеры плюмов варьируются от нескольких десятков до сотен километров. Совокупность большого количества факторов оказывает влияние на эволюцию плюмов, такие как: прибрежные течения, донная батиметрия, сила Кориолиса, интенсивность и объём речного стока, ветровое воздействие, приливные колебания и другие процессы.

Одной из важных задач, при изучении речных плюмов, является проблема определения их пространственных границ. Как правило, эта граница задаётся некоторым фиксированным значением солёности, если соответствующая ему изохалина расположена в области резкого градиента. Но в силу наличия внешнего воздействия на плюм (волнового, ветрового, прибрежных течений), это, как правило, приводит к размыванию границ и формированию сложной пространственно неоднородной внутренней структуры плюма.

С середины 1960-х гг. начали активно проводиться специализированные исследования распреснённых водных масс, нацеленные в первую очередь на изучение речных выносов крупных рек [Симонов, 1969; Hobson, 1966; Park, 1966]. В этих работах было заложено базовое понимание структуры речных плюмов, показана стабильность скачка солёности, описаны особенности больших горизонтальных и малых вертикальных пространственных масштабов, присущих речным плюмам.

В последующие десятилетия в связи с совершенствованием океанологических измерительных приборов, увеличением производительности вычислительных машин, а также с развитием методов и средств дистанционного зондирования, усложнялись и углублялись методы исследования, которые всё чаще были направлены на более детальные и мелкомасштабные процессы взаимодействия речных и морских прибрежных вод [Иванов, Ильин, 1995; Михайлов и др., 1988; Valopoulos et al., 1986; Bricaud et al., 1981; Estourne et al., 1997].

В российском научном сообществе на протяжении долгого времени не было единого термина для характеристики речных плюмов как отдельных водных масс. Для обозначения речных плюмов использовалось большое количество различных терминов, таких как «выносы», «шлейфы», «факелы», «зоны опреснения», «линзы распреснённых вод» и т.д. Впервые, под руководством П.О. Завьялова, сотрудниками Института океанологии РАН им. П.П. Ширшова во второй половине 2000-х гг. были проведены специализированные исследования, посвящённые особенностям структуры речных плюмов, в результате чего, в 2010–2011 гг. появились первые русскоязычные научные статьи, в которых использовался термин «речной плум» [Зацепин и др., 2010; Короткина и др., 2011].

Стоит отметить большое количество научных статей, посвящённых исследованию динамических процессов, тесно связанных с нестационарными движениями речным плюмов и их взаимодействием с примыкающими морскими водами. К таким работам можно отнести работы [Короткина, 2014; Серебряный, 1990; Kozlov et al., 2014; Lavrova et al., 2017, 2018; Mendes et al., 2021; Nash, Moum, 2005], описывающие случаи генерации внутренних волн за счёт фронтальной неустойчивости на границах речных плюмов, зарегистрированные на основе спутниковых данных высокого пространственного разрешения. Отдельное направление исследований направлено на изучение роли прибрежных течений в процессах переноса и перемешивании стока малых рек [Айбулатов и др., 2008; Журбас и др., 2011; Clark, Mannino, 2022; Fournier et al., 2017; Horner-Devine et al., 2015; Seena et al., 2019; Zhi et al., 2022].

В последнее время появились публикации, посвящённые исследованию природы генерации концентрических колец в приповерхностном слое внутри области распреснённых вод, распространяющихся от устья, и которые периодически регистрируются на спутниковых данных высокого пространственного разрешения [Marmorino, Evans, 2021; Osadchiev et al., 2021; Zavialov, 2021]. Учёные предлагают разные теории, описывающие природу возникновения этого явления (короткопериодные внутренние волны, сдвиговая неустойчивость). На данный момент не существует общепринятого мнения по этому поводу.

Также стоит упомянуть о внедрении достаточно нового метода дистанционного исследования — беспилотные летательные аппараты (БПЛА) или дроны (англ. drone). Использование БПЛА существенно расширяет возможности изучения динамических

мелкомасштабных процессов, к каким относятся плюмы небольших рек. Оперативная аэро-, фото- и видеосъёмка поверхности океана с высоким пространственным разрешением с относительно небольшой высоты при помощи дронов выгодно дополняет спутниковое дистанционное зондирование, а в условиях кучево-дождевой облачности (лимитирующего фактора для спутникового зондирования в оптическом диапазоне) в перспективе способна его заменить. На данный момент существует ряд первых работ, нацеленных на разработку алгоритмов восстановления количественных данных мутности и поля поверхностных течений в приустьевых зонах на основе серии оптических данных, полученных с БПЛА [Hayes et al., 2022; Osadchiev, 2020].

Когда идёт речь об изучении влияния речного стока на прибрежную зону — одно из крупных направлений исследований это изучение локальных процессов седиментации, расчёт и мониторинг скорости осаждения взвеси, мониторинг динамики береговой зоны. Основой этого направления послужила статья Лисицына А.П. «Маргинальный фильтр» [Лисицын, 1994], в которой показано, что в зонах смешения речных и морских вод в устьях рек происходят значительные по масштабам процессы флокуляции и коагуляции растворенных (коллоидных) и взвешенных веществ, образование свежих оксигидратов железа, алюминия. Все эти процессы приводят к тому, что в среднем для рек мира в этой зоне откладывается 93–95 % от взвешенных и 20–40 % от растворенных веществ речного стока (включая загрязнения). Главное значение имеет глинистый сорбент (осаждение 15,2 млрд т в год), на втором месте ОВ-сорбент (352 млн т взвешенных и 20–25 млн т в виде флокул органического вещества), на третьем Ре-сорбент (1628 млн т свежееобразованных и 170 млн т раскристаллизованных оксигидратов).

В статье [Zavialov et al., 2015] представлен достаточно простой метод расчёта осаждения и перемешивания частиц, осреднённый за недельный период, позволяющий оценить пространственную картину формирования донных отложений в каждом частном случае. Для геохимиков и седиментологов взвесь представляет интерес как материал для образования донных осадков и как одна из форм существования химических элементов в морской воде. Исследование микрочастиц и их агрегатов необходимо для понимания и количественного моделирования биогеохимических процессов в океане [Boyd et al., 2017]. Также можно упомянуть работы следующих авторов [Кочергин, Кочергин, 2020; Лохов и др., 2020; Agrawal, Pottsmith, 2000; Bourrin et al., 2008; Xiaoqin Du et al., 2022], посвящённые данной тематике.

Наиболее распространённым направлением исследований является изучение морфометрических особенностей речного плюма, характеристик отклика гидрофизических полей в шельфовой зоне при воздействии материкового стока, изучение закономерностей

динамики пюма при ветровом воздействии и разном объёме речного стока [Завьялов и др., 2014; Осадчиев, 2021; Andre et al., 2009; Many et al., 2016].

Методы исследования речных пюмов можно разделить на три группы: 1) натурные прямые измерения; 2) дистанционное зондирование; 3) математическое моделирование. Каждый из методов имеет ряд преимуществ и недостатков. На современном этапе развития науки, популярно использование комплексного метода исследования — т.е. комбинирование нескольких методов исследования для получения наиболее общих и точных научных результатов.

В последнее время дистанционные спутниковые методы постепенно выходят на лидирующие позиции. Это связано в первую очередь с совершенствованием приборов дистанционного зондирования, как оптического, так и микроволнового диапазонов электромагнитного спектра. В силу своих преимуществ над другими методами (доступность, рентабельность, объективность, повторяемость, пространственный охват), спутниковый мониторинг всё чаще используется как вспомогательный инструмент исследований или даже как основной, вытесняя дорогостоящие экспедиционные измерения.

Примерами работ, основанных только на дистанционном зондировании, могут служить работы [Lavrova et al., 2016; Manzo et al., 2018]. Так, например, в работе [Lavrova et al., 2016], авторы, используя данные в оптическом диапазоне высокого разрешения со спутников Sentinel-2A (прибор MSI, англ. Multispectral Instrument) и Landsat-8 (OLI, англ. Operational Land Imager), провели мониторинг речных пюмов в различных районах Чёрного моря, изучая их формы и особенности распространения, так же уделяя внимание процессам, образующимся на фронтальной границе речных и морских вод. Одно из достоинств дистанционного зондирования — возможность проводить непрерывные долговременные исследования, используя архивные базы данных спутниковой информации.

Для районов, подверженных влиянию речных или иных пюмов, основной трудностью является получение количественных оценок концентрации взвешенного вещества, в то время как качественной информации накоплено в большом количестве.

1.2 Восстановление количественных данных о концентрации взвешенного вещества в приустьевых районах Мирового океана

На спутниковых изображениях в формате True color квазиестественных цветах (англ. true color images — TCI) пюмы могут быть чётко идентифицированы за счёт контрастных различий мутных речных вод и условно «чистых» морских вод, окружающих его [Лаврова и др., 2016]. Подавляющее число работ, посвящённых спутниковым наблюдениям пюмов, для своих целей используют сканеры цвета (Ocean Color Data).

Параметр, характеризующий уменьшение прозрачности воды в связи с наличием органического и неорганического взвешенного вещества, называется *мутность морской воды*. Используя данные спутникового зондирования, можно восстанавливать несколько количественных параметров: мутность морской воды (англ. turbidity) и концентрацию полного взвешенного вещества (в английской терминологии используются два параметра: TSM (англ. total suspended matter) и SPM (англ. suspended particulate matter concentration)).

Количественные оценки мутности и концентрации TSM могут быть получены по данным спутникового дистанционного зондирования с помощью различных алгоритмов, которые, строго говоря, должны учитывать множество факторов, включая: различный химический состав океанской воды, вод прибрежного шельфа, эстуариев и пресных водоёмов; геометрические параметры спутникового зондирования в данный момент времени; собственные свойства орбитальной аппаратуры; текущие климатические условия в районе исследования и многое другое [Berdeal et al., 2002; Kopelevich et al., 2007; Pruszek et al., 2005].

Как отмечается в работе [Novoa et al., 2017], существует три основных типа алгоритмов, обычно используемых для получения концентрации TSM по цветности воды: 1) эмпирические, 2) полуаналитические и 3) аналитические алгоритмы. Эмпирические однополосные модели и модели с соотношением полос частот широко используются в прибрежных и эстуарных районах [Doxaran, 2002; Petus, 2010; Gohin, 2011]. Эти типы моделей зависят от диапазонов концентрации TSM и водного спектра (яркости восходящего из-под поверхности излучения для выбранных длин волн), и требуют калибровки с помощью натурных измерений [Novoa et al., 2017]. Полуаналитические или аналитические модели основаны на присущих им оптических свойствах (на использовании аналитической формулы для коэффициента яркости водной толщи и малопараметрических моделей для показателей поглощения и рассеяния назад морской воды) и обеспечивают более глобальное применение [Chen et al., 2013; Dogliotti et al., 2015; Nechad et al., 2010]. Однако из-за высокой чувствительности к ошибкам атмосферной коррекции и ряда других трудностей, в настоящее время при обработке данных спутниковых сканеров цвета предпочтение отдаётся эмпирическим алгоритмам.

На сегодняшний день учёные из разных стран разработали ряд специализированных алгоритмов для оценки характеристик прибрежно-морских и озёрных вод [Gohin, 2011; Han et al., 2016; Knaeps et al., 2015; Tavora et al., 2020; Vantrepotte et al., 2011]. Первоначально некоторые из стандартных алгоритмов были разработаны для прибора Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor (SeaWiFS), затем для Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) и Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) на спутнике Envisat [Doerffer et al., 2007; Schroeder et al., 2007]. Пример успешного применения берегового алгоритма на данных MERIS описан в работе [Gangloff et al., 2007].

Прибор Ocean and Land Colour Instrument (OLCI) на спутнике Sentinel-3 (запущен в 2016 г.) был разработан отчасти для обеспечения преемственности с измерениями, ранее выполненными MERIS. Алгоритмы, разработанные для MERIS, были адаптированы для OLCI [Xue et al., 2020]. Некоторые из них были автоматизированы и стали доступны в специализированном программном обеспечении BEAM-VISAT, используемом большим количеством исследователей. Примерами таких алгоритмов являются: Case 2 Regional (C2R) [Doerffer et al., 2007], FUB/WeW [Schroeder et al., 2007], Eutrophic Lake (EUL) и Boreal Lake (BL) [Doerffer et al., 2007], а также максимальный индекс хлорофилла MCI (англ. maximum chlorophyll index) и высота линии флуоресценции FLH (англ. fluorescence line height) [Gower et al., 1999, 2005].

После многочисленных сопоставлений и синхронных натурных измерений было установлено, что невозможно разработать универсальный алгоритм расчёта классических параметров цвета морской воды на основе только лишь имеющихся данных спутниковых оптических сенсоров в связи с крайне разнообразным набором влияющих на это характеристик и неоднозначности их толкования в тех или иных условиях наблюдения. Необходимы региональные (возможно, и сезонные) алгоритмы, разработанные по данным натурных измерений. Такие алгоритмы дают возможность существенно улучшить точность определения оптических параметров [Копелевич и др., 2006].

Одним из примеров таких работ, могут служить многолетние труды по разработке и усовершенствованию региональных алгоритмов расчёта биооптических параметров, в первую очередь концентрации хлорофилла *a*, для Чёрного, Каспийского, Баренцевого и других северных морей России коллективом учёных ИО РАН, под руководством профессора, доктора физико-математических наук О.В. Копелевича [Глуховец и др., 2021; Копелевич, 1983; Рыбакова и др., 2012; Kopelevich et al., 2004].

Существуют многочисленные международные исследования по валидации спутниковых данных с использованием квазисинхронных подспутниковых натурных измерений [Abascal-Zorrilla et al., 2020; Babin et al., 2003; Chen, 2013; Constantin, Doxaran, 2016; Doxaran et al., 2002; Gernez et al., 2015; Ou et al., 2009; Petus et al., 2010]. Этот далеко неполный перечень показывает, что такие работы ведутся в различных регионах мира, что свидетельствует об их важности. Несмотря на использование различных методов и методик контактных измерений и различных данных дистанционного зондирования, проблема адекватной интерпретации спутниковых данных и получения продуктов, пригодных для использования вместо дорогостоящих данных *in situ*, всё ещё далека от решения.

Используемые в данной диссертационной работе алгоритмы описаны в параграфе 2.5.

1.3 Обзор современного состояния изученности прибрежной части Балтийского моря, находящейся под влиянием выноса из Балтийского пролива

Как показал анализ литературных источников, не так много работ посвящены исследованиям пространственной и временной изменчивости содержания взвешенного вещества в поверхностном слое вод юго-восточной Балтики по спутниковым данным [Буканова и др., 2011; Гоголев и др., 2020а; Копелевич и др., 2016]. В этих немногочисленных работах было показано, что существующие биооптические алгоритмы не обеспечивают приемлемой точности расчёта исследуемых параметров в этом регионе. Главная причина больших ошибок стандартных алгоритмов для Балтийского моря (по мнению вышеперечисленных авторов) — высокая концентрация окрашенного органического вещества, что является специфической особенностью балтийских вод [Darecki, Stramski, 2004]. Также возможная причина неверных расчётов может быть связана с: плохой атмосферной коррекцией; использованием спутниковых данных среднего пространственного разрешения MODIS и MERIS (250–1000 м), недостаточных для восстановления мелкомасштабных особенностей прибрежных водных масс; дополнительный вклад в отражение солнечного излучения от мелководного дна прибрежной части Балтийского моря [Копелевич и др., 2008].

В силу отсутствия работ, посвящённых исследованию распространения вод Калининградского залива через Балтийский пролив в Гданьский залив и отсутствию опубликованных научных статей, основанных на данных спутникового зондирования высокого пространственного разрешения (10–15 м) была сформулирована одна из задач данной диссертационной работы — изучить особенности распространения вод Калининградского залива через Балтийский пролив на основе данных многолетнего спутникового мониторинга, с дальнейшей верификацией результатов спутниковых наблюдений данными натурных измерений.

1.4 Обзор современного состояния изученности прибрежной части Чёрного моря в районе выноса реки Мзымты

Как уже было сказано ранее, району выноса реки Мзымты был посвящён ряд научных работ [Завьялов и др., 2014; Зацепин и др., 2010; Короткина и др., 2011]. В этих исследованиях малых рек российского побережья Чёрного моря, на основе многолетних судовых измерений приведены количественные характеристики отклика гидрофизических полей в шельфовой зоне на воздействие материкового стока, описаны основные закономерности динамики плюма при тех или иных воздействиях. Но как отмечают сами авторы, данные исследования имеют

очень локальный и периодический характер, а для таких процессов необходим непрерывный мониторинг. Для этих целей необходимо использовать данные дистанционного зондирования.

В данных работах совместное использование результатов измерений *in situ* и данных дистанционного зондирования (ДДЗ) являлось номинальным, каждый источник информации использовался отдельно, притом чаще отдавалось предпочтение прямым (натурным) измерениям, а ДДЗ применялось как вспомогательный метод для получения только качественных характеристик.

Вследствие этого был поставлен второй кластер научных задач данной диссертационной работы — целенаправленно провести квазисинхронные подспутниковые натурные измерения и определить связь между измеренными значениями мутности морской воды и концентрации взвешенного вещества в районе влияния выноса реки Мзымты, полученные различными методами. А именно: с помощью датчика мутности, установленного на CTD зонде; портативным турбидиметром; дистанционными методами на основе спутниковых сканеров цвета высокого пространственного разрешения и непосредственным отбором проб с дальнейшим лабораторным анализом. Провести валидацию различных стандартных спутниковых алгоритмов высокого пространственного разрешения для восстановления оптических параметров морской среды в выбранном полигоне.

1.5 Обзор современного состояния изученности прибрежной части Среднего Каспия в районе выносов рек Терек и Сулак

Комплексные исследования Каспийского моря довольно распространены и приурочены к исследованию глобальных климатических изменений и их влияния на морскую акваторию в целом [Амбросимов и др., 2014; Архипкин и др., 2013; Клювиткин и др., 2015; Паутова и др., 2022; Рыбакова и др., 2012; Тужилкин, Гончаров, 2008].

Существует ряд работ, опубликованные специалистами-гидрологами, приуроченные к данному региону, но они посвящены особенностям морфологического строения, ландшафтов, хозяйственному использованию непосредственно устьевых областей рек Терек и Сулак [Кравцова, Митькиных, 2013; Михайлов и др., 2004]. Как показал анализ литературных источников, морские экспедиционные измерения в прибрежных районах рек Сулак и Терек до нас не проводились.

1.6 Выводы к главе 1

В главе 1 автором проведен обзор современного состояния изученности и методов исследования речных и лагунных вод как в Мировом океане, так и в выбранных районах исследования.

Анализ литературных источников показал, что на современном этапе развития науки ученые всё чаще склонны к использованию комплексного метода исследования для получения наиболее обширных и точных научных результатов. А зачастую появляется всё больше работ, основанных только на методах дистанционного зондирования, вытесняя трудоёмкие и дорогостоящие натурные измерения.

Для районов, подверженных влиянию речных или иных плумов, основной трудностью является получение количественных оценок концентрации взвешенного вещества, в то время как качественной информации накоплено в большом количестве.

Для каждого района исследования было получено:

1. В силу отсутствия работ, посвящённых исследованию распространения вод Калининградского залива через Балтийский пролив в Гданьский залив и отсутствию опубликованных научных статей, основанных на данных спутникового зондирования высокого пространственного разрешения (10–15 м) была сформулирована одна из задач данной диссертационной работы — изучить особенности распространения вод Калининградского залива через Балтийский пролив на основе данных многолетнего спутникового мониторинга с дальнейшей верификацией результатов спутниковых наблюдений данными натурных измерений.
2. В районе влияния выноса реки Мзымты не проводились работы по восстановлению полей мутности морской воды и концентрации взвешенного вещества на основе оптических спутниковых данных высокого пространственного разрешения. Вследствие этого был поставлен второй кластер научных задач диссертационной работы — целенаправленно провести квазисинхронные подспутниковые натурные измерения и определить связь между измеренными значениями мутности морской воды и данными дистанционного зондирования. Провести валидацию различных стандартных спутниковых алгоритмов высокого пространственного разрешения для восстановления оптических параметров морской среды в выбранном полигоне.
3. Как показал анализ литературных источников, морские экспедиционные измерения в прибрежных районах рек Сулак и Терек (Каспийского моря) до нас не проводились. Третий кластер научных задач диссертационной работы — впервые выполнить квазисинхронные подспутниковые натурные измерения и провести валидацию спутниковых алгоритмов в новом тестовом районе.

ГЛАВА 2 ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В данной главе описываются материалы и методы, применявшиеся при выполнении настоящей работы. Были использованы следующие данные: данные судовых натурных измерений, данные дрейфтерных экспериментов, метеорологические данные и данные дистанционного зондирования высокого и среднего пространственного разрешения.

2.1 Информация об экспедиционных исследованиях

Все натурные измерения во время экспедиционных исследований были проведены квазисинхронно со спутниковой съёмкой.

Основные задачи экспедиционных исследований были следующие:

- Проведение экспериментальных исследований и измерений *in situ*, синхронных со спутниковой съёмкой, направленных на выявления параметров речных и лагунных выносов, их трёхмерной структуры и гидродинамических процессов, связанных с выносами в юго-восточной части Балтийского моря, в северо-восточной части Чёрного моря и в северо-западной части Каспийского моря;
- Усовершенствование методики получения количественных характеристик, в первую очередь концентрации взвешенного вещества и мутности морской воды на основе данных новейших сенсоров спутникового базирования и сравнение полученных характеристик с результатами подспутниковых измерений за 2018–2023 гг.

2.1.1 Черноморский полигон

Основные исследования в районе устья реки Мзымта (на Черноморском полигоне), результаты которых вошли в данную диссертационную работу, были проведены во время экспедиционных работ при выполнении трёх серий подспутниковых измерений в апреле-мае 2018, 2019 и 2021 гг., которые включали в себя около 300 станций CTD-зондирования и в общей сложности 16 выходов в море. Сводная карта-схема станций, на которых были получены гидрологические и гидрофизические данные, приведена на Рисунке 1.

- В 2018 г. работы проводились с 20 по 30 апреля. Было выполнено пять выходов в море и 64 CTD-станции. Измерения включали в себя данные о температуре морской воды, солёности (электропроводности), мутности морской воды и флюоресценции (концентрации хлорофилла *a*), полученные при помощи CTD-зондирований толщ морской воды.

- В 2019 г. экспедиционные измерения были проведены с 22 апреля по 3 мая и включали в себя: CTD зондирование на 138 станциях, отбор и фильтрацию поверхностных проб морской воды для определения концентрации взвешенного вещества; одновременные измерения мутности воды в приповерхностном слое портативным мутномером; рентгенофазовый анализ 20 морских проб воды. Всего было выполнено семь выходов в море.
- В 2021 г. работы проводились с 21 апреля по 3 мая. Всего было выполнено четыре выхода в море и 91 CTD-зондирование. Так же как и в 2019 г. экспедиционные работы включали в себя судовые CTD-зондирования, отбор и анализ поверхностных проб морской воды.

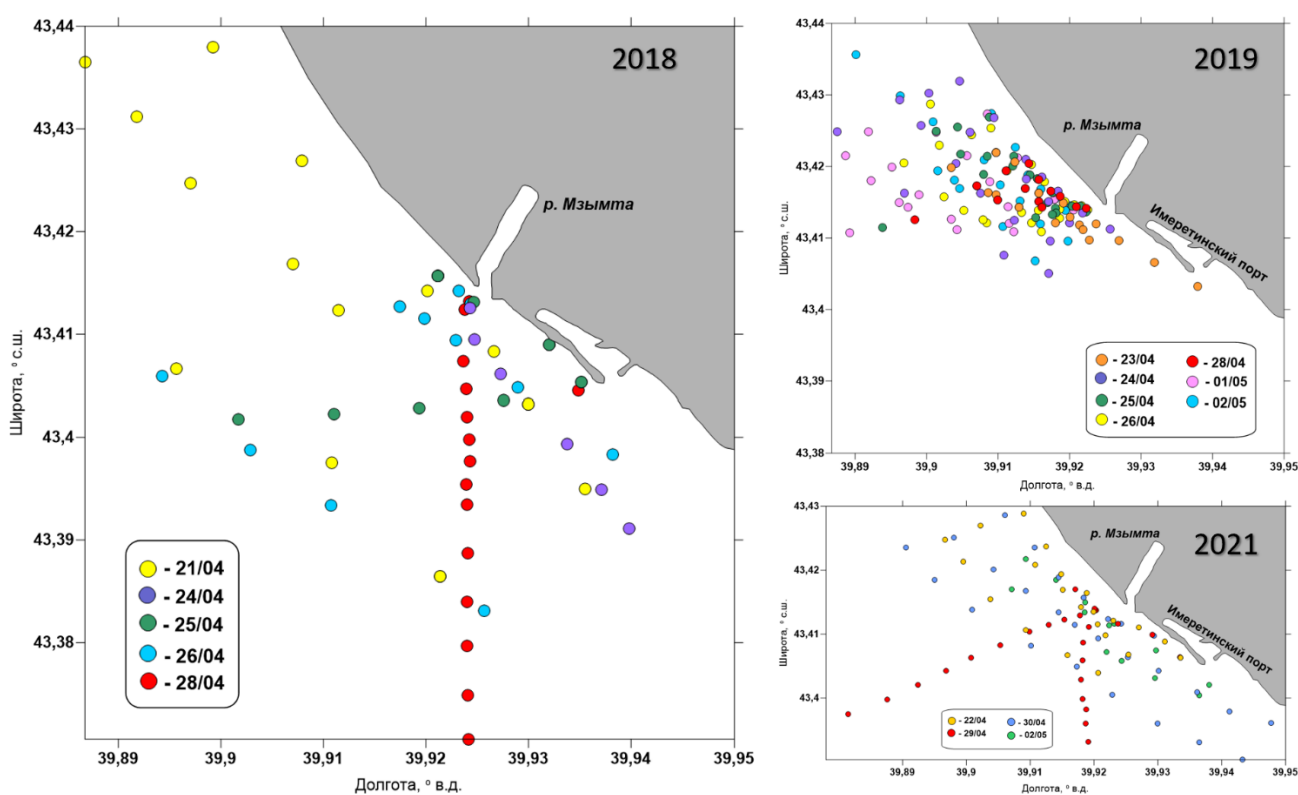


Рисунок 1 — Карты-схемы станций, выполненных во время экспедиционных работ на Черноморском полигоне в 2018–2021 гг.

2.1.2 Балтийский полигон

Для изучения процессов распространения вод Калининградского залива в акватории Гданьского залива были использованы материалы четырёх экспедиционных подспутниковых измерений в 2018, 2019, 2020 и 2021 гг. Всего в районе Балтийского пролива было выполнено 6 серий гидрологических и гидрофизических съёмок: 08.08.2018, 01.08.2019, 07.08.2019, 18.08.2020, 21.08.2020, 16.07.2021. Данные натурных измерений включали в себя 155 CTD-зондирований, измерения мутности морской воды в приповерхностном слое на каждой

станции с помощью портативного мутномера и непрерывная ADCP-съёмка (англ. acoustic doppler current profiler, акустический доплеровский измеритель течения) (в общей сложности было отработано 19 галсов). На Рисунке 2 представлена сводная карта-схема местоположения CTD-станций за весь период экспедиционных измерений.

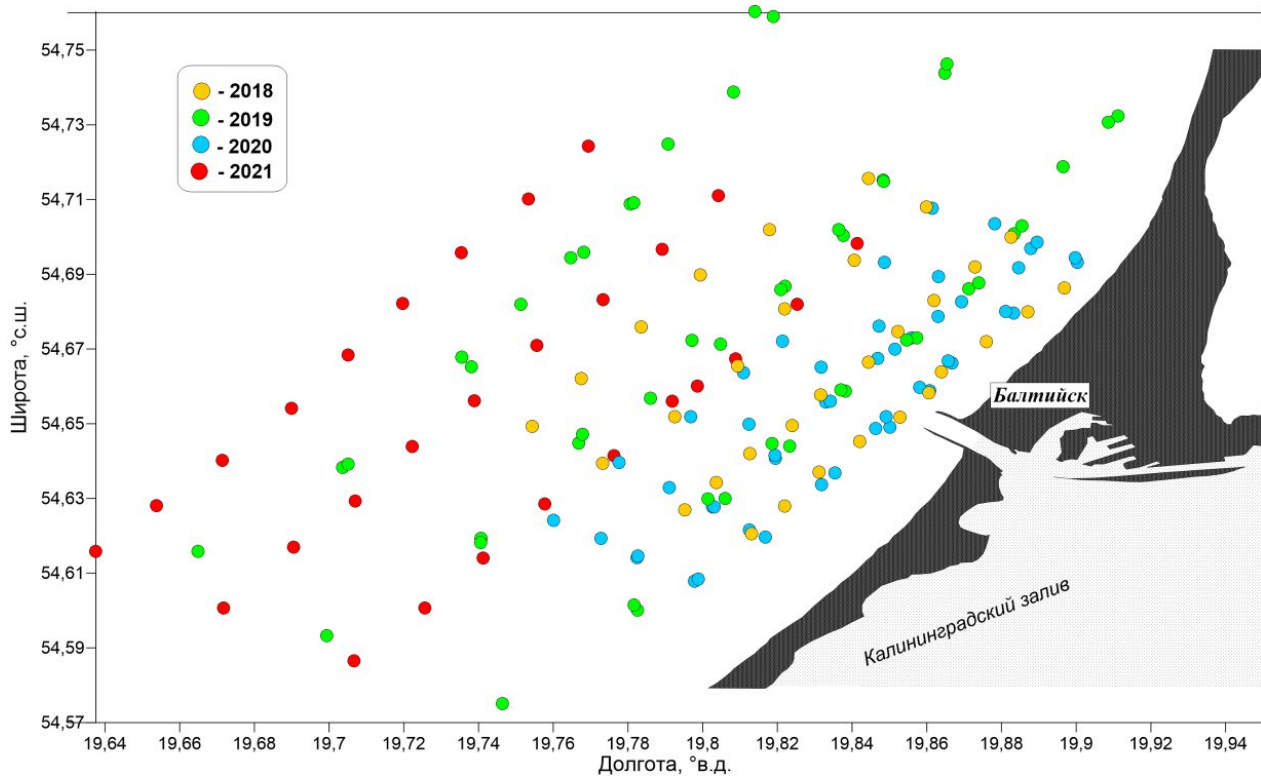


Рисунок 2 — Карта-схема станций, выполненных во время экспедиционных работ на Балтийском полигоне в 2018–2021 гг.

2.1.3 Каспийский полигон

В диссертационной работе использованы материалы подспутниковых измерений в районе устьев рек Сулак и Терек, выполненные в июне 2022 и 2023 гг. Всего было задействовано 6 серий подспутниковых экспериментов: 06.06.2022, 09.06.2022, 02.06.2023, 04.06.2023, 05.06.2023 и 07.06.2023. Данные натурных измерений включали в себя: 134 CTD-зондирований; измерения мутности морской воды в приповерхностном слое на каждой станции с помощью портативного мутномера; отбор морских проб в приповерхностном слое с целью определения концентрации взвешенного вещества и минерального состава в пробах воды.

2.2 Судовые натурные измерения

Судовые измерения проводились с маломерного судна («Фламинго» в Балтийском море и «Арабелла» в Чёрном море) в виде последовательных параллельных береговой линии галсов, пересекающих исследуемый плюм на разном расстоянии от берега. Основные натурные данные были получены с помощью акустического доплеровского профилографа скорости течения ADCP RDI WH 300 кГц совместно с выполнением гидрологических станций при помощи высокоточного прибора канадской фирмы Richard Brancker Reaserch Ltd RBR-concerto, оснащённого дополнительными измерителями мутности (датчиком обратного рассеивания света) Seapoint Turbidity и флюоресценции Turner Design Cyclops-7 для определения концентрации хлорофилла *a* с частотой опроса датчиков до 6 Гц. На Рисунке 3 представлены изображения основных приборов, использованных во время экспедиционных натурных измерений.



Рисунок 3 — Основной состав приборной базы, используемый
во время экспедиционных натурных измерений

Измеритель мутности Seapoint Ltd представляет собой аналоговый датчик, фиксирующий обратное рассеивание света в определённом объёме воды, расположенном перед оптическим окном датчика. Отличительной особенностью измерителя является то, что данный датчик способен фиксировать величину рассеивания света, которая отражается от небольших частиц в воде и возвращается обратно к фотоприёмнику. Процесс обратного рассеивания света происходит на частицах, меньшего размера, чем длина испускаемой волны, которая составляет 880 нм. Как показано в работе [Van de Hulst, 1981] для частиц осадка с

диаметрами, превышающими длину волны источника света (880 нм), рассеяние света фактически происходит посредством оптических процессов, таких как отражение, преломление и дифракция. Направление, в котором свет рассеивается после взаимодействия с частицей, зависит от отношения между длинами волн и размерами частиц. Когда частица больше, чем длина волны, свет имеет тенденцию рассеиваться более интенсивно на фронте частицы [Sadar, 1998]. Чем выше сигнал, принимаемый датчиком от толщи вод, тем больше интенсивность обратного рассеивания и, следовательно, тем больше содержание взвешенных частиц в воде. Данные датчика мутности Seapoint Ltd предоставляются в нефелометрических единицах мутности NTU (*англ.* Nephelometric Turbidity Unit). Диапазон измерения составляет от 0,05 до 15 000 NTU (отклонение $\pm 2\%$), рабочая температура измерителя 0–65 °C (температурный коэффициент $< 0,05\ \%/^{\circ}\text{C}$), допустимая глубина измерений до 6000 м.

Используемый нами измеритель, несомненно, представляет собой удобный инструмент для оперативной оценки мутности вод, однако, с его помощью невозможно оценить массовую концентрацию взвешенных частиц в воде, ввиду того, что сигнал, во-первых, приходит лишь от ограниченной части спектра взвешенных частиц, и во-вторых, сигнал зависит от минералогического состава взвеси. Во многом результат измерений датчика мутности Seapoint Ltd даёт оценку не массовой доли взвеси в воде, а оценку количества частиц в воде, на которых происходит рассеивание света назад. В связи с этим для проведения оценок массовой концентрации взвеси в воде необходимо определить зависимость между показаниями датчика мутности Seapoint Ltd и результатами отбора проб воды с дальнейшей прямой оценкой массы взвеси в воде.

При CTD-зондировании, поверхностные значения были получены, в среднем, для горизонта 0,35–0,50 м. В силу технических и технологических особенностей прибора на глубине менее 0,35 метра измерения не выполняются. Для измерения мутности воды в более тонком приповерхностном слое, мутность воды дополнительно измерялась портативным турбидиметром TN400 фирмы Apera Instruments в пробах воды, отобранных параллельно CTD-зондированию в первых десятках сантиметров (0,10–0,15 м). Данный прибор оснащён инфракрасным источником света, использующим нефелометрический метод, соответствующий стандарту ISO7207 (обратное рассеивание сигнала под углом 90°). Методика измерения обратного рассеивания света идентична датчику Seapoint Ltd, установленному на CTD-зонде. Диапазон измерений турбидиметра составляет от 0 до 1000 NTU (поставляется с четырьмя готовыми калибровочными стандартными растворами мутности высокомолекулярного полимера: 0,02; 20,0; 100; 800 NTU). Точность измерений от 0,01 до 1 NTU в зависимости от выбранного диапазона. В каждой пробе производилось два мгновенных измерения. Для анализа полученных результатов использовалось их среднее. В работе [Merten et al., 2014] на примере лабораторных экспериментов более подробно показаны

некоторые особенности разных оптических датчиков при определении концентрации взвешенного вещества.

ADCP RDI WH 300 кГц, обеспечивающий измерение вертикальных профилей течения в шельфовой зоне на глубине до 100 м, работал в режиме bottom tracking, позволяющем вычислять реальную скорость течения во время движения судна. Точность измерения горизонтальных составляющих скорости течения составляла 2–3 см/с с вертикальным разрешением (размером измерительной ячейки) 1–2 м.

Технические характеристики измерителя скорости и направления течения ADCP RDI WH 300 кГц и гидрологического зонда CTD фирмы RBR-concerto представлены в Таблицах 1 и 2.

Для сбора, отображения, экспорта и первичной обработки ADCP данных использовалось специальное программное обеспечение RDI под WindowsTM: WinSC, WinADCP и Winriver II. Визуализация ADCP данных о скорости и направления течений была выполнена при помощи программных пакетов Surfer Golden Software и Ocean Data View. Карты районов исследования построены с использованием программы MapViewer 8. Пример визуализации ADCP данных в программе Ocean Data View представлен на Рисунке 4.

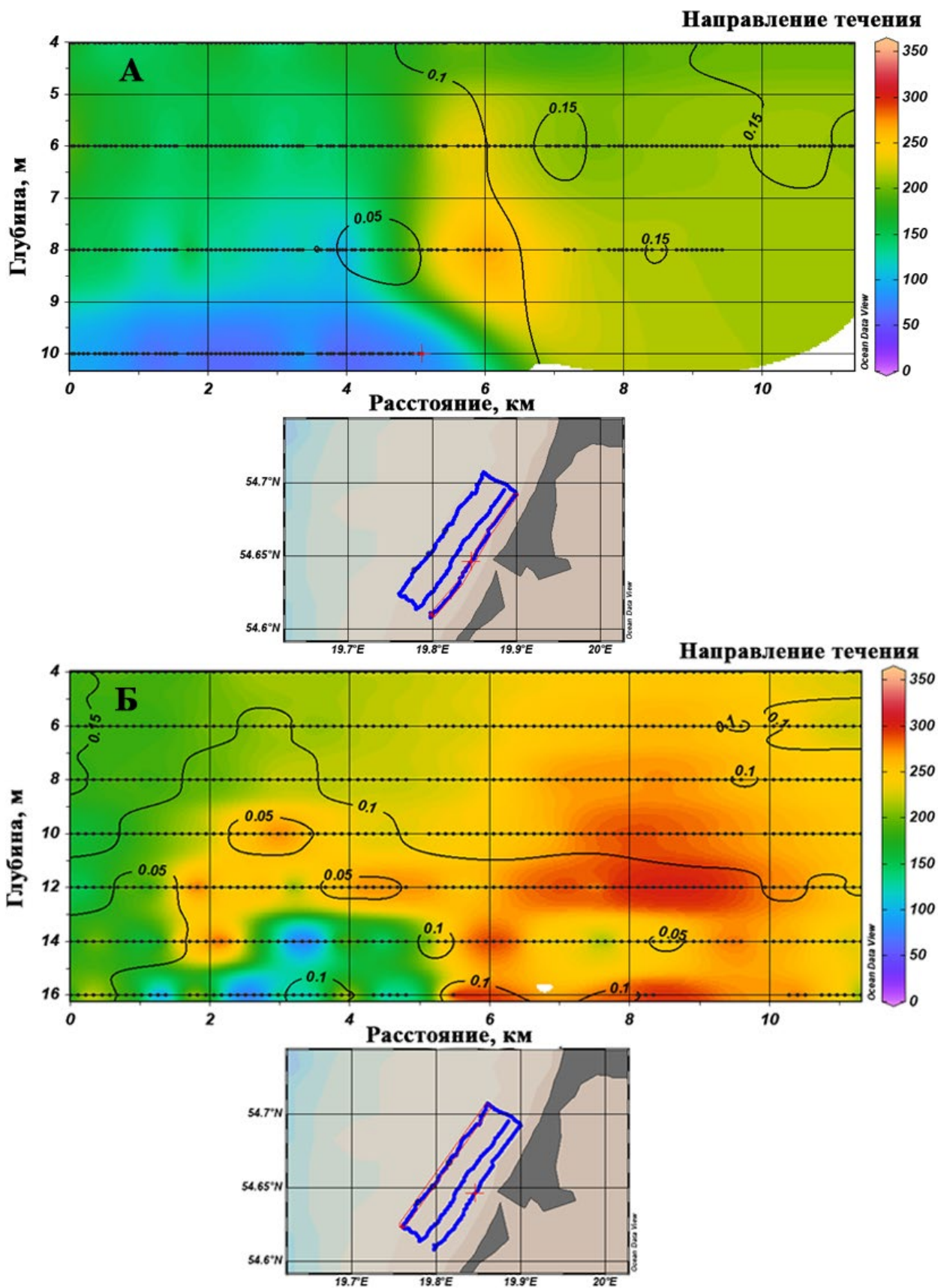


Рисунок 4 — Направление течений на параллельных разрезах, выполненных ADCP RDI WH 300 кГц во время судовых измерений 18 августа 2020 г.: а — результаты измерений на I галсе; б — результаты измерений на III галсе

Таблица 1 — Технические характеристики акустического
доплеровского профилографа течений ADCP RDI WH 300 кГц

Параметр	Диапазон	Точность	Чувствительность
Датчик температуры, °С	–5...+45	0,4	0,01
Компас	15° (макс. наклон)	2°	0,5°
Давление	0–200 м	0,25 %	0,005 %
Скорость течения	±5 м/с	0,5 % от измеренной величины	–
Профиль течения	126 м (дистанция)	0,5–8 м (размер ячейки)	2 Гц (макс. частота измерения)

Таблица 2 — Технические характеристики гидрологического CTD-зонда RBR-Concerto

Параметр	Диапазон	Точность измерений	Разрешение	Время отклика, с	Типичная стабильность в год	Скорость измерений, Гц
Электропроводность	0–85 мСМ/см	±0,003 мСМ/см	0,001 мСМ/см	~1	0,010 мСМ/см	2–6
Температура	–5...+35 °С	± 0,002°	0,00005 °С	~1	0,002 °С	2–6
Глубина	0–200 м	±0,05 % FS*	0,001 % FS	<0,01	0,1 % FS	2–6

* англ. full scale — полная шкала, предельное показание шкалы (измерительного прибора).

Обработка (сглаживание/фильтрация) и визуализация CTD-данных выполнена при помощи программных пакетов Surfer и Grapher Golden Software. Карты пространственного распределения гидродинамических полей построены с использованием интерполятора Kriging — это геостатистический метод построения сетки на основе неравномерно расположенных входных данных. В качестве вспомогательного инструмента также был использован Microsoft Excel.

Навигация в пределах полигона (по заданным станциям) осуществлялась при помощи современного картплоттера со встроенным эхолотом Garmin GPSmap 541s. Экспорт координат гидрологических станций и судовых треков был реализован с использованием программного обеспечения Garmin BaseCamp.

2.3 Метеорологические данные

Во время проведения судовых измерений производилась непрерывная регистрация температуры воздуха, скорости и направления ветра по ходу движения судна бортовой метеостанцией Airmar WeatherStation 150WX. (Рисунок 5). В Таблице 3 представлены её технические характеристики. Отображение параметров метеостанции в реальном времени было настроено и реализовано с помощью программного обеспечения FactoryWeatherCaster™ Software 3.005.



Рисунок 5 — Судовая метеостанция Airmar WeatherStation 150WX, используемая для регистрации основных метеорологических параметров во время подспутниковых измерений

Таблица 3 — Технические характеристики судовой метеостанции Airmar 150WX

Параметр	Диапазон	Точность	Разрешение
Скорость ветра	0–40 м/с	5 %/10 м/с	0,1 м/с
Направление ветра	0–359,9°	±3°/10 м/с	0,1°
Температура воздуха	–40...+80 °C	±1,1°C/20 °C	0,1 °C
Атмосферное давление	300–1100 гПа	±0,5 гПа	0,1 гПа
Учёт бортовой качки/крен	50°	±1° в диапазоне ±30°	0,1°

Для анализа и учёта основных метеорологических параметров (скорость и направление ветра, температура воздуха, атмосферное давление, количество выпавших осадков) использовался также архив метеорологических данных Meteoblue (www.meteoblue.com). Эти метеорологические данные получены на основе использования глобальной модели NEMSGLOBAL, пространственное разрешение которой составляет 3–30 км, размер ячейки — 3×3 км. Данное моделирование основано на сочетании негидростатического мезомасштабного моделирования NMM (англ. Nonhydrostatic Meso-Scale Modelling) с реальными измерениями

системы мониторинга окружающей среды (англ. Environment Monitoring System) NOAA (англ. National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США), что позволяет учитывать в расчётах множество деталей и тем самым увеличивать достоверность получаемых данных. В результате, в архиве Meteoblue хранятся метеорологические данные для любой точки земного шара с временным шагом от часа до суток с 1984 г. до сегодняшнего дня.

Для изучения влияния ветрового режима на характер распространения вод из Калининградского залива были использованы данные в узле с координатами 54,69° с.ш. и 19,78° в.д. (в четырёх милях от молов Балтийского пролива). Были определены преобладающие скорости и направления ветра (розы ветров) в период с января 2014 г. по сентябрь 2020 г. Для изучения характера ветрового поля в районе устья реки Мзымты, были использованы данные в узле с координатами 43,4° с.ш. и 39,91° в.д.

Метеорологические данные из архива Meteoblue были верифицированы с помощью измерений судовой метеостанцией Airmar 150WX. Численные эксперименты подтвердили достоверность и точность используемых данных.

В качестве дополнительных источников использовались данные реанализа NCEP Climate Forecast System (www.noaa.gov) и данные прибрежных метеостанций (www.rp5.ru).

2.4 Лабораторные исследования

В 2019 и 2021 гг. во время проведения натурных судовых измерений в районе реки Мзымты и в 2022–2023 гг. в районе рек Сулак и Терек была отобрана 361 проба морской воды в приповерхностном слое для оценки концентрации взвешенного вещества весовым методом. В последующем полученные результаты были использованы для верификации спутниковых данных и оптических датчиков мутности, использующих нефелометрические единицы измерения.

Пробоотбор и пробоподготовка были произведены в соответствии с ГОСТ 31861-2012 (<https://docs.cntd.ru/document/1200097520>) (Межгосударственный стандарт. Вода. Общие требования к отбору проб). Объём каждой пробы составлял 1,5 л. Все пробы были взвешены в лабораторных условиях с точностью до 0,01 г с помощью портативных электронных весов Scout SPX6201 производства компании Ohaus (Рисунок 6). Для определения концентрации взвешенного вещества был использован гравиметрический метод [Van Der Linde, 1998; Neukermans, 2012].



Lafil 400-LF30

а

Весы портативные электронные **Scout SPX6201**
производства компании **Ohaus**



б

Рисунок 6 — Вакуумная фильтровальная установка Lafil 400-LF30 (а);
весы портативные электронные Scout SPX6201 (б)

Пробы морской воды фильтровали с использованием вакуумной установки Lafil 400-LF30 производства фирмы Rocker (в Таблице 4 представлены её технические характеристики) и стекловолоконных фильтров WHATMAN GF/F, изготовленных из гидрофобного боросиликатного стекла. Эти фильтры способны задерживать мелкодисперсные частицы размером до 0,7 мкм. Фильтры предварительно взвешивали с точностью до 0,1 мг и хранили в эксикаторе для использования в течение двух недель (эксикаторы — лабораторные ёмкости, внутри которых поддерживается стабильный уровень влажности, обычно равный нулю. Эти изделия предназначены для длительного хранения высушенных образцов и не позволяют проникать влаге из атмосферного воздуха). Пробы воды фильтровали в день отбора. На Рисунке 7 продемонстрированы фотографии фильтров, сразу после процесса фильтрования в камеральных условиях.

Таблица 4 — Технические характеристики системы вакуумной фильтрации Lafil 400-LF30

Электропитание	220 В/50 Гц
Макс. потребляемая мощность	80 Вт
Макс. потребляемый ток	0,4 А
Предельное остаточное давление	–720 мм.рт.ст.
Макс. производительность	22 л/мин
Частота вращения электродвигателя	1450 об/мин
Штуцер	5/16 (8) дюйм (мм)
Габаритные размеры (Д×Ш×В)	33,5×23×45 см
Воронка с фильтром	Полиэфирсульфон (300 мл, 47 мм/50 мл)
Сливной сосуд	Поликарбонат (1200 мл)
Защита от переполнения	Полипропилен



а

б

Рисунок 7 — На фотографиях представлены фильтры сразу после процесса фильтрования: 2019 г. (а); 2021 г. (б). Цифрами подписано значение мутности морской воды в пробе, определённое портативным турбидиметром TN400

Для удаления морской соли осадок после фильтрации промывали 250 мл дистиллированной воды. Такое количество пресной воды обеспечивало растворение и удаление соли из образцов. Определение массы сухой взвеси проводилось в лаборатории Экспериментальной и технической петрологии кафедры петрологии геологического факультета Московского государственного университета (МГУ) имени М.В. Ломоносова. Фильтры сушили в течение 24 ч при $T = 50^{\circ}\text{C}$ и повторно взвешивали. Точность определения массы взвеси в пробах составляла $\pm 0,0001$ г. Взвешенные твёрдые частицы включали в себя все органические и минеральные вещества размером менее 0,7 мм.

Медиана и межквартильный размах (IQR) были рассчитаны для каждой выборки по протоколу, подробно описанному в работе [Neukermans et al., 2012]. Наблюдения, в которых IQR превышал 45% от медианного значения концентрации взвешенного вещества, были исключены.

С целью получения информации о минеральном составе взвеси из всех проб морской был отобран наиболее разнообразный диапазон образцов для проведения рентгенофазового анализа. Образцы включали в себя пробы, взятые во время экспедиционных работ в Каспийском и Чёрном морях в разные годы, разные дни и в разных частях плюма. Сюда вошли станции с наиболее характерными значениями мутности (от максимальных до минимальных NTU) и расположенные на разном удалении от устья рек Мзымта, Терек и Сулак.

Рентгенофазовое сканирование и аналитическая обработка результатов производилась на кафедре нефтегазовой седиментологии и морской геологии геологического факультета

МГУ имени М.В. Ломоносова. Для исследования навеску пробы истирали до состояния тонкой пудры (около 0,01 мм). Полученным порошком заполняли кювету диаметром 20 мм и толщиной 2 мм и проводили съёмку на дифрактометре ДРОН 3М (Co K α , $\lambda = 1,79021 \text{ \AA}$) в интервале углов 2θ от 3 до 50° в непрерывном режиме со скоростью 2° в минуту. Диагностика фаз проведена на основе кристаллографической базы MINCRYST для минералов и их структурных аналогов. Оценка количества минеральной фазы проведена на основе сопоставления интенсивностей соответствующих пиков.

2.5 Данные дистанционного зондирования

Все измерения с судна выполнялись квазисинхронно со спутниковой съёмкой (Приложение А). Источником дистанционной информации в нашей работе явились данные, полученные с приборов спутников Landsat-8 и Sentinel-2A и Sentinel-2B, а именно с мультиспектральных сенсоров OLI (англ. Operational Land Imager) и MSI (англ. Multispectral Instrument) соответственно. Также были использованы данные, полученные с помощью прибора OLCI (англ. Ocean and Land Colour Instrument) спутника Sentinel-3, семейства спутников дистанционного зондирования Земли Европейского космического агентства (англ. European Space Agency — ESA), созданного в рамках проекта GMES (англ. Global Monitoring Environment and Security — Глобальный мониторинг в интересах охраны окружающей среды и безопасности) программы «Коперник» (англ. Copernicus). Из-за пространственного разрешения данных OLCI — 300 м сравнение с измерениями *in situ* на станциях невозможно. Эти данные были использованы качественно для понимания общей динамической картины над исследуемым полигоном.

Спутник Landsat-8, созданный совместно Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства (англ. National Aeronautics and Space Administration — NASA) и Геологической службой США (англ. United States Geological Survey — USGS), оснащён мультиспектральными сканерами OLI и TIRS (англ. Thermal InfraRed Sensor) среднего пространственного разрешения, работающими соответственно в видимом и ИК-диапазоне, которые покрывают полосу шириной порядка 185 км в непрерывном режиме с частотой пролёта над одним и тем же районом один раз в 7–8 дней. Максимальное пространственное разрешение данных сенсоров 15–30–60 м в зависимости от соответствующего спектрального диапазона зондирования (панхроматический/мультиспектральный). Парные спутники Sentinel-2A и Sentinel-2B, разработанные ESA, оснащены мультиспектральным сенсором MSI с пространственным разрешением до 10 м, который в непрерывном режиме осуществляет зондирование полосы

поверхности шириной порядка 290 км с частотой один раз в 3–10 дней для одного и того же региона.

Стандартные алгоритмы восстановления оптических параметров на основе спутниковых данных, в первую очередь концентрации взвешенного вещества SPM (англ. Suspended Particulate Matter) на единицу объёма и концентрации хлорофилла, первоначально разработаны для вод открытого океана с преобладанием фитопланктона и продуктов его распада, так называемые воды типа Case 1, тогда как в нашей работе изучаемые районы относятся к типу прибрежных вод — Case 2, для которых характерны повышенная мутность и существенное влияние береговой зоны [Mobley et al., 2004; Morel, Prieur, 1977].

В диссертационной работе было использовано различное программное обеспечение для обработки спутниковых данных и последующей верификации с результатами измерений *in situ*. Во-первых, был применён алгоритм C2RCC (англ. Case 2 Regional Coast Colour), первоначально разработанный группой учёных [Doerffer, Schiller, 2007] и в настоящее время реализованный в программном обеспечении ESA Sentinel Toolbox SNAP (<https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>). Разработка более надёжных технологий оценки ключевых параметров морской среды стала возможной благодаря открытому доступу к исходному коду алгоритма, основанного на использовании нейронных сетей. Важнейшим свойством нейронных сетей является возможность их обучения путём регулярного обновления базы данных коррелированных входных параметров и полученных характеристик исследуемой среды путём введения в модель более широкого спектра результатов реальных контактных измерений, синхронизированных со спутниковыми наблюдениями в различных регионах, и последовательного восстановления связей между нейронами, т.е. фактически реализации множественной нелинейной регрессии. Современная концепция и перспективы использования нейронных сетей для расчёта оптических характеристик морской среды подробно изложена в работе [Brockmann et al., 2016].

Разработчики алгоритма оставили возможность конечному пользователю изменять некоторые входные параметры и коэффициенты, в том числе полученные экспериментальным путём, и нуждающиеся в постоянной региональной коррекции. Сюда входят коэффициенты пропускания атмосферы, параметры отражательной способности той или иной подстилающей поверхности, коэффициенты облачного риска, давление воздуха и другие климатические характеристики, а также коэффициенты арифметического преобразования мутности и хлорофилла, подобранные опытным путём на основе множества полевых измерений.

Общий вид интерфейса программного комплекса SNAP, а точнее его раздела, предназначенного для расчёта ключевых оптических параметров подстилающей водной поверхности, представлен на Рисунке 8.

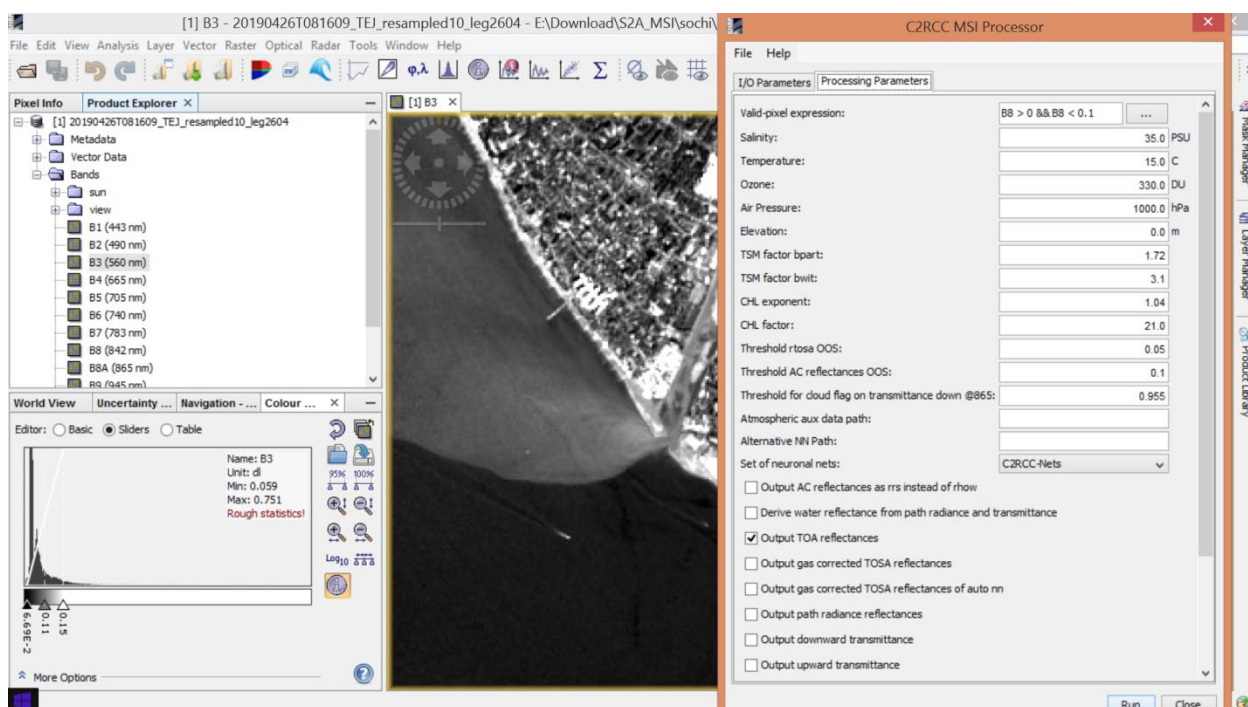


Рисунок 8 — Пример выбора параметров для алгоритма C2RCC при использовании программного комплекса SNAP

Как видно, наиболее чувствительные исходные параметры, касающиеся физико-химических свойств водной поверхности и прилегающей атмосферы, а также некоторые арифметические коэффициенты, полученные на этапе тестирования алгоритма, позволяет задавать в отдельном окне для вводимых исходных данных алгоритма C2RCC с целью повышения точности расчётов и адаптации к текущим условиям зондирования.

Результаты обработки в SNAP, которые мы использовали в нашем исследовании, могут быть представлены как в табличной форме для удобства сравнения с данными измерений *in situ*, так и в виде карт.

Во-вторых, для всех данных Landsat-8 OLI и Sentinel-2 MSI была выполнена атмосферная коррекция методом ACOLITE DSF (англ. Dark Spectrum Fitting) [Vanhellemont, 2019]. Этот алгоритм был разработан в Королевском Бельгийском институте естественных наук (англ. Royal Belgian Institute of Natural Sciences) для обработки данных в прибрежных областях и внутренних водоёмах [Vanhellemont, Ruddick, 2016]. Его схема основана исключительно на изображениях и, следовательно, не нуждается во внешних входных данных, таких как аэрозольная оптическая толщина (англ. aerosol optical thickness) (измеренная или оценённая). Эта схема предполагает, что атмосфера является однородной над спутниковой сценой или субсценой, что позволяет предсказать отражательную способность атмосферы (англ. glint correction) по нескольким темным объектам на сцене [Renosh et al., 2020]. В Таблице 5 представлены длины волн, используемые при расчётах атмосферной коррекции ACOLITE.

Таблица 5 — Длины волн каждого сенсора, используемые при расчётах атмосферной коррекции ACOLITE (https://github.com/acolite/acolite/releases/acolite_manual_20220222.pdf)

Sensor	Blue1	Blue2	Green	Red	RE1	RE2	RE3	NIR	NIR2	SWIR1	SWIR2
L5/TM	—	486	571	660	—	—	—	839	—	1678	2217
L7/ETM+	—	479	561	661	—	—	—	835	—	1650	2208
L8/OLI	443	483	561	655	—	—	—	865	—	1609	2201
S2A/MSI	443	492	560	665	704	740	783	865	833	1614	2202
S2B/MSI	442	492	559	665	704	739	780	864	833	1610	2186

Продукты выводятся, как геолокализованные наборы данных в формате NetCDF и могут быть экспортированы как изображения GeoTIFF и PNG (<http://odnature.naturalsciences.be/remsem/software-and-data/acolite>).

Для сопоставления результатов подспутниковых измерений и количественных данных, полученных с помощью обработки спутниковых данных, был реализован достаточно простой алгоритм на языке программирования Python с использованием стандартных библиотек NetCDF Python. Для каждой точки подспутниковых измерений проводится поиск близкой точки по трёхмерному массиву восстановленных спутниковых данных с точностью $1e^{-3}$. Полученный набор значений усреднялся и экспортировался в виде таблицы с соответствующим ему измерением *in situ*.

Для определения мутности и концентрации взвешенного вещества мы использовали два алгоритма, разработанные группой исследователей под руководством доктора Bouchra Nechad и подробно описанные в публикации [Nechad et al., 2009, 2010, 2015], ниже они упоминаются как Nechad 2009 и Nechad 2015. А также был использован алгоритм, предложенный в работе [Dogliotti et al., 2015] (ниже упоминается как Dogliotti), предназначенный для сильно мутных вод. Внешний вид интерфейса программного комплекса ACOLITE представлен на Рисунке 9.

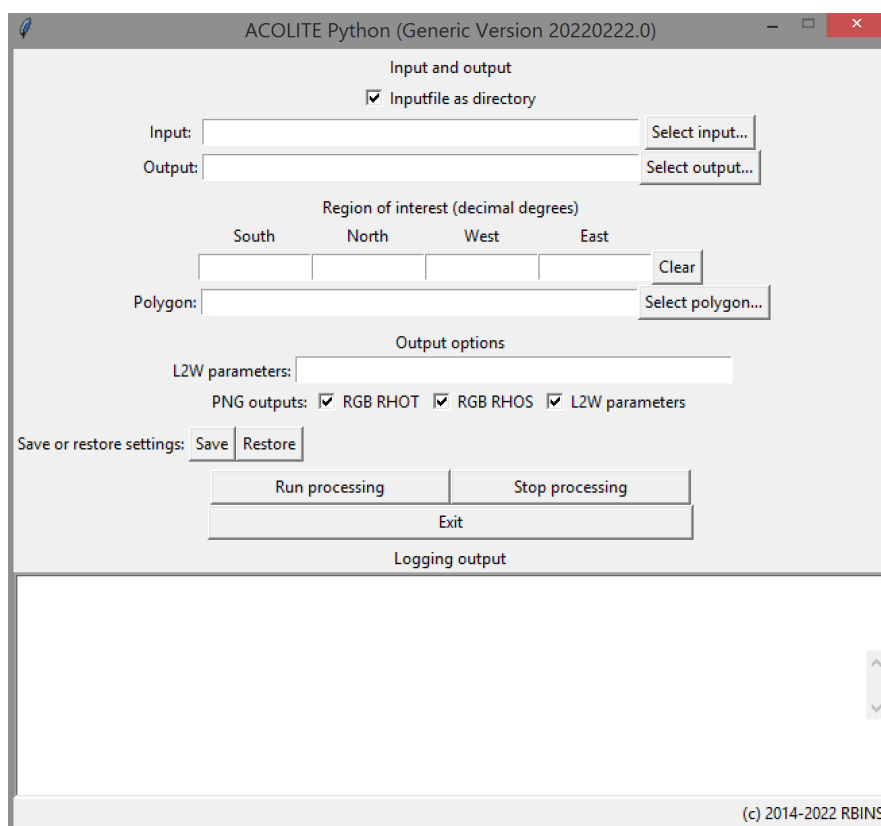


Рисунок 9 — Скриншот общедоступной бета-версии Generic ACOLITE Python (февраль 2022 г.), реализованной для системы Windows (<https://github.com/acolite/acolite>)

Были использованы архивы данных дистанционного зондирования, расположенные на глобальных порталах <https://earthexplorer.usgs.gov/> и <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>. Исходные спутниковые данные свободно доступны в квазиоперативном режиме зачастую в день пролёта спутника.

Для всех обработанных спутниковых данных были построены изображения в формате в квазиестественных цветах, синтезированных на основе композиции трёх каналов RGB — красного (R), зелёного (G) и голубого (B), с максимальным разрешением к исходному разрешению прибора (10 м). TCI не показывают численные значения оптической характеристики, но отображают её градиенты в привычном для человеческого глаза виде, а также используются для визуализации дополнительной информации, такой как местоположение станций, траектория движения судна, суточное смещение границы плюма и прочее.

Анализ массива архивных спутниковых данных и формирование сводных карт поверхностных проявлений выноса из Калининградского залива и речных плюмов Терека и Сулака проводились с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru/>) с помощью инструментария информационной системы See the Sea (STS, <http://ocean.geosmis.ru>) [Лупян и др., 2019]. Основным назначением системы является обеспечение исследователей возможностями доступа и инструментами

анализа информации, полученной на основе данных спутниковых наблюдений (как оперативных, так и из накопленных архивов), для изучения различных процессов, происходящих в океане и атмосфере над ним. Специализированная подсистема описания обнаруженных явлений позволяет накапливать, объединять и систематизировать знания, полученные в результате анализа спутниковых данных. Для описания явлений, которые могут быть обнаружены на морской поверхности, создан таксономический классификатор [Лаврова и др., 2019a]. Ещё одним рабочим инструментом в информационной системе STS является внедрённая база натурных подспутниковых измерений, позволяющая в режиме online проводить верификацию данных дистанционного зондирования измерениями *in situ* [Kniazev et al., 2021]. Достаточно подробно основные возможности системы описаны, в частности, в работах [Лупян и др., 2012; Loupian et al., 2018].

2.6 Методика восстановления поля мутности на основе натурных и дистанционных методов исследования

Как уже было сказано ранее, в последнее время дистанционные спутниковые методы постепенно выходят на лидирующие позиции. Это связано в первую очередь с совершенствованием приборов дистанционного зондирования, как оптического, так и микроволнового электромагнитного спектра. В силу своих преимуществ над другими методами (доступность, рентабельность, объективность, повторяемость, пространственный охват), спутниковый мониторинг всё чаще используется как вспомогательный инструмент исследований или даже как основной, вытесняя дорогостоящие экспедиционные измерения.

В связи с этим, множество работ посвящено верификации спутниковых данных с помощью подспутниковых натурных измерений. Задачи интерпретации спутниковых снимков и возможность замещения *in situ* измерений во всевозможных областях океанологии до сих пор остаются актуальными.

Речной плум на спутниковых цветосинтезированных изображениях хорошо виден за счёт контрастных различий мутных речных вод и условно «чистых» морских вод, окружающих его. Параметр, характеризующий уменьшение прозрачности воды в связи с наличием органического и неорганического взвешенного вещества, называется мутность морской воды. Существует несколько методов определения мутности морской воды, имеющих различные физические основы, различные единицы измерения, но характеризующие один и тот же показатель. В данной работе мы использовали: весовой метод, фотометрический метод и данные дистанционного зондирования (Рисунок 10).

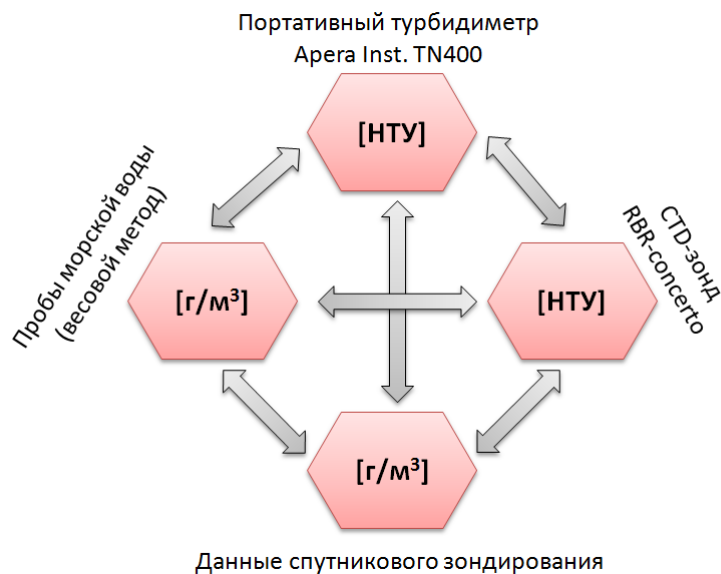


Рисунок 10 — Блок-схема, иллюстрирующая постановку одной из задач диссертационной работы

Весовой метод (или гравиметрический анализ) — наиболее классический, общепринятый метод измерения количества взвешенных веществ, заключающийся в определении массы осадка в объеме воды и расчёте весовой мутности воды в граммах на литр или граммах на метр кубический. Одновременно он является как наиболее трудоёмким, так и наиболее точным. В последнее время, широкое распространение получил другой метод натуральных измерений — фотометрический — это косвенный оптический метод оценки содержания взвеси в морской воде за счет измерения отражённого светового сигнала от присутствующих в водной толще взвешенных частиц (в английской литературе принцип действия этого метода также называют “90 degree scattering” — требуется, чтобы фотодетектор в измерителе был размещён под углом 90° от источника освещения). Для оценки оптической мутности морской воды используют нефелометрические единицы мутности — НТУ (англ. NTU, Nephelometric Turbidity Unit) и ФНУ (англ. FNU, Formazine Nephelometric Unit). Принято считать, что количественно эти единицы равны между собой (в соответствии с международным стандартом ISO 7027). Но при этом есть некоторые специфические различия. В частности, НТУ являются более точным, более распространённым и имеет более широкополосный диапазон излучателя (длины волн от 400 до 880 нм), в то время как измерители мутности в единицах ФНУ имеют только монохромный/инфракрасный выход.

С недавних пор, стало возможным, используя спутниковые сканеры цвета, получать информацию о концентрации взвешенного вещества на основе данных дистанционного зондирования. Цветовые сканеры определяют спектральные свойства радиации, восходящей с водной поверхности, которая несёт информацию об оптических характеристиках

поверхностного слоя океана. Мощность этого «столба» морской воды может быть разной (от десятков сантиметров до десятков метров) и зависит от многих характеристик (освещённости, угла наклона солнечных лучей, концентрации взвеси). Это необходимо учитывать при сравнении контактных измерений (в ограниченном объёме на определённой глубине измерения) со спутниковыми данными (значения яркости излучения на определённых спутниковых каналах в некотором интеграле по глубине). В мутных прибрежных водах мощность этого слоя значительно меньше, чем в водах открытого океана. Рекорд глубины видимости диска Секки был установлен в центральной части южного субтропического круговорота в Тихом океане (к северо-западу от острова Раротонга), где зарегистрировано значение Z_0 («относительная прозрачность» — глубина видимости белого диска) — 67 м [Оптика..., 1983].

Восстановленные по спутниковым данным на основе стандартных алгоритмов значения концентрации полного взвешенного вещества TSM (англ. Total Suspended Matter) измеряются в граммах на метр кубический. Не существует стандартного преобразования между единицами мутности НТУ, ФНУ и количественными измерениями концентрации взвешенного вещества в граммах на метр кубический. Для каждого отдельного района, обладающего уникальным минеральным составом частиц, необходимо проводить собственные исследования для того, чтобы описать эту модель пересчёта.

Поэтому одна из частей диссертационной работы будет посвящена детальному анализу разных типов данных о концентрации взвешенного вещества в северо-восточной части Чёрного море в районе выноса реки Мзымты. А именно, ниже будут представлены: результаты попарного корреляционного анализа разных типов данных, результаты рентгенофазового анализа морских проб, описана связь минерального состава проб и оптической величины мутности, будет приведён сравнительный анализ различных алгоритмов по восстановлению поля концентрации взвешенного вещества методом дистанционного зондирования, рассмотрена достоверность этих данных и проведена верификация спутниковых данных натурными измерениями.

2.7 Выводы к главе 2

В главе 2 представлено описание приборов, используемых для проведения натурных измерений, а также перечислено всё специализированное программное обеспечение, применённое для обработки измерений *in situ*. Подробно описана методика лабораторных исследований морских проб воды и методика обработки спутниковых данных, используемая в диссертационной работе. Приведено описание всего массива натурных и спутниковых данных и отдельно представлены результаты анализа особенностей восстановления полей мутности морской воды и концентрации взвешенного вещества. В результате чего описана

методика восстановления поля мутности морской воды на основе натурных и дистанционных методов исследований, включающая в себя: попарный корреляционный анализ разных типов данных, рентгенофазовый анализ морских проб, установление связи между минеральным составом проб воды и оптической величиной мутности, сравнительный анализ различных спутниковых алгоритмов по восстановлению поля концентрации взвешенного вещества в условиях разной степени замутнённости поверхностных вод, анализ достоверность этих данных и проведение верификации спутниковых данных натурными измерениями.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОД КАЛИНИНГРАДСКОГО ЗАЛИВА ЧЕРЕЗ БАЛТИЙСКИЙ ПРОЛИВ В АКВАТОРИИ ГДАНЬСКОГО ЗАЛИВА

3.1 Основные физико-географические особенности района исследования в юго-восточной части Балтийского моря

3.1.1 Балтийское море

Балтийское море лежит между параллелями $65^{\circ}56'$ и $54^{\circ}46'$ с. ш. и меридианами $9^{\circ}57'$ и $30^{\circ}00'$ в. д. и глубоко вреzano в северо-западную часть Евразийского материка. Оно почти со всех сторон окружено сушей и лишь в юго-западной части через датские проливы и далее через проливы Каттегат и Скагеррак соединяется с Северным морем Атлантического океана. Балтийское море относится к типу внутренних морей. Балтийское море имеет площадь 419 тыс. км², объём воды 21,5 тыс. км³, среднюю глубину 51 м и наибольшую глубину 470 м (Ландсортская котловина-западная часть Балтийского моря, у берегов Швеции, недалеко от Стокгольма). В Ботническом заливе максимальная глубина — 293 м, в Готландской котловине — 249 м. На севере берега скалистые, преимущественно шхерного и фьордового типа, на юге и юго-востоке — низменные, песчаные, лагунного типа. Длина изрезанной береговой линии составляет 8000 км. Балтийское море характеризуется наличием многочисленных заливов и островов, наиболее крупные из них: Готланд, Эланд, Сааремаа, Рюген, Хийумаа и др. [Доронин, 1986]. Небольшие глубины моря свидетельствуют о том, что оно целиком лежит в пределах материковой отмели. В Балтийское море впадает около 250 крупных и малых рек с суммарным годовым стоком примерно 433 км³ воды, что соответствует 2,1 % от общего объёма моря. Наибольшее количество воды приносят за год Нева (83,5 км³), Висла (30,4 км³), Неман (20,8 км³), Даугава (19,7 км³) и некоторые другие реки [Микульский, 1974].

Гидрологические условия. Неодинаковый в течение года и от места к месту радиационный прогрев поверхности моря обуславливает сезонные различия величин поверхностной температуры воды и их пространственного распределения. Летом понижение температуры воды (14–17 °C) у западных берегов в центральном и южном районах моря объясняется преобладанием западных ветров, сгоняющих поверхностные слои воды от западных берегов, на место этих слоёв поднимаются более холодные глубинные воды. Кроме того, вдоль шведских берегов на юг проходит холодное течение из Ботнического залива (9–13 °C). В целом в летний период, поверхностный слой может прогреваться до 18–20 °C. Обильный речной сток и затруднённый водообмен определяет низкую поверхностную солёность Балтийского моря: 7–8 епс (единицы практической солёности, англ. practical salinity

unit — стандартная мера солёности морской воды), что примерно в четыре раза меньше солёности Мирового океана. Осенне-зимнему сезону свойственно некоторое повышение солёности верхних слоёв вследствие сокращения речного стока и осолонения при льдообразовании. Почти для всего моря характерно значительное увеличение солёности от поверхности ко дну (10–21 ‰). Поступление североморских вод в Балтийское море влечёт за собой повышение или понижение (при затруднении водообмена) солёности глубинных вод в море. Вертикальное распределение океанологических характеристик Балтийского моря происходит в условиях двухслойной структуры моря: стационарный пикноклин разделяет толщу на верхний (0–60–70 м) и нижний (70 м – до дна) слои. На протяжении весенне-летнего сезона в Балтийском море существует «двойной» плотностный скачок — временный верхний и постоянный нижний. Это — одна из специфических черт гидрологической структуры Балтики. В заливах и в мелководных районах прослеживается только верхний слой скачка плотности. При малом количестве втекающих в море солёных вод на больших глубинах впадин и котловин создаются застойные явления вплоть до образования сероводорода. [Добровольский, Залогин, 1982].

Горизонтальная циркуляция балтийских вод. Поверхностная циркуляция вод Балтийского моря имеет, в общем, циклонический характер (Рисунок 11). Постоянное течение формируется в северной части моря в результате слияния вод, выходящих из Ботнического и Финского заливов. Основное течение вдоль шведских берегов направлено на юго-запад. Огибая с двух сторон Борнхольм, оно направляется через датские проливы в Северное море. У южного берега течение направлено на восток. Далее огибая польские берега, после Гданьского залива, направляется на север и замыкается практически в кольцевое течение. В центральной части моря отмечается наличие антициклонических вихревых структур. Скорость постоянных течений Балтийского моря очень невелика и равна примерно 3–4 см/с, увеличиваясь иногда до 10–15 см/с. В общей картине перемещения поверхностных вод преобладают ветровые (дрейфовые) течения. Они особенно интенсивны осенью и зимой. Поэтому в зависимости от ветрового поля, картина поверхностных течений может меняться, и стоит отметить, что достаточно динамично. Глубинная циркуляция также имеет циклонический характер и в значительной степени зависит от поступления солёных вод Северного моря. [Залогин, Косарев, 1999].

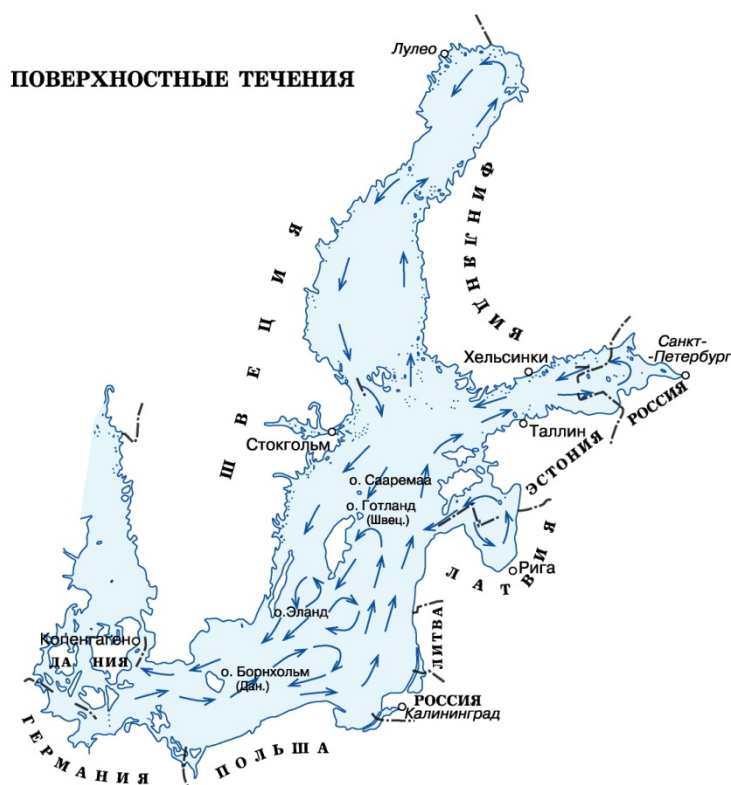


Рисунок 11 — Карта-схема течений в Балтийском море
(https://geographyofrussia.com/wp-content/uploads/2015/01/247_3.jpg)

Вследствие большой степени изоляции от Мирового океана *приливы в Балтийском море* незначительные (от 0,04 до 0,1 м) и имеют полусуточные и суточные ритмы. При этом стгонно-нагонные колебания уровня Балтийского моря достигают значительных величин — от 1,5 до 3 м, вызывая наводнения в закрытых прибрежных лагунах (например, в Невской губе). Совместное действие ветра и резкого изменения атмосферного давления (при прохождении циклонов) зачастую вызывают сейшевые колебания уровенной поверхности (до 4 м) с периодом 24–26 ч [Доронин, 1986].

3.1.2 Южная часть Балтийского моря. Гданьский залив

Гданьский залив расположен в южной части Балтийского моря (Рисунок 12). Его границу можно провести линией между мысом Розеве (полуостров Хель) и мысом Таран (Самбийский полуостров). Ширина залива у входа 107 км, вдаётся в материк на 74 км. Глубина до 115 м в центральной части (средняя глубина 70 м). Воды залива испытывают сильное влияние речного стока Вислы (самая крупная река в Польше, площадь бассейна которой составляет 198,5 тыс. км², а расход воды 1080 м³/с) и выноса из Калининградского/Вислинского залива [Лаврова и др., 2011]. Характер течений в Гданьском заливе, как и во всём Балтийском море, определяется в первую очередь ветровым

воздействием, и оно достаточно переменчиво во времени. А также свой вклад вносит очертание береговой линии. Как правило, в мелководной прибрежной зоне, скорость вдольберегового течения, направленного на восток, не превосходит 50 см/с. Но при сильных северо-восточных ветрах направление может измениться на противоположное. В Гданьском заливе наблюдаются также и плотностные течения, вызванные неоднородностью плотности воды (в первую очередь за счёт пресного стока реки Вислы). Гданьский залив разделён на две части границей двух государств — Польши и России. На берегу Гданьского залива расположены крупные города-порты Гдыня, Гданьск, Балтийск (главная база Балтийского флота России), здесь находится много транспортно-логистических узлов для перевозки грузов с помощью морских судов. [Гидрометеорология..., 1994].



Рисунок 12 — Карта-схема Гданьского залива. Структура глубин Калининградского/Вислинского залива [Каталог...Костяной, 2015]

Калининградский залив (Вислинский залив в Польше) отделен от Гданьского залива песчаной Балтийской косой (60 км длиной) и соединён через узкий искусственный Балтийский пролив (на российских картах пролив указан без названия, для его обозначения при мореплавании используется термин «Входные ворота Калининградского морского канала»), шириной 400 м, длиной 2 км и со средней глубиной 8–9 м (существует локальная депрессия, на выходе из пролива, с глубинами до 25–29 м) [Гидрометеорологический..., 1971] (см. Рисунок 12). От Балтийского пролива до устья реки Преголи, вдоль северного побережья, проходит Калининградский морской канал, частично защищённый искусственно

насыпанными островами, обеспечивающий возможность прохода судов (с осадкой до 8 м) в порт Калининграда [Довыденко, 2011]. Средняя глубина канала 10–12 м, все объекты портовой инфраструктуры расположены вдоль северного берега канала, участки берега между ними пологие и заросшие тростником.

Колебания уровня воды в заливе зависят от направления ветра. При сильных северо-западных или юго-восточных ветрах наблюдается значительное повышение уровня воды, соответственно в южной или северо-восточной частях залива. Уровень воды в этих районах может подниматься на 1,2 м и на 0,7 м в пос. Прегольском (Россия) [Chubarenko, Margonski, 2008]. Такие колебания создают проблемы для движения судов на заливе [Дзядюшко, Зорина, 1971]. Течения в Калининградском заливе имеют сложный и быстро меняющийся характер, следуя местному воздействию ветра и водообмену с Балтийским морем. Возможно кратковременное вихреобразование на входе в залив. В заливе скорости поверхностных течений могут достигать величин 0,3–0,5 м/с, в то время как в Балтийском проливе могут развиваться скорости даже до 2–2,5 м/с [Ельцева, 1971]. Самой большой из впадающих в залив рек является река Преголя (самая длинная река Калининградской области — 123 км), в устье которой расположен порт Калининград. Площадь водосбора Преголи — 15 500 км². Средний расход воды ~90 м³/с.

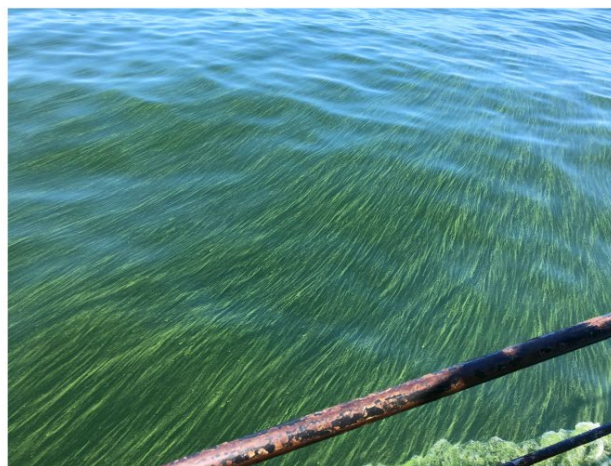
Гидродинамические особенности района исследования. Как известно, Балтийское море представляет собой одну из акваторий Мирового океана, чувствительных к глобальным изменениям климата. Так, в работе [Стонт и др., 2020] освещены особенности и приведены оценки тенденции изменения основных гидродинамических условий в прибрежной части Юго-Восточной Балтики за климатический период с 2005 по 2019 г. Для поля ветра над Юго-Восточной частью Балтийского моря характерно преобладание юго-западных и западных румбов, при этом увеличение скорости ветра наблюдается в осенне-зимний период года. Основная мода приходится на скорости 6–10 м/с. За последние 15 лет количество штормов медленно увеличивается: линейное приращение по тренду +2 шторма (ветер со скоростью ≥ 15 м/с и продолжительностью не менее 6 ч) за период. Среднегодовая температура воздуха (T_a) возросла на 1,6 °С по сравнению с серединой XX в. (T_a в районе исследования составляет $8,9 \pm 0,6$ °С). Максимальная T_a наблюдалась в 2019 г. — 9,9 °С. Среднегодовая температура поверхностного слоя акватории исследования также медленно повышается со скоростью 0,01 °С/год и равна $10,3 \pm 0,3$ °С.

Процессы эвтрофикации балтийских вод. Повышение температуры воздуха и поверхностной температуры воды приводит к частым явлениям эвтрофикации Балтийского моря — насыщения водоёмов биогенными элементами, ростом биологической продуктивности (биомассы фитопланктона), в результате чего отмечается массовое развитие цианобактерий [Гоголев и др., 2020б] (Рисунок 13). Три разновидности фитопланктона

доминируют в Калининградском заливе: цианобактерии (более 80 % от общей численности), зелёные морские водоросли и диатомовые водоросли. Воды залива через Балтийский пролив попадают в Гданьский залив и при определённых гидрометеороусловиях могут распространяться на большие расстояния [Лаврова и др., 2011, 2014]. Как показывают наши многолетние спутниковые наблюдения, вынос из залива может формировать либо плум, аналогичный речному, либо хорошо сформированную струю, которая может распространяться, как в юго-западном, так и в северо-восточном направлении вдоль морского побережья. В любом случае, за счёт наличия в приповерхностном слое большого количества органического вещества (цианобактерий) становится возможным проследить трансформацию этих процессов, используя спутниковые сканеры цвета [Лаврова и др., 2018].



а



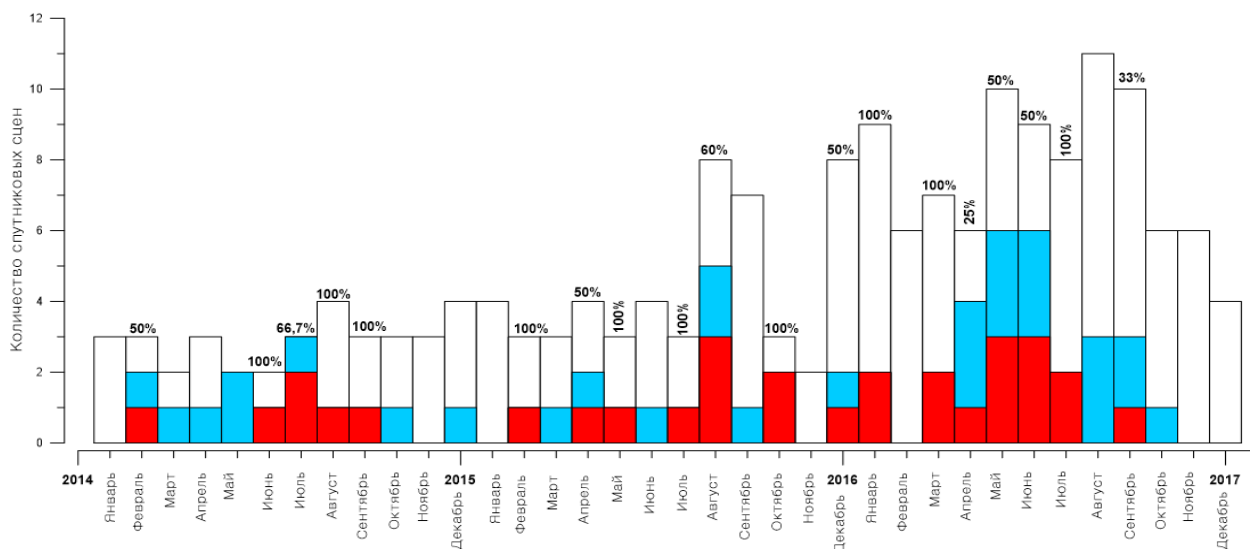
б

Рисунок 13 — Контрастные оптические различия морских вод и вод Калининградского залива (а); интенсивное цветение водорослей в прибрежной зоне Балтийского моря в июле 2021 г. (б). Фотографии автора Назировой К.Р.

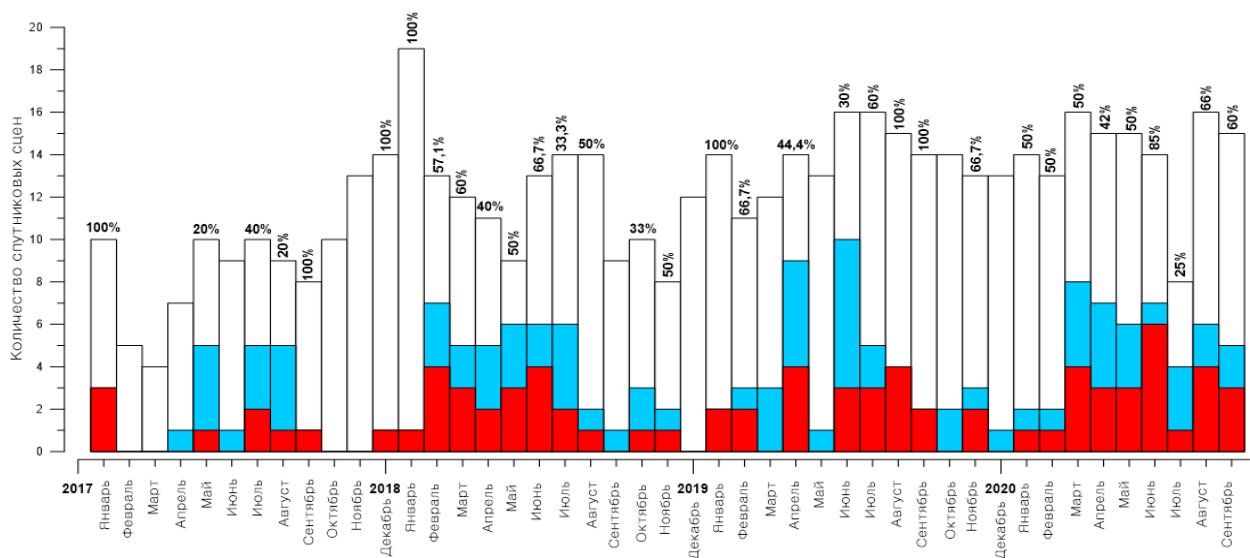
3.2 Результаты спутникового мониторинга выноса из Калининградского залива

Для исследуемого района, за период с января 2014 г. по декабрь 2020 г., была проанализирована 762 спутниковая сцена высокого пространственного разрешения [Назирова, Краюшкин, 2021]. Основные данные были получены со спутника Landsat-8 (OLI) начиная с 2014 г. и спутников Sentinel-2A, -2B (MSI) с 2015 г. Пространственное разрешение получаемых изображений со спутников Landsat-8 и Sentinel-2 — 30 и 10 м соответственно. На 539 спутниковых сценах район исследования покрыт сплошной облачностью, другими словами, практически 71 % спутниковых данных непригодны для мониторинга выноса из Калининградского залива сканерами цвета. Оставшиеся 224 безоблачные сцены неравномерно распределены в течение всего исследуемого периода (Рисунок 14). Например,

можно отметить небольшие периоды в разные годы, когда на всех спутниковых данных район исследования полностью покрыт облачностью, т.е. образуются пробелы в данных (осенне-зимний период 2015–2017 гг.). В среднем наилучший показатель безоблачных дней, 50–60 % от общего количества спутниковых данных, наблюдается в весенне-летний период: с апреля по июль.



а



б

Рисунок 14 — Гистограмма распределения спутниковых данных в период с января 2014 г. по декабрь 2016 г. (а) и с января 2017 г. по сентябрь 2020 г. (б) над районом исследования в юго-восточной части Балтийского моря. Цветом отмечены спутниковые данные: белым — полностью покрыты облачностью; голубым — безоблачные сцены; красным — сцены, на которых вынос проявляется в виде плюма. Сверху над столбцами указано количество спутниковых сцен с видимым проявлением выноса из залива (в %) относительно количества безоблачных спутниковых изображений

Было получено, что только на половине безоблачных сцен (~114 сцен) вынос из залива проявляется в виде плюма на спутниковых изображениях в квазиестественных цветах. При этом наличие плюма фиксируется на протяжении всего года (с января по декабрь) в той или иной степени. Примечательно, что месяцы, когда зафиксировано наибольшее количество спутниковых сцен с проявлением плюма (>10 случаев в месяц) — примерно совпадает со статистикой наиболее безоблачных сцен: апрель – август. Причиной этого, скорее всего, является то, что этот период считается наиболее благоприятным для развития обильного цветения сине-зелёных водорослей в замкнутых заливах, за счёт которых вынос из канала проявляется наиболее ярко. В остальные месяцы трассерами могут являться либо битый лёд, выносимый из залива (февраль – март), либо сами взмученные воды залива (Рисунок 15).

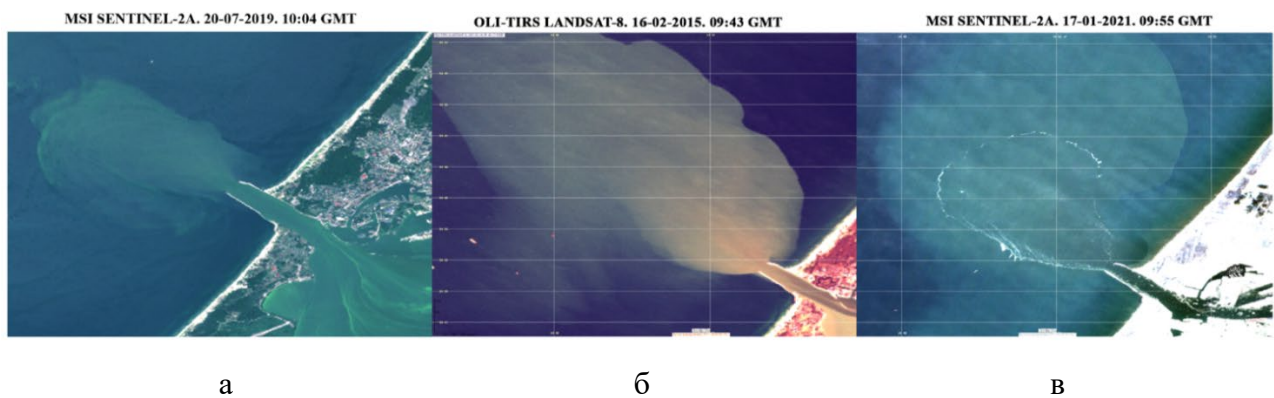


Рисунок 15 — Фрагменты спутниковых изображений как иллюстрация проявления выноса из Калининградского залива за счёт цветения водорослей (а), мутных потоков (б) и битого льда (в)

В целом стоит отметить плавное увеличение общего количества спутниковой информации. Если в 2014 г., над исследуемым районом было получено 35 спутниковых сцен за весь год, то в 2019 году их количество увеличилось более чем в 4,5 раза и уже составило 165 сцен (за счёт запуска спутников Sentinel-2A в июне 2015 г. и Sentinel-2B в марте 2017 г.).

Анализ межгодовой изменчивости спутниковых изображений, содержащих проявления плюмов показал, что начиная с 2018 г., их количество тоже увеличивается (Рисунок 16). В 2014 г. было выделено только 6 сцен с поверхностным проявлением выноса из залива. А в 2020 г. был зафиксирован 31 случай. Причиной этого роста, скорее всего, помимо общего роста спутниковой информации, являлись метеорологические условия, в частности характер ветрового поля. В 2018, 2019 и 2020 гг., в весенне-летние месяцы, когда было зафиксировано максимальное количество безоблачных дней и максимальное количество случаев проявления плюма, внёвшие весомый вклад в общую статистическую выборку (см. Рисунок 14) — это

июнь 2018 г., август 2019 г., март – апрель 2019 г., июнь 2020 г., август 2020 г. — наблюдались слабые разнонаправленные ветра с редкими порывами С/ССВ румбов (5–10 м/с), чередующиеся с периодами штилевых условий. В другие годы в эти месяцы (2014–2016) наблюдались случаи более устойчивых румбов СЗ/ЗСЗ ветров со средними скоростями 5–10 м/с.

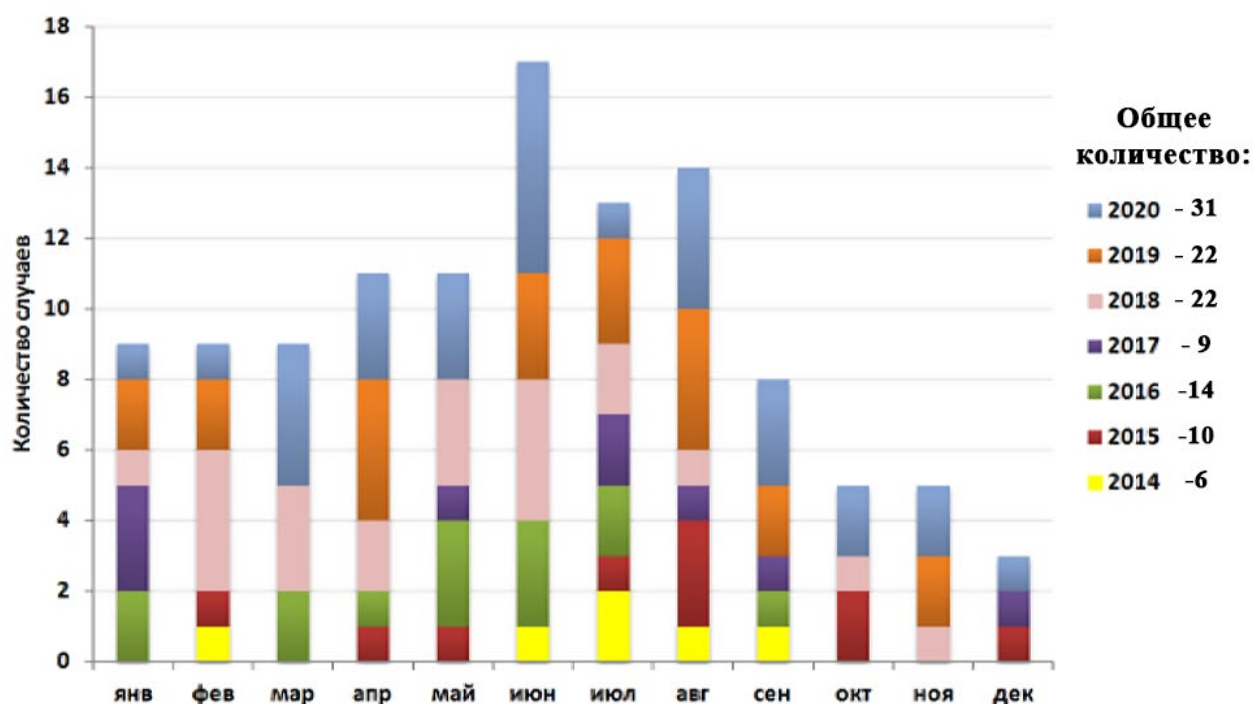


Рисунок 16 — Гистограмма распределения спутниковых данных, на которых проявляется поверхностный плюм по месяцам, для всего периода исследования с января 2014 г. по декабрь 2020 г.

В процентном отношении количество выявляемых случаев поверхностного проявления выноса из залива на оптических изображениях высокого пространственного разрешения, среди безоблачных сцен из года в год примерно одинаковый. Его среднее значение за период с 2014 по 2020 г. составил 49,7 %. Для аномального 2017 г. (причина будет описана ниже) процент спутниковых сцен с поверхностным проявлением плюма был минимальным и составил 40,9 %. В 2020 г. при условии максимумов всех остальных величин этот показатель составил 58,5 %, но в прочем, примерно такой же, как и в 2015 г. (Таблица 6).

Таблица 6 — Количество спутниковых сцен над балтийским полигоном за весь период исследования

Год	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Всего
Общее количество снимков	35	52	92	109	144	165	165	762
Количество безоблачных сцен	14	17	29	22	44	45	53	224
Количество сцен с плюмом	6	10	14	9	22	22	31	114
Доля, %	42,9	58,8	48,3	40,9	50,0	48,9	58,5	50,9

На Рисунке 16 ярко прослеживаются сезонные отличия в повторяемости обнаружения спутниковых данных с поверхностными проявлениями плюма. Максимальное количество случаев наблюдается в летние месяцы (июнь – август) — от 12 до 17 случаев, а минимальное количество в осенне-зимний период (октябрь – декабрь) — не более 3–5 случаев.

Для объяснения межгодовой и сезонной вариативности обнаруженных случаев поверхностного проявления выноса из залива был проанализирован характер изменчивости ветрового поля за каждый месяц для всего периода исследования (с января 2014 г. по ноябрь 2020 г.). Для этого использовался архив метеорологических данных Meteoblue (www.meteoblue.com). Данные были получены для точки с координатами 54,69° с.ш. и 19,78° в.д., расположенной в нескольких милях мористее от створа Балтийского пролива. В Приложении Б представлены розы ветров для каждого месяца. Данные графики подтверждают, что в весенне-летний период (с мая по август) преобладают слабые ветра (≤ 5 м/с) разнонаправленного характера. Максимальные скорости ветра чаще всего встречаются (в не более 8–10% случаев) северо-восточных/восточных румбов от 5 до 10 м/с. В осенне-зимний период скорости ветра значительно выше, увеличивается количество случаев, когда они превышают 10–15 м/с и более 15 м/с. Господствующее направление ветра для данного периода это румбы юго-западной/западной и юго-восточной/восточной направленности. Также был выявлен нетипичный характер ветрового режима для весенне-летнего периода (с мая по август) для 2017 г., объясняющий достаточно большой процент облачных дней и небольшое количество случаев с поверхностным проявлением плюма для данного времени года (см. гистограмму на Рисунке 14 выше). В этот период отмечалось большое количество повторяемости случаев с северо-восточным, западным и северо-западным направлением ветра. При этом измеренные скорости ветра лежали в диапазоне 10–15 м/с.

Каждый вынос из Калининградского залива в период с 2014 по 2020 г. был картирован (Рисунок 17) в информационной системе See the Sea, разработанной в Институте космических исследований РАН [Лаврова и др., 2019а; Лупян и др., 2019]. Кроме этого, были рассчитаны

суммарные площади распространения плумов и площади каждого плума в отдельности (Приложение В: Таблица В.1, Рисунки В.1 и В.2).

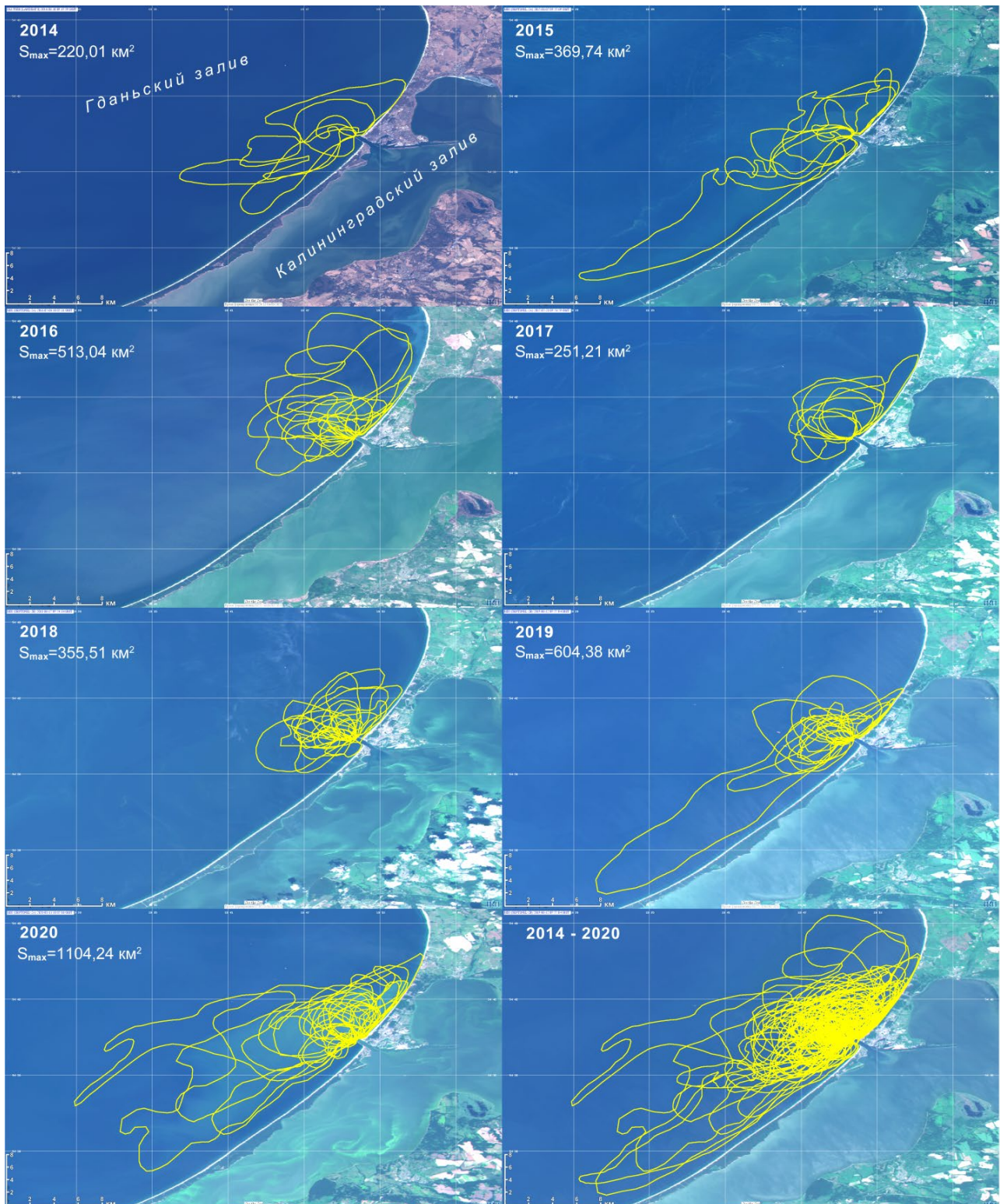


Рисунок 17 — Сводные карты поверхностных проявлений выноса из Калининградского залива в акваторию Гданьского залива, составленные на основе спутниковых данных за каждый год для периода исследования с 2014 г. по 2020 г.

Размеры, площадь распространения, форма и направление распространения плюма существенно изменяются как от сезона к сезону, так и от года к году. Наибольшую суммарную площадь распространения вынос имел в 2020 г. — 1104,24 км², а наименьшую в 2014 и в 2017 гг. — 220 и 251 км² соответственно. За весь период исследований, максимальная площадь выноса единовременно составила 220 км² (13.08.2020). При анализе полученных данных было установлено, что статистически наибольшая повторяемость площади плюмов свойственна для случаев при $S = 15\text{--}25$ км² (Рисунок 18). В целом для большего числа случаев характерны площади плюмов не превышающие 25 км². Случаи со значениями площадей плюма ≥ 100 км² являются редкими.

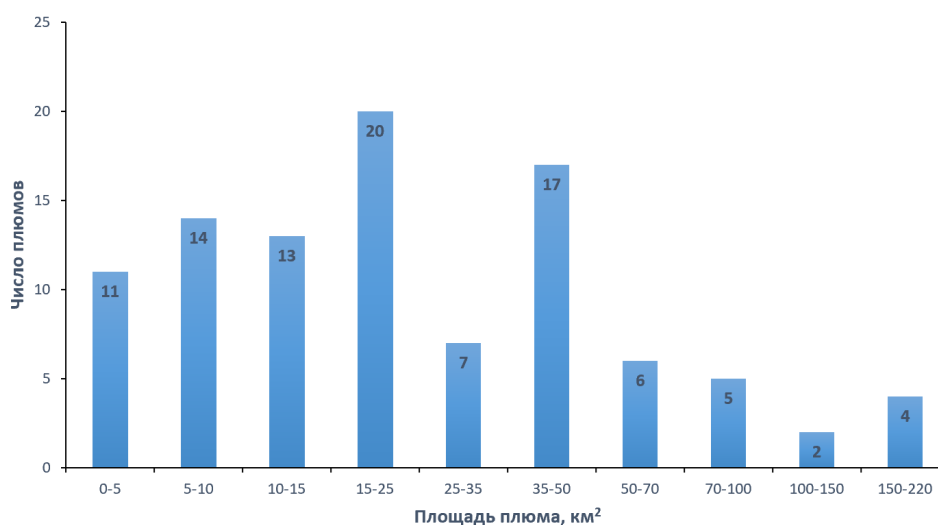


Рисунок 18 — Статистическое распределение значений площади плюма за весь период спутникового мониторинга с 2014 по 2020 г.

На основе спутниковых наблюдений видимого диапазона было выявлено, что в более чем 80 % случаях вынос сконцентрирован в прибрежной зоне Балтийского пролива, не превышающей в размерах 10 км от береговой зоны и не более 8 км на юго-запад и северо-восток от створа Балтийского пролива.

Было отмечено, что вынос из залива фиксируется на спутниковых изображениях на протяжении всего года, а также что площадь плюмов в любое время года в течение нескольких дней может изменяться существенно (для примера, 03.06.2016 — 130,99 км², а 05.06.2016 — 10,6 км²) (Рисунок 19). В среднем в летний период вынос из канала проявляется наиболее ярко и имеет большие площади распространения по сравнению с другими сезонами.

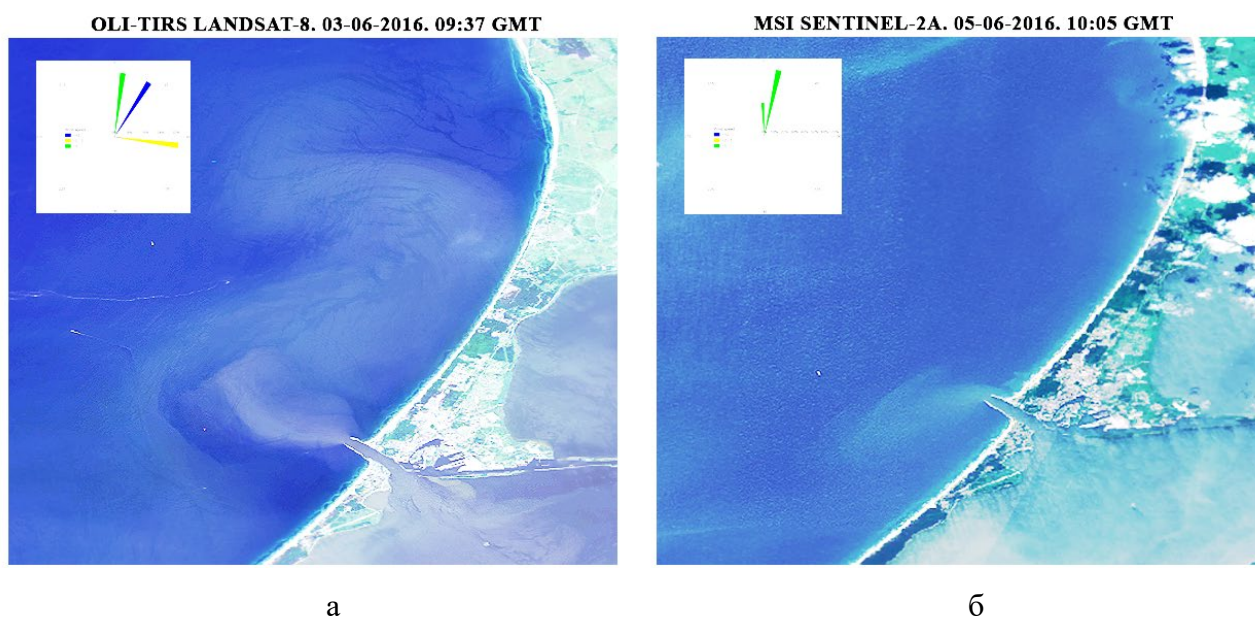


Рисунок 19 — Фрагменты спутниковых изображений за 3 июня 2016 г. (а) и 5 июня 2016 г. (б). В левом верхнем углу представлена среднесуточная роза ветров для конкретного дня

В Таблице 7 представлен список наиболее крупных площадей плюма, обнаруженных за весь период исследований. Совместный анализ данных спутникового зондирования и данных о полях ветра показал существенную зависимость формы и размера плюма от ветрового режима. Было получено, что максимальные площади выноса зафиксированы в летние месяцы при преобладании слабых северных/северо-восточных ветров (Рисунок 20).

Таблица 7 — Максимальные площади выноса из Калининградского залива в период с 2014 по 2020 гг. по оптическим данным высокого пространственного разрешения

№	Дата	Прибор	Направление ветра	Площадь плюма [км ²]
1	13.08.2020	MSI	СВ	219,78
2	04.06.2020	MSI	С	161,66
3	26.08.2019	MSI	В	160,65
4	03.06.2016	OLI	СВ	130,99
5	20.08.2015	OLI	В	130,3
6	01.08.2014	OLI	ЮЗ	98,4
7	21.07.2016	OLI	СЗ	88,55
8	23.05.2016	MSI	В	82,65

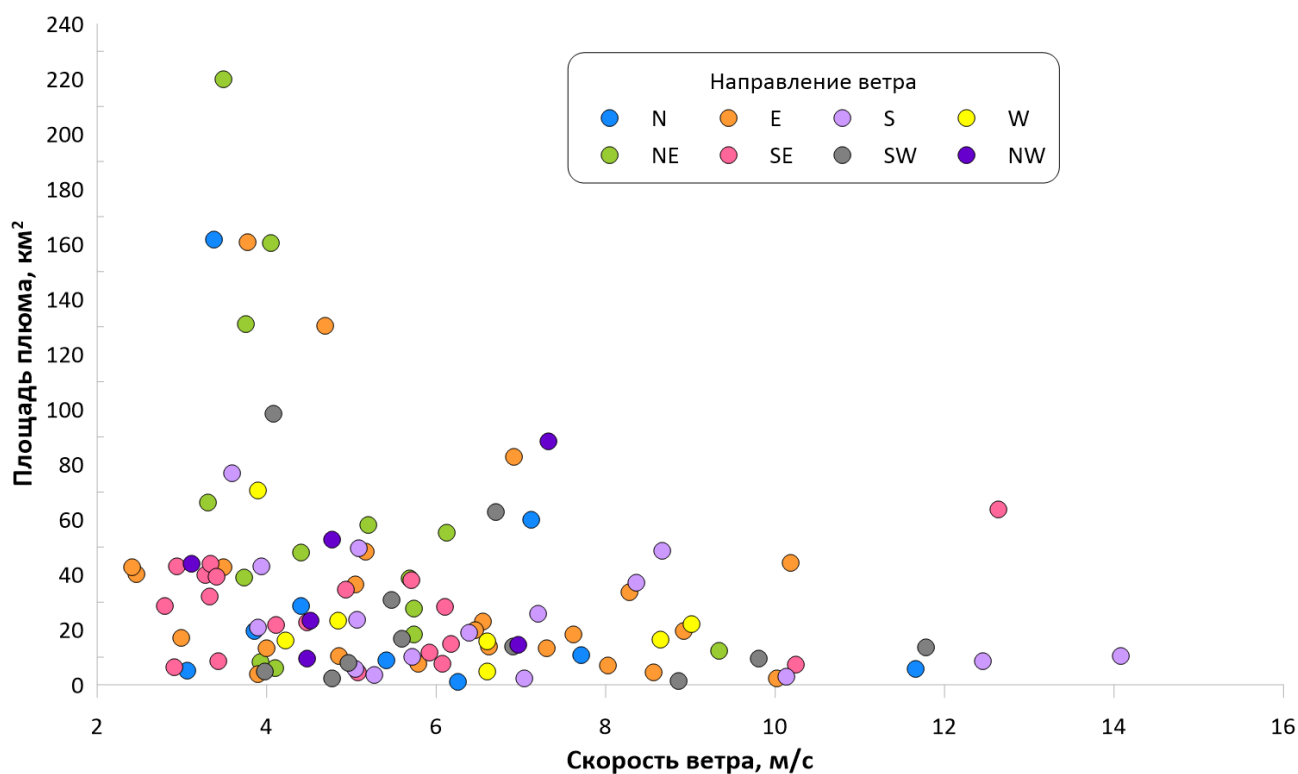


Рисунок 20 — Зависимость площади плюма лагунных вод от скорости ветра при различных его направлениях

Форма и характер распространения плюма в зависимости от ветрового режима.

Водообмен между Гданьским и Калининградским заливами является высокодинамичной системой и в основном находится под влиянием ветрового режима. Помимо выноса Калининградских вод из залива встречаются случаи затока морских вод из Гданьского залива в Калининградский. По повторяемости события оттока превышают события притока примерно на 10 %, к тому же существует асимметрия в распределении длительности событий притока и оттока: продолжительность этих событий от 5–6 до 40–56 ч соответственно, приток длится в среднем около 15,5 ч, а отток чуть дольше — 19,5 ч [Chubarenko, Zakirov, 2021]. Кроме однонаправленных течений (либо выноса вод залива, либо затока морских вод в залив), которые составляют 74,9 % случаев, встречаются двухслойные течения (заток в придонном слое и вынос в приповерхностном) — 13,4 % и двунаправленные — 13,4 % [Chubarenko, Margonski, 2008].

Спутниковый мониторинг показал, что форма и размер плюма может сильно модифицироваться в течение суток. Примеры типовых картин выноса из залива при разных метеорологических условиях продемонстрированы на Рисунке 21.

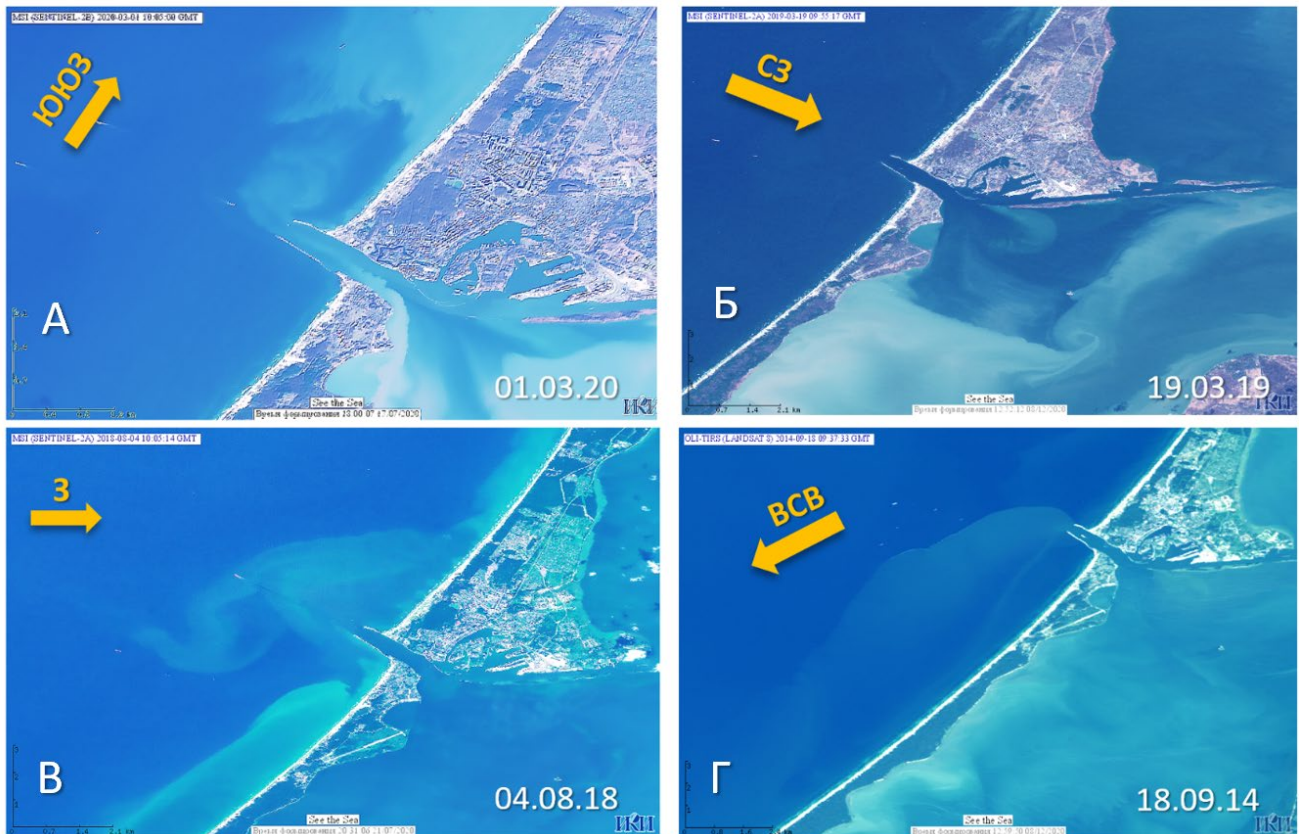


Рисунок 21 — Примеры разных типов выноса из Калининградского залива на фрагментах спутниковых изображений: 1 марта 2020 г. (а); 19 марта 2019 г. (б); 4 августа 2018 г. (в); 18 сентября 2014 г. (г). Жёлтыми стрелками указаны преобладающие направления ветров

Наиболее часто, при западных/юго-юго-западных ветрах, Калининградские воды из залива распространяются в северо-восточном направлении (см. Рисунок 21а), вовлекаясь в систему прибрежных течений. Взвешенные частицы при таких условиях могут распространяться на большие расстояния, вплоть до Самбийского полуострова и дальше за мыс Таран [Краюшкин и др., 2018]. При восточных/северо-восточных/восточно-северо-восточных ветрах вынос распространяется в юго-западном направлении (см. Рисунок 21г). При резких сменах характера ветрового режима, на западной периферии выноса могут образовываться вихревые или грибовидные структуры (см. Рисунок 21в).

Для затоков вод Гданьского залива в Калининградский залив, обнаруженных по данным дистанционного зондирования, характерны сильные устойчивые западные/северо-западные ветра со средними скоростями 8–10 м/с (см. Рисунок 21б). Преимущественно данное явление встречается в весенне-зимний период. Наибольшее количество случаев затока Гданьских морских вод в Калининградский залив отмечалось в марте.

Анализ полученных данных показал, что на форму плюма оказывает влияние как ветер, так и система прибрежных течений. При отсутствии сформированной струи прибрежных течений и слабом ветре ничто не препятствует распространению и «растеканию» выноса. В

таком случае вынос чаще всего имеет куполовидную форму. А при сильном вдольбереговом течении (юго-западного или северо-восточного направления) или при сильных устойчивых ветрах — вынос вытягивается в виде струи, параллельной береговой линии, и направлен либо на юго-запад, либо на северо-восток (см. Рисунок 21г).

Часть результатов из раздела 3.2 опубликованы в работе [Назирова, Краюшкин, 2021].

3.3. Результаты натурных измерений

Первые подспутниковые эксперименты на балтийском полигоне в юго-восточной части Балтийского моря в районе Балтийского пролива были проведены в июле – начале августа 2014 г. [Лаврова и др., 2014]. Выполненные гидрофизические натурные измерения позволили выдвинуть первые гипотезы о закономерностях распространения вод из Калининградского залива под влиянием гидрометеорологических процессов и, задав определённый вектор направления, положили начало многолетним исследованиям данного региона.

Во время первой экспедиции в 2014 г., в условиях безоблачной и малооблачной погоды, в период интенсивного цветения фитопланктона, удалось проследить за развитием, эволюцией и трансформацией факела выноса из Калининградского залива на протяжении более недельного периода на основе спутниковых данных видимого диапазона (Рисунок 22). На эти даты были использованы спутниковые изображения следующих сенсоров: MODIS Terra/Aqua, OLI/TIRS Landsat-8, ETM+ Landsat-7.

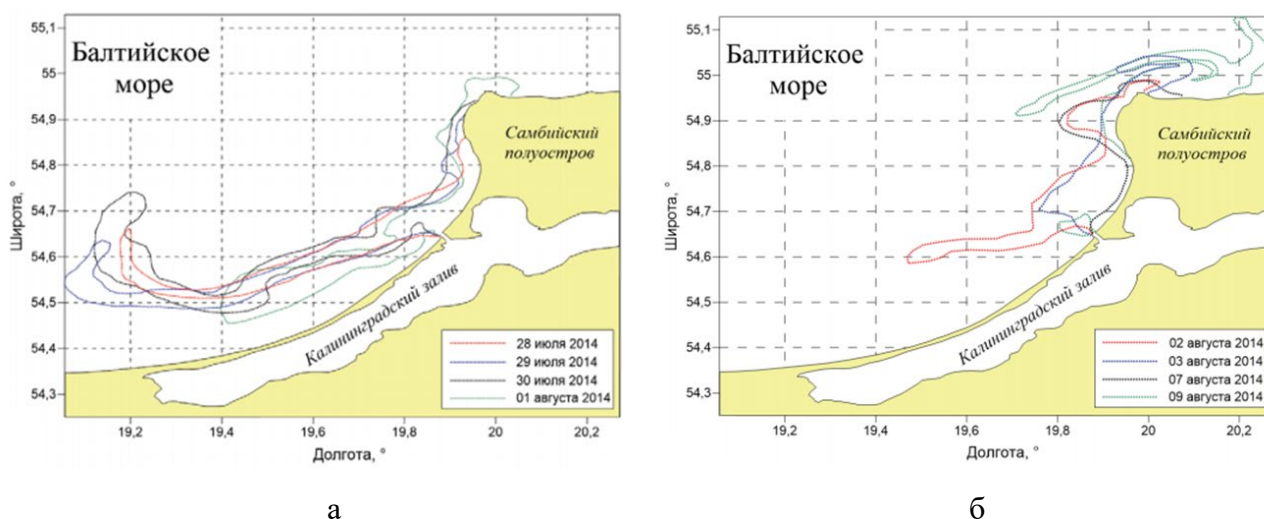


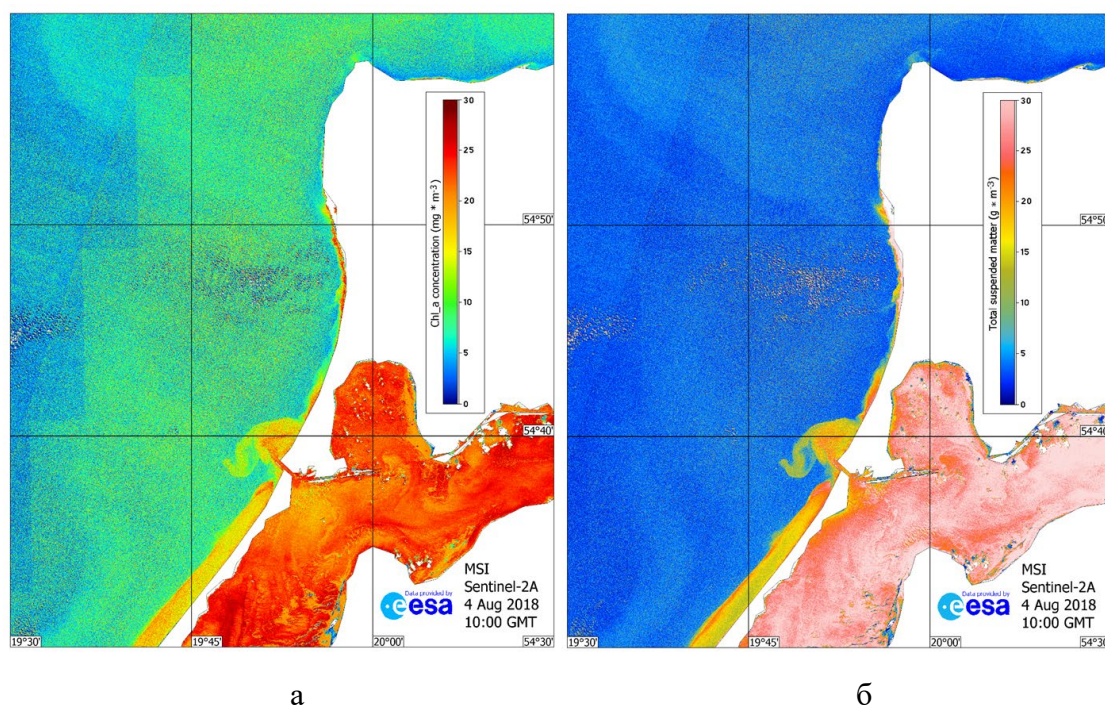
Рисунок 22 — Контуры выноса, восстановленные по спутниковым данным во время натурных измерений в 2014 г.: с 28 июля по 1 августа (а) и с 2 по 9 августа (б)

В результате первых подспутниковых экспериментов были получены следующие выводы:

- потоки, включающие в себя взвешенное органическое и неорганическое вещество, проявили себя как отличные трассеры поверхностных течений и динамических структур;
- положено начало изучению механизма формирования системы прибрежных течений, характерной для этого региона, включающей в себя как струйные вдольбереговые течения, так и вихревые/дипольные структуры, формирующиеся в результате обтекания выступающих мысов материка;
- ветровое воздействие тесно связано с прибрежной динамикой региона и для расчёта прогноза транспорта взвешенных частиц необходим их совместный учёт.

В целом для данного региона были поставлены две крупные задачи: провести исследование основных межгодовых и сезонных морфометрических особенностей выноса из залива (на основе спутниковых данных) и изучить его трёхмерную структуру (на основе натурных измерений).

Результаты исследования трёхмерной структуры выноса. На данных дистанционного зондирования вынос из Калининградского залива хорошо идентифицируется как на изображениях в квазиестественных цветах True Color (каналы 4, 3, 2), так и на картах полного взвешенного вещества TSM и в поле концентрации хлорофилла *a* (Chl-*a*), характеризуясь областями повышенных значений (Рисунок 23). Данный материал позволяет изучать характер изменений, происходящих в поверхностном слое прибрежных областей. Возникли следующие вопросы: Возможно ли, используя натурные гидродинамические приборы, восстановить такую же картину? Будут ли сопоставимы полученные величины со спутниковыми данными? Какова трёхмерная структура выноса и как она изменяется при удалении от береговой черты?



а

б

Рисунок 23 — Карты поверхностного распределения концентрации Chl-a (а) и полного взвешенного вещества (б), восстановленные на основе данных дистанционного зондирования спутника Sentinel-2A (MSI) за 4 августа 2018 г.

Далее будут рассмотрены результаты экспедиционных измерений, выполненных в августе 2018, 2019, 2020 гг. и июле 2021 г.

Будут использованы условные термины для описания морфологических типов плумов (например, факел выноса, куполовидная форма). Общепринятой научной терминологии не существует. Пример классификации плумов представлен в каталоге морфологии плумов, созданном группой учёных ИКИ РАН (http://www.iki.rssi.ru/asp/col_0008/col_0008.htm).

2018 г. 8 августа 2018 г. было выполнено четыре параллельных берегу галса на траверзе г. Балтийска, общей протяжённостью 40 км. Синхронно с измерениями акустического доплеровского измерителя течений ADCP WH 300 Hz было осуществлено 34 CTD-зондирования от поверхности до дна. Площадь области, охваченной измерительной сеткой гидрологических станций, составила 36 км². В Приложении Г представлена Таблица Г.1 со значениями температуры воды, солёности и хлорофилла *a* по данным измерений *in situ* в приповерхностном слое на всех станциях 8 августа 2018 г. В этот период преобладали ветра юго-юго-восточных направлений, со скоростью 6–7 м/с. На основе гидрологической съёмки было выявлено, что 8 августа выток из Калининградского залива представлял из себя небольшой факел выноса, с осью направленной на северо-восток, чему способствовали ветра западных румбов, господствующие в этом районе в предыдущие дни. Также по данным ADCP-профилирования отмечается наличие прижатой вдольбереговой струи течения, проявляющейся за счет увеличения скоростей потока на ближайших к берегу галсах (на

расстоянии 2 и 3 км от береговой черты). Было определено, что площадь сформированного субмезомасштабного плюма примерно составляла 4 км². Минимальные значения концентрации Chl-а в плюме у выхода из пролива — 5,5–6,5 мг/л. Северо-восточнее от канала значения концентрации хлорофилла увеличиваются чуть больше чем в два раза и составляют 14,5 мг/л. Мористее, на дальних точках разреза, значения концентрации хлорофилла уменьшаются до 4,5–3,5 мг/л. Тем самым, градиент данной характеристики составляет более 10 ед. На карте приповерхностного поля солёности видно, что для плюма характерны пониженные значения солёности по сравнению с окружающими его морскими водами. Значения в плюме изменяются в пределах от 5 до 6 епс (Рисунок 24). Измеренные значения солёности для морской воды 8 августа 2018 года составляли 6,7–6,9 епс. Также в плюме отмечались повышенные значения мутности и концентрации Chl-а. Температура приповерхностного слоя наоборот была ниже (23,7 °С) морских вод (24,3 °С).

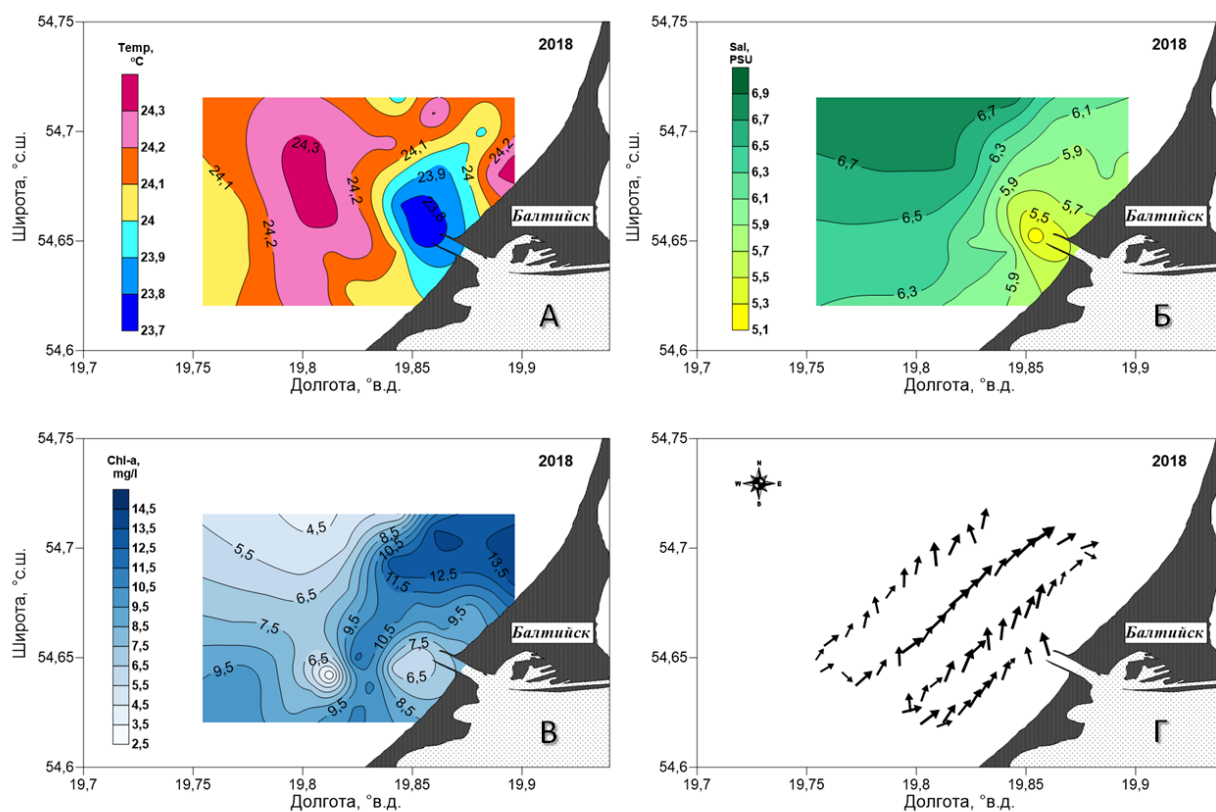


Рисунок 24 — Карты поверхностного распределения температуры (а), солёности (б), концентрации Chl-а (в) и поверхностные течения по данным ADCP (г) за 8 августа 2018 г.

В Приложении Д (Рисунки Д.1–Д.4) представлено распределение температуры, солёности и хлорофилла *a* по глубине на каждом галсе. Вертикальная толщина плюма в среднем составляла 4 м. По характеру распределения изолиний можно сделать вывод, что увеличение солёности происходит равномерно при удалении от берега, воды залива

постепенно смешиваются с морскими. Однако если обратить внимание на поперечные градиенты изохалин правее и левее от канала, можно констатировать, что растекание вод из канала происходит в северо-восточном направлении (то же видно из графика поля температуры).

Во время судовых подспутниковых измерений, 8 августа 2018 г. на траверзе г. Балтийска, в створе Балтийского пролива (в трёх километрах от береговой черты) был запущен дрейфтер с глубиной паруса 1 м. Координаты запуска: $54^{\circ}39,991'$ с.ш. и $19^{\circ}50,622'$ в.д. Траектория движения лагранжевого буя представлена на Рисунке 25. Чуть более чем за трое суток дрейфтер преодолел ~ 50 км, 10 августа обогнув мыс Таран на севере Самбийского полуострова буй был вовлечён в вихревой диполь, образовавшийся за мысом. Совершив один антициклонический виток (со скоростями движения от 5,9 до 35 см/с) дрейфтер продолжил своё движение на восток. Последняя координата местоположения дрейфтера была получена в районе Куршской косы. В результате дрейфтерного эксперимента было показано как взвешенные частицы, вовлечённые в систему прибрежных течений, способны распространяться на десятки километров от источника и являться прекрасными трассерами для изучения вихреобразования за мысами и его трансформации со временем. Более подробно данный случай описан в цикле работ [Краюшкин и др., 2018; Lavrova, 2018].

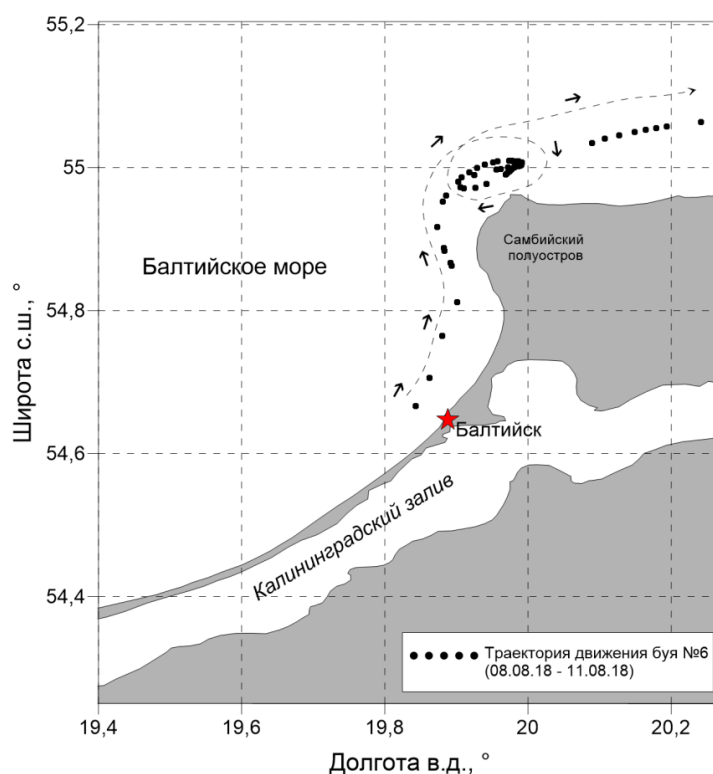


Рисунок 25 — Карта-схема траектории движения лагранжевого буя (обозначена стрелками и пунктирными линиями), запущенного на траверсе г. Балтийска 8 августа 2018 г.

2019 г. В 2019 г. было выполнено несколько океанологических съёмок в районе вытока из Калининградского залива 1 и 7 августа [Krayushkin et al., 2019]. Во время проведения натурных измерений (1 и 7 августа) в силу плотной дождевой облачности над исследуемым районом нами не было получено спутниковых данных высокого пространственного разрешения видимого диапазона. В Приложении Е (Рисунок Е.1) представлен фрагмент спутникового изображения Sentinel-2B (MSI) за 4 августа 2019 г., полученный за несколько дней до натурных измерений. Всего было выполнено две съёмки профилографом течений ADCP WH 300 Hz (6 галсов) и сделано 48 гидрологических станций. Были построены карты пространственного распределения температуры, солёности, мутности и концентрации хлорофилла *a* в верхнем приповерхностном слое — 0,6–1 м (Рисунки 26, 27). В Приложении Е (Таблицы Е.1 и Е.2) представлены значения температуры воды, солёности, мутности и хлорофилла *a* по данным измерений *in situ* в приповерхностном слое на всех станциях 1 и 7 августа 2019 г.

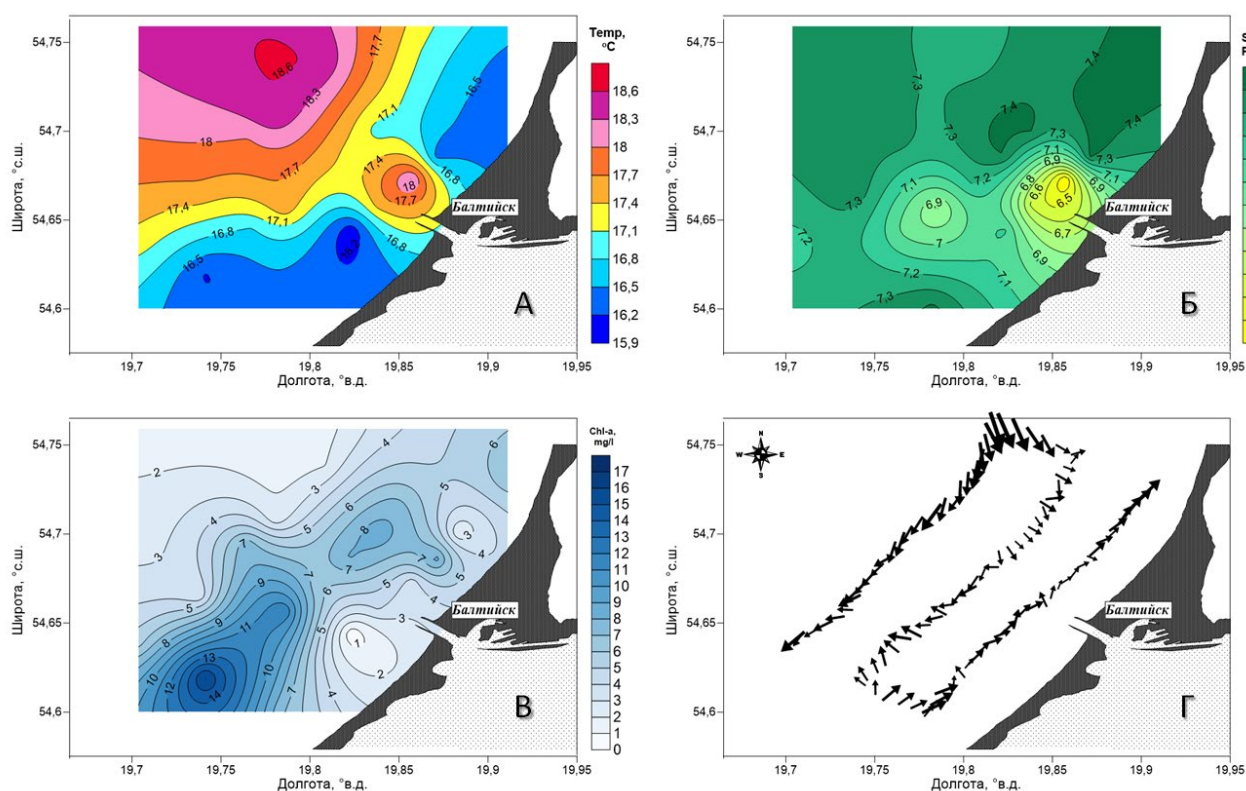


Рисунок 26 — Карты поверхностного распределения температуры (а), солёности (б), концентрации Chl-a (в) и поверхностные течения по данным ADCP (г) за 1 августа 2019 г.

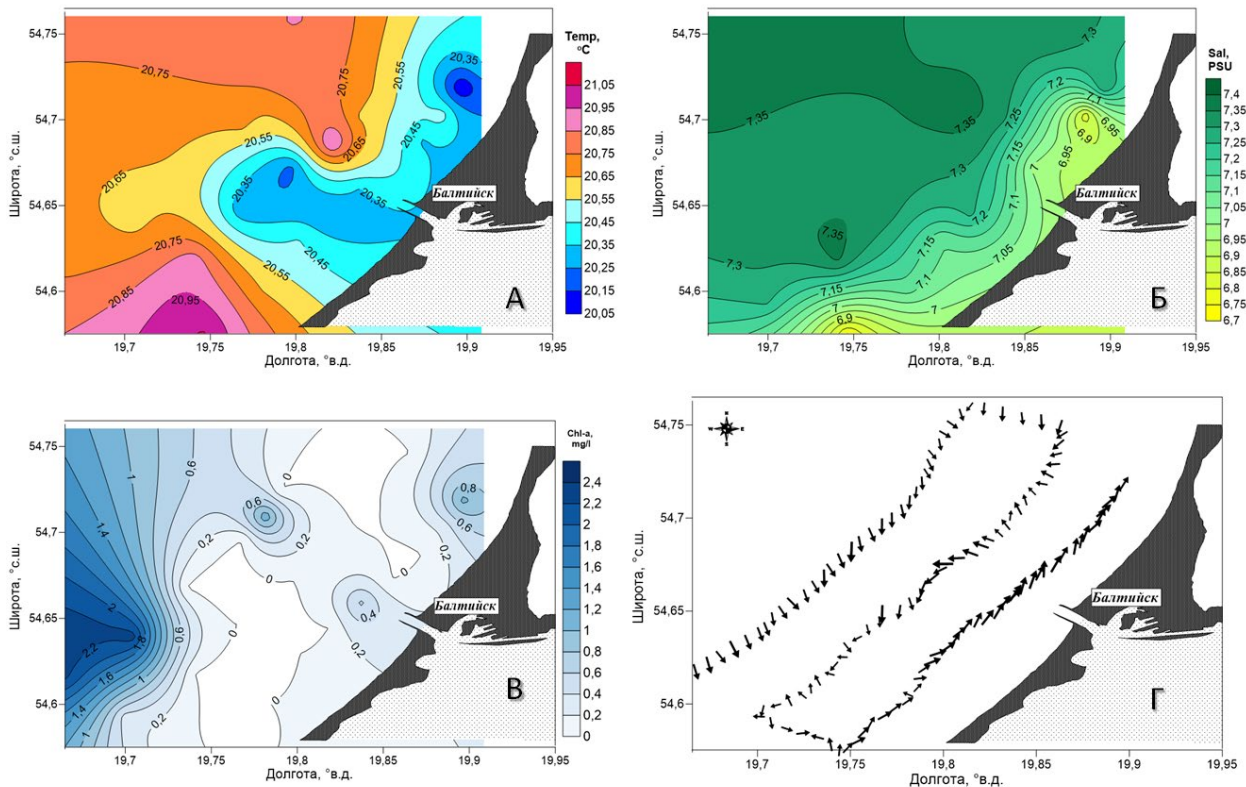


Рисунок 27 — Карты поверхностного распределения температуры (а), солёности (б), концентрации Chl-a (в) и поверхностные течения по данным ADCP (г) за 7 августа 2019 г.

По данным измерений *in situ* 1 августа 2019 г. вынос из Калининградского залива распространялся в западном направлении, что статистически является наиболее часто встречающимся сценарием, полученным на основе анализа архивных данных дистанционного зондирования предыдущих лет. В этот день отмечался слабый северный/северо-западный ветер 3–4 м/с, который, судя по всему, не оказывал существенного влияния на динамику плюма. Как видно на карте поверхностных течений (см. Рисунок 26г), построенной по данным ADCP-профилирования, направление выноса на II и III галсах сонаправлено с западным течением. На ближнем к берегу галсе отмечалось очень слабое противотечение со скоростями, близкими к нулю. Весьма отчётливо можно провести границу плюма на основе карт поверхностного распределения мутности морской воды, построенных по данным STD-зондирований (см. Рисунок 27). Изолиния со значениями 2 НТУ является граничной и отделяет условно чистые морские воды от замутнённых вод залива, поступающих через Балтийский пролив в море. Максимальные значения мутности отмечаются в непосредственной близости самого канала и 1 августа соответствовали 22 НТУ. Минимум солёности морской воды также характерен для зоны, наиболее близкой к каналу (2,4 км от береговой черты) ~6,3 епс. Далее, при постепенном смешении с морскими водами солёность плавно увеличивалась до 7,3 епс. Максимум концентрации Chl-a смещён на запад относительно створа Балтийского пролива. Здесь измеренные значения концентрации Chl-a

составляли 17 мг/л. У створа Балтийского пролива значения концентрации Chl-а минимальны и находились в промежутке от 3 до 5 мг/л. В 8 км от берега (вне плюма) концентрация Chl-а составляла 2 мг/л и ниже [Lavrova, 2019].

В Приложении Е (Рисунок Е.2) представлено распределение температуры, солёности, хлорофилла *a* и мутности морской воды на поперечном разрезе в 2,43 км от береговой черты (I галс).

7 августа была выполнена вторая аналогичная съёмка. По результатам обработки полученных данных можно сделать вывод, что ярко выраженного выноса из залива уже не было. Ветер был слабый (1–2 м/с), неустойчивый и разнонаправленный. Динамическая картина приповерхностных течений свидетельствует о наличии вдольберегового течения северо-восточного направления и слабого противотечения юго-западного направления на втором и третьем галсах, что блокировало распространение выноса от береговой черты (Рисунок 28). Значения мутности морской воды не превышали 5–6 НТУ в приповерхностном слое, а на горизонте 1 м составляли ≤ 1 НТУ. Воды залива тонкой линзой, прижатой к береговой зоне, распространялись симметрично от створа Балтийского пролива, и отличались слегка пониженной солёностью (6,7 епс) и температурой морской воды (20 °C). Максимальные значения концентрации Chl-а соответствовали дальним точкам разрезов (в 8 км и более от береговой черты) и составляли не более 2 мг/л. В остальной прибрежной зоне концентрация Chl-а была практически равна 0.

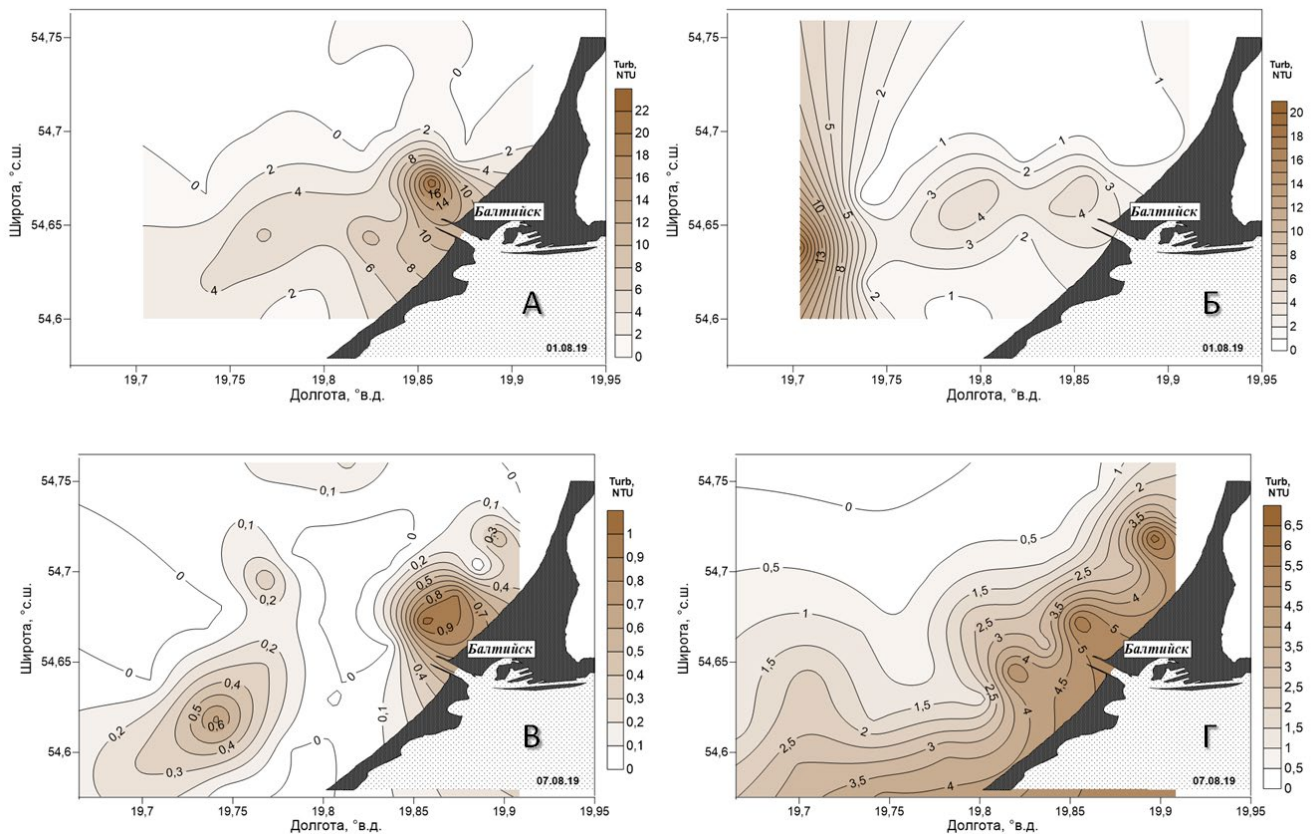


Рисунок 28 — Карты поверхностного распределения мутности морской воды 1 августа 2019 г. по данным CTD-зондирования на глубине 1 м (а) и по данным портативного мутномера на глубине 0,2–0,3 м (б), а также 7 августа 2019 г. по данным CTD-зондирования (в) и по данным портативного мутномера (г)

Во время судовых натурных измерений в 2019 г. в районе выноса вод Калининградского залива впервые был использован портативный измеритель мутности морской воды турбидиметр TN400 фирмы Apera Instruments. Использование портативного измерителя мутности позволило оценить характерную изменчивость мутности морской воды в тонком приповерхностном слое (0,1–0,3 м), ранее не охватываемую CTD-зондом в силу технических особенностей профилографа. Измерения производились на одних и тех же станциях, но на разных горизонтах, на 1 м и на горизонте 0,2–0,3 м, соответственно. В результате были построены карты пространственного распределения мутности морской воды на основе данных двух приборов — CTD-профилографа (см. Рисунки 28а и в) и портативного измерителя мутности (см. Рисунки 28б и г). Как видно из представленных карт, наблюдается высокая изменчивость не только по времени и пространству, но и по вертикали (даже в пределах первого метра от морской поверхности), что говорит о быстрой седиментации дисперсных частиц при условии слабого выноса из залива (на примере измерений 7 августа).

2020 г. В рамках очередной ежегодной экспедиции в 2020 г. были выполнены 2 гидрологические съёмки (18 и 21 августа) на траверзе г. Балтийска [Краюшкин и др., 2020].

Суммарно было сделано 47 STD-зондирований. 18 августа вынос из Калининградского залива имел ровную куполовидную форму небольшого диаметра (отдаление от берега не более 3,2 км) при преобладающих направлениях ветра северо-восточных румбов со скоростями 4–5 м/с. Лучше всего плюм проявлялся в картах поверхностного распределения солёности и мутности морской воды (Рисунок 29).

Минимальные значения солёности соответствовали области наиболее приближенной к створу пролива (до 1,5 км от береговой черты) и составляли 6,6 епс. Морские воды характеризовались значениями солёности равными 7,5 епс и температурой поверхностного слоя — 17,4 °С. Максимальные значения мутности морской воды в поверхностном слое составляли 18 НТУ, а на горизонте 0,6 м уже не более 9 НТУ (у самого канала).

В Приложении Ж (Таблицы Ж.1 и Ж.2) представлены значения температуры воды, солёности, мутности и хлорофилла *a* по данным измерений *in situ* в приповерхностном слое на всех станциях 18 и 21 августа 2020 г.

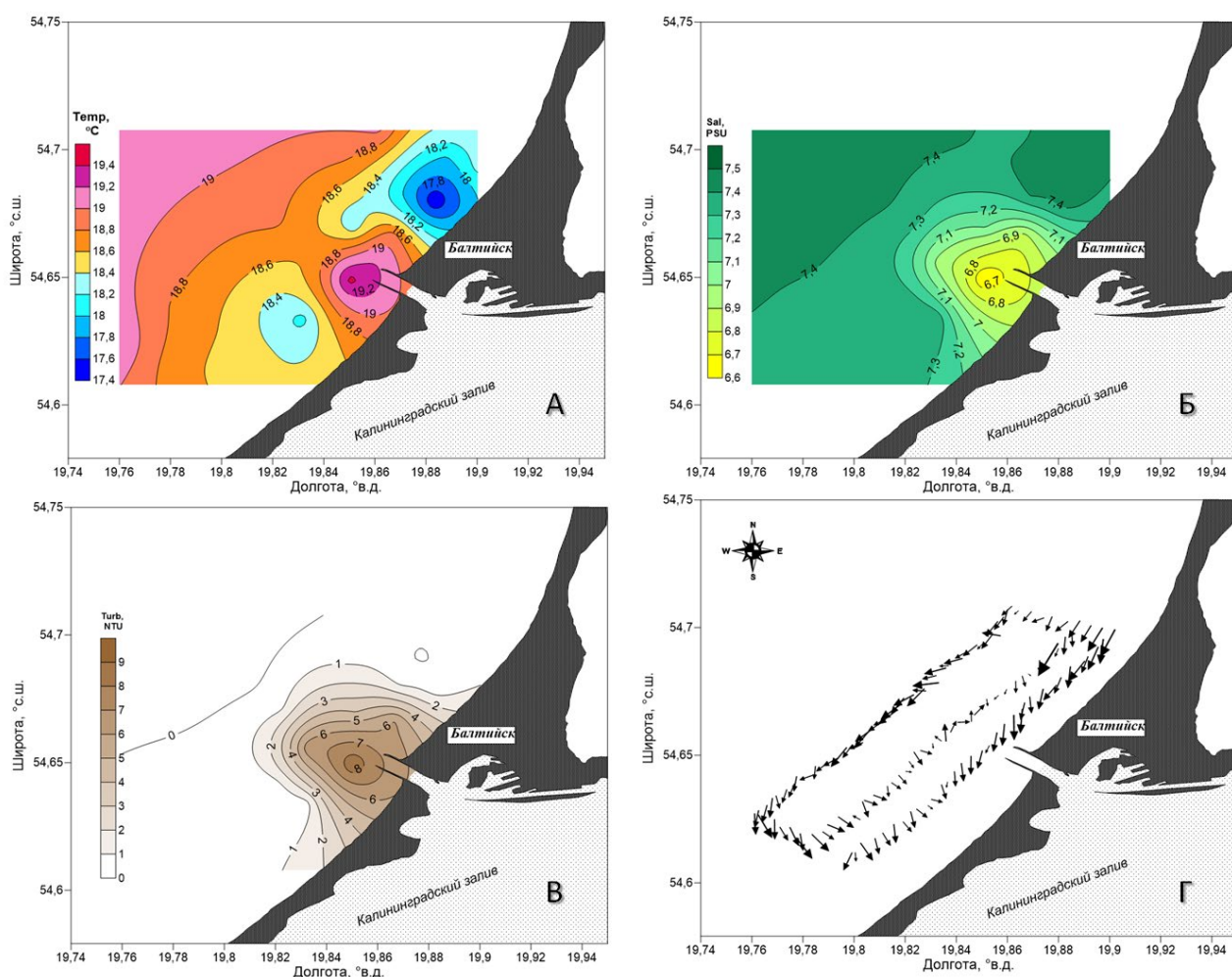


Рисунок 29 — Карты поверхностного распределения температуры (а), солёности (б), мутности морской воды (в) и поверхностные течения по данным ADCP (г) за 18 августа 2020 г.

21 августа динамическая картина более сложная для интерпретации, особенно в силу отсутствия спутниковых данных высокого пространственного разрешения. План работ был выстроен, основываясь на спутниковом изображении от 20 августа (Рисунок 30).



Рисунок 30 — Фрагмент спутникового изображения, полученного со спутника Sentinel-2A (MSI) за 20 августа 2020 г. Оранжевыми метками нанесена часть траектории движения поверхностного дрейфтера, запущенного 21 августа 2020 г. во время судовых измерений. Стрелками указано основное направление движения дрейфтера. Подписи соответствуют времени приёма координат

Как видно на спутниковом изображении, 20 августа вынос из Калининградского залива имел небольшую площадь ($S = 5,69 \text{ км}^2$) и распространялся в юго-западном направлении. На его западной границе можно отметить начало формирования циклонической завихренности. На Рисунке 30 нанесена траектория лагранжевого дрейфтера (глубина паруса 2 м) 21 августа 2020 г. во время проведения судовых измерений. Дрейфтер был выпущен в 12:00 по местному времени на траверзе Балтийского пролива. Координаты места запуска: $54^{\circ}39,386' \text{ с.ш.}$ и $19^{\circ}51,269' \text{ в.д.}$ В тот момент место запуска дрейфтера соответствовало восточной периферии внутренней части плюма.

Натурные измерения 21 августа помогли установить, что плюм имел чёткую восточную границу и размытый факел выноса, направленный на юго-запад. Максимальные значения мутности в приповерхностном слое не превышали 7–8 НТУ. Значения солёности морской воды у канала составляли 6,5 епс, а температура поверхностного слоя была 19–20 °С. На картах поверхностного распределения мутности, солёности и температуры морской воды западнее от канала отмечаются области с двойными экстремумами (максимумами и минимумами измеряемых параметров) (Рисунок 31). При сопоставлении с картой поверхностных течений, полученной на основе данных ADCP профилирования, можно

предположить, что на западной периферии выноса из канала образовался слабый циклонический вихрь (данное явление также встречалось ранее при спутниковом мониторинге района исследования, но ни разу не было измерено *in situ*). Вероятно, этому могли способствовать резкие смены направления ветра: с более сильного юго-восточного (4–5 м/с) на слабые юго-западные румбы (1–2 м/с). Средние значения скорости течения составляли 0,10–0,15 м/с. Центральная часть вихря характеризовалась пониженными значениями температуры морской воды (17 °С), меньшей мутностью (2–3 НТУ) и более высокими значениями солёности (7,2–7,4 епс) по сравнению с окружающими водами.

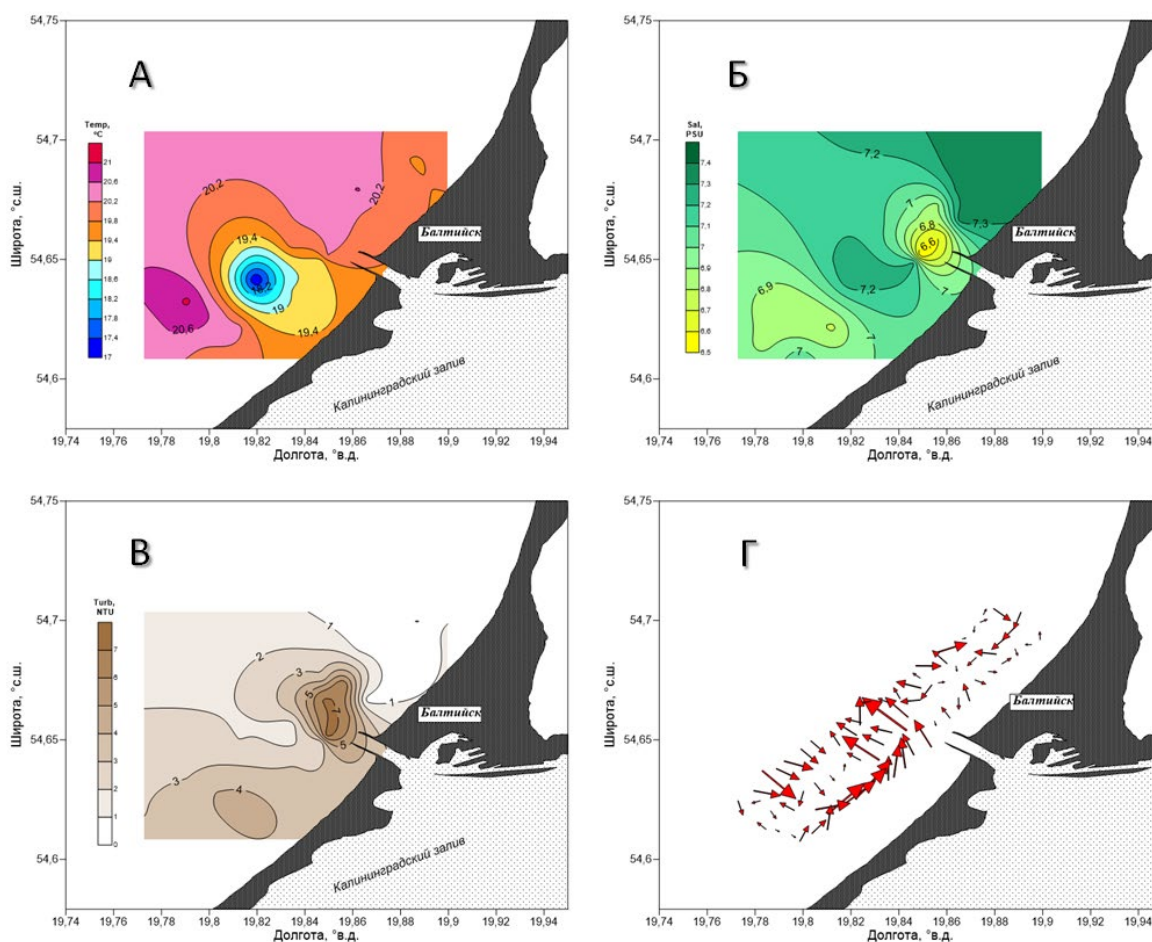


Рисунок 31 — Карты поверхностного распределения температуры (а), солёности (б), мутности морской воды (в) и поверхностные течения по данным ADCP (г) за 21 августа 2020 г.

В Приложении Ж (Рисунки Ж.4 и Ж.5) представлены графики распределения температуры, солёности, мутности и концентрации Chl-a по глубине на станциях зондирования I и III галса 21 августа 2020 г. На разрезах присутствие циклонической вихревой структуры проявляется за счет вертикального поднятия изопикн (так называемая вихревая

накачка), которое привело к уменьшению температуры, концентрации мутности и Chl-a, и увеличению солёности морской воды в поверхностном слое [Микаэлян и др., 2020].

Выпущенный в этот день дрейфтер, как видно на Рисунке 30, не был вовлечён в вихревую структуру, а ушёл строго на запад, так как был запущен восточнее у самой границы плюма. При этом через трое суток (23 августа 2020 г.) дрейфтер вернулся к месту запуска. Далее в течение следующих суток, 24 августа, буй зашёл и вышел из канала, продолжив движение в северо-восточном направлении, и в конце концов был вынесен на песчаный берег севернее г. Балтийска. Средняя скорость дрейфа равнялась 10–5 см/с. В общей сложности продолжительность дрейфа буя составила 4 сут. В Приложении Ж (Рисунок Ж.1) представлена полная схема траектории движения дрейфтера.

2021 г. Во время экспедиционных измерений в 2021 г. была выполнена одна съёмка в районе города Балтийска — 16 июля. Совместно с измерениями ADCP на трёх последовательных галсах проводились CTD-зондирования и измерения портативным мутномером. Всего было выполнено 28 станций. Впервые за весь период наших подспутниковых измерений с 2018 г. удалось провести натурные измерения синхронно со спутниковой съёмкой, чему способствовала безоблачная погода. Фрагмент спутникового изображения в квазиестественных цветах True Color (каналы 4, 3, 2) Sentinel-2A (MSI) и расположение CTD-зондирований 16 июля 2021 г. представлены на Рисунке 32.

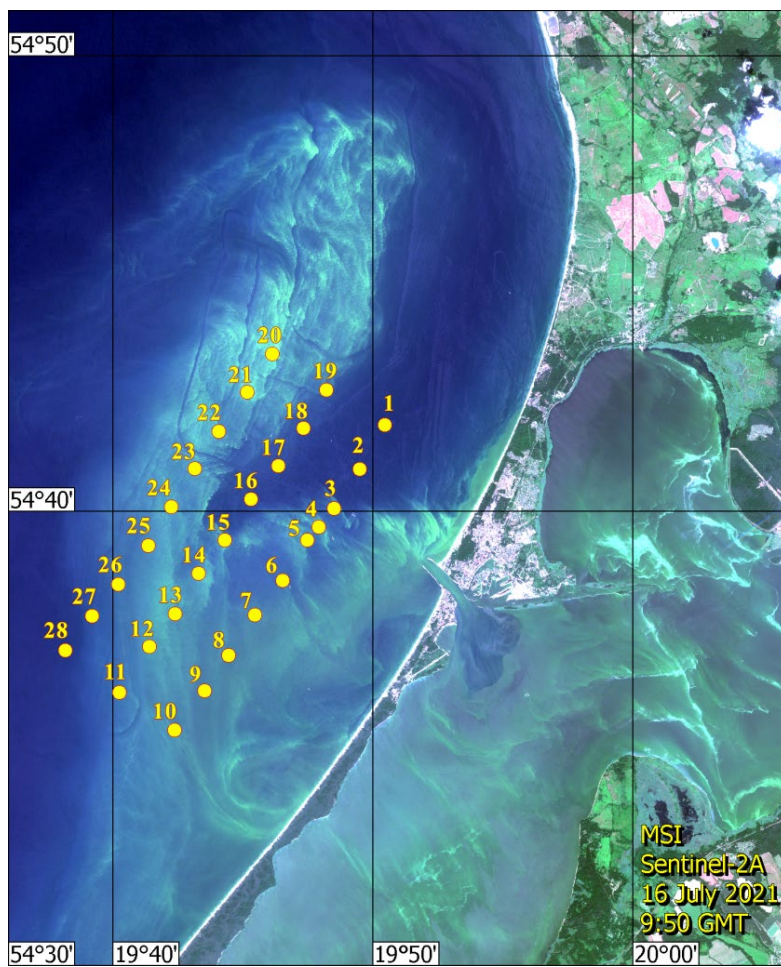


Рисунок 32 — Фрагмент спутникового цветосинтезированного изображения Sentinel-2A (MSI) за 16 июля 2021 г. Номера и положение CTD-измерений отмечены жёлтым цветом

В Приложении И (Рисунки И.3 и И.4) представлены карты поверхностного распределения концентрации Chl-a и концентрации взвешенного вещества, построенные с использованием спутниковых алгоритмов C2RCC и ACOLITE.

На спутниковом изображении в квазиестественных цветах True Color видно, что вынос имеет «зигзагообразную» форму, смещённую в прибрежной части в юго-западном направлении относительно Балтийского пролива с более чёткими границами между «чистыми» морскими водами и «цветущими» водами Калининградского залива на востоке, поступающими через пролив, и в более мористой части (приблизительно в 10 км от береговой зоны) наоборот растянут в северо-восточном направлении. Общая площадь плюма составила $S = 352,35 \text{ км}^2$. Максимальное удаление границы выноса от береговой зоны $\sim 15 \text{ км}$, а максимальная длина верхней части факела — выноса $\sim 20,6 \text{ км}$.

Характер поверхностных течений 16 июля оказывал непосредственное влияние на форму плюма. На Рисунке 33 представлена карта поверхностных течений, построенная по данным синхронных измерений прибором ADCP вовремя CTD-зондирований. На Рисунке 33 видно, что в районе Галса (в 5,4 км от береговой черты) скорость течения имеет значения

~0,10 м/с со слабовыраженным юго-западным направлением. На II галсе (8,19 км от береговой черты) отмечалось устойчивое усиление юго-западного течения ($V \approx 0,25$ м/с). В то время как на III галсе (10,7 км от береговой черты) и на небольшом отрезке ADCP-трансекта уже после прекращения STD-съёмки можно отметить, как направление течения начинает изменяться, поворачивая от западного направления до северного. Скорее всего, ближе к центральной части Гданьского залива в это время находился мезомасштабный циклонический вихрь, оказывающий влияние на прибрежную систему течений.

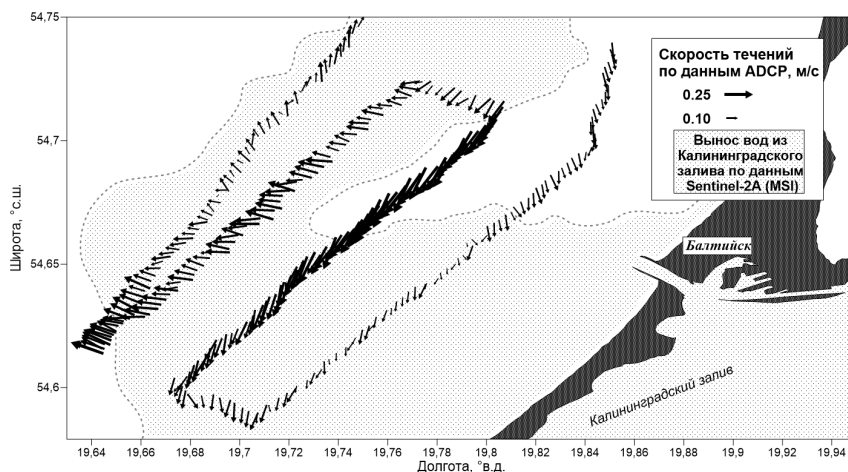


Рисунок 33 — Карта поверхностных течений по данным ADCP-измерений 16 июля 2021 г.

Пунктирными линиями показаны границы выноса вод из Калининградского залива, выделенные на основе спутниковых данных (см. Рисунок 32)

На спутниковом изображении True Color от 16 июля 2021 г., можно заметить, что внутренняя структура плуа неоднородна. Она имеет некоторую «полосчатость»: то более яркие области цветения, то менее яркие. И это проявилось в результатах натурных измерений. В Таблице 8 представлены температура воды, солёность и мутность морской воды (измеренные разными датчиками) в приповерхностном слое для всех CTD-станций 16 июля 2021 г. Более ярко этот эффект проявлялся в измеренных значениях мутности морской воды и в меньшей степени в вариациях температуры и солёности морской воды.

Таблица 8 — Температура воды, солёность, мутность и концентрация хлорофилла по данным измерений *in situ* в приповерхностном слое на станциях 16 июля 2021 г.

№ станции	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	Температура, °С	Солёность, епс	Мутность по ПМ*, НТУ	Концентрация хлорофилла, мг/л
I галс (5,42) км от береговой черты)						

№ станции	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	Температура, °С	Солёность, епс	Мутность по ПМ*, НТУ	Концентрация хлорофилла, мг/л
1	54,69823	19,84133	24,63	7,39	1,07	0,86
2	54,68193	19,82533	24,57	7,39	0,98	0,95
3	54,66733	19,80885	24,64	7,35	19,91	1,16
4	54,66007	19,79855	24,89	7,31	18,04	2,60
5	54,65607	19,79182	24,62	7,29	4,55	1,35
6	54,64142	19,77627	24,76	7,22	4,59	1,38
7	54,62847	19,75773	25,05	7,08	6,16	2,41
8	54,61402	19,74123	25,65	6,99	20,60	2,67
9	54,60062	19,72562	25,21	6,87	26,30	4,31
10	54,58648	19,70663	24,96	6,98	27,50	4,79
II галс (8,19 км от береговой черты)						
11	54,60068	19,6718	24,77	7,23	5,63	2,67
12	54,61697	19,69055	24,77	7,12	22,20	3,57
13	54,62927	19,70702	24,56	7,25	13,13	2,09
14	54,64387	19,72228	24,50	7,33	14,58	1,89
15	54,65615	19,73893	24,44	7,29	—	2,26
16	54,67098	19,75558	24,72	7,23	35,10	3,34
17	54,68318	19,7733	24,45	7,22	5,29	3,22
18	54,69672	19,78922	24,28	7,21	6,53	3,92
19	54,71105	19,80418	24,26	7,21	10,38	3,46
III галс (10,74 км от береговой черты)						
20	54,72428	19,76938	24,26	7,24	13,19	3,94
21	54,71018	19,75337	24,45	7,24	11,56	4,47
22	54,69572	19,73545	24,25	7,21	8,06	4,12
23	54,68217	19,71965	24,27	7,20	15,89	3,85
24	54,66832	19,70512	24,18	7,20	9,95	3,83
25	54,65407	19,68993	24,30	7,24	17,19	3,07
26	54,64018	19,67143	24,48	7,27	15,78	3,13
27	54,6281	19,6538	24,36	7,24	10,89	3,17
28	54,61587	19,63757	24,21	7,18	9,31	4,05

* Измерения проводились портативным мутномером TN400 фирмы Apere Instruments.

Измеренные значения мутности в области «чистой» воды (станции № 1 и 2) ≤ 1 НТУ. Далее напротив створа пролива (станции № 3 и 4) резкое увеличение значений мутности: 18–20 НТУ. После снова уменьшение в четыре раза (4,5–6 НТУ) (Рисунок 34).

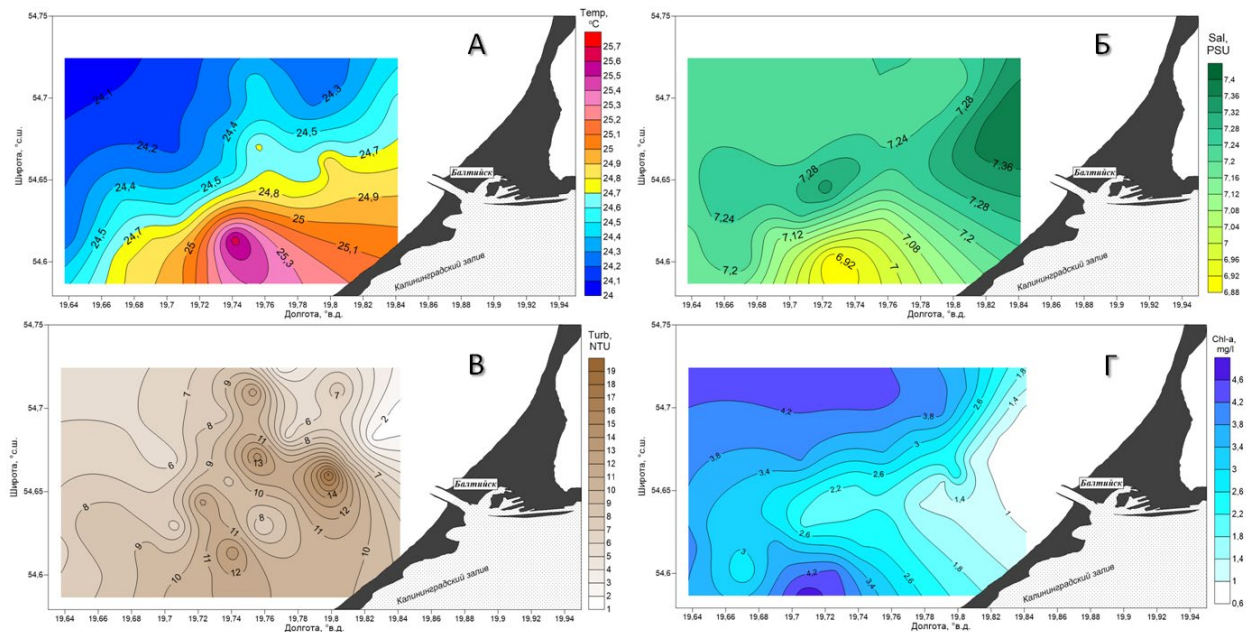


Рисунок 34 — Карты поверхностного распределения температуры (а), солёности (б), мутности морской воды (в) и концентрации Chl-а (г) 16 июля 2021 г.

На Рисунке 35 представлены вертикальные графики распределения температуры, солёности, мутности и концентрации хлорофилла *a* на ближайшем к береговой зоне разрезе. Следует отметить, что глубина интрузии вод Калининградского залива составляла примерно 3–3,5 м — это лучше всего проявляется по данным солёности и мутности морской воды. На Рисунке 35 видно, что в западной части плюма отмечаются минимумы солёности и максимумы температуры поверхностного слоя. А также, под нижней границей плюма, на горизонте 3,5–4,5 м зафиксированы максимальные значения концентрации хлорофилла *a* (в районе станций № 8–10).

В Приложении И (Рисунки И.1 и И.2) представлены графики пространственного распределения температуры, солёности, мутности морской воды и концентрации хлорофилла *a* на II и III галсах.

Если провести сравнение результатов мутности морской воды, измеренной разными оптическими датчика, то можно отметить, что портативный мутномер в целом показал более высокие значения НТУ, ещё раз доказывая утверждение о быстром процессе седиментации в верхнем метровой слое прибрежной зоны и важности проведения измерений портативным мутномером в приповерхностном слое (0,1–0,3 м) с целью верификации спутниковых данных.

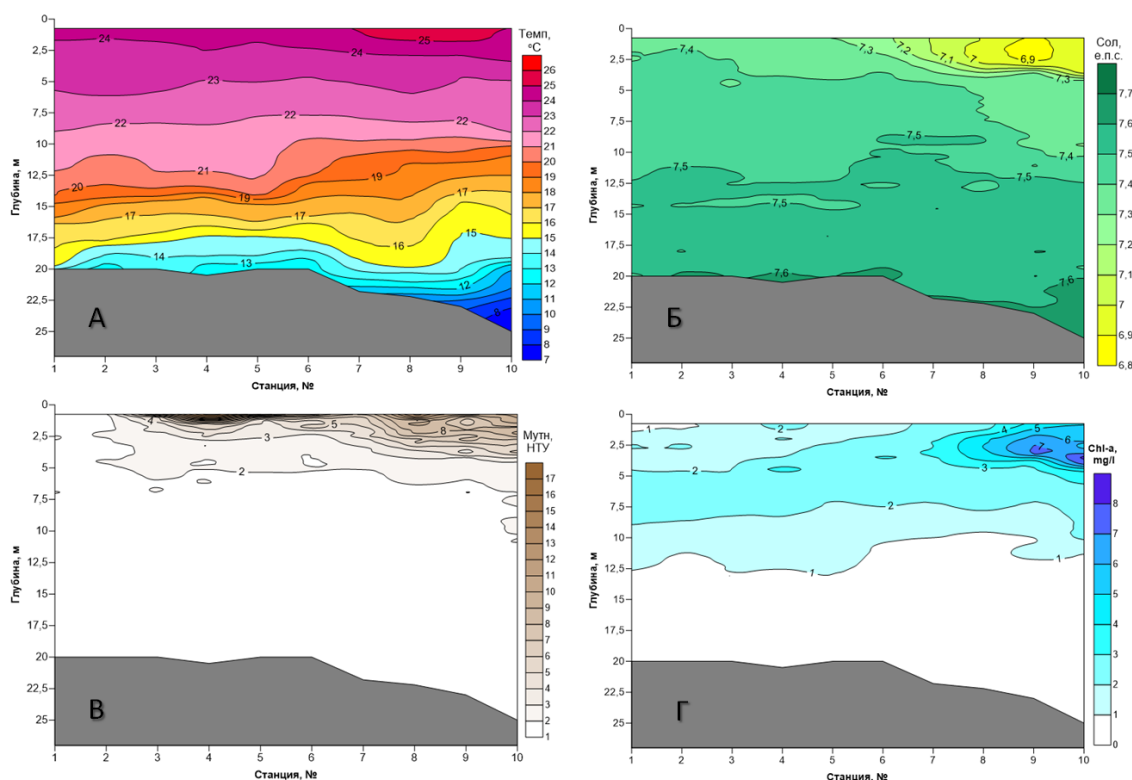


Рисунок 35 — Распределение температуры (а), солёности (б), мутности (в) и концентрации Chl-a (г) по глубине на станциях зондирования I галса 16 июля 2021 г.

3.4 Выводы к главе 3

1. В результате спутникового мониторинга было получено, что на 71 % спутниковых данных район исследования покрыт сплошной облачностью. Наилучший показатель безоблачных дней (50–60 % от общего количества данных) наблюдается в весенне-летний период: с апреля по июль. Только на половине безоблачных сцен вынос проявляется в виде плюма (на спутниковых оптических данных в квазиестественных цветах), при этом его наличие в той или иной степени фиксируется на протяжении всего года. Основным трассером проявления плюмов в летний период являются воды залива, содержащие повышенное содержание цианобактерий. В остальное время года трассерами являются либо воды с повышенным содержанием мутности, либо битый лёд.
2. В результате многолетнего спутникового мониторинга в период с января 2014 г. по декабрь 2020 г. были выявлены основные межгодовые и сезонные морфометрические характеристики плюма, его поверхностные проявления. Установлено, что размеры, площадь, форма и направление распространения плюма может существенно изменяться как от сезона к сезону, так и от года к году. Наблюдается высокая динамическая вариативность формы и размера плюма в течение нескольких суток. Существенное

влияние на пространственное распространение плюма помимо прибрежных поверхностных течений оказывает ветровое воздействие. В более чем 80% случаев вынос сконцентрирован в прибрежной зоне Балтийского пролива, не превышающей в размерах 10 км от береговой зоны и не более 8 км на юго-запад и северо-восток от створа пролива. За весь период исследований, максимальная площадь выноса единовременно составила 220 км² (13.08.2020). Было получено, что максимальные площади выноса были зафиксированы в летние месяцы при преобладании слабых С/СВ ветрах.

3. Анализ межгодовой изменчивости спутниковых изображений с поверхностным проявлением выноса из канала показал, что начиная с 2018 г., их количество увеличивается. В 2014 г. было выделено только 6 сцен, а в 2020 г. был зафиксирован 31 случай. Причиной этого роста являлись метеорологические условия, в частности характер ветрового поля-слабые разнонаправленные ветра в весенне-летний период 2018–2020 гг. с редкими порывами С/ССВ румбов (5–10 м/с), чередующиеся с периодами штилевых условий, против более устойчивых румбов СЗ/ЗСЗ ветров со средними скоростями 5–10 м/с в предыдущие годы. В процентном отношении, количество выявляемых случаев поверхностного проявления выноса из залива среди безоблачных сцен из года в год примерно одинаковый. Его среднее значение за период с 2014 по 2020 г. составило 49,7 %. Для аномального 2017 г. процент спутниковых сцен с поверхностным проявлением плюма был минимальным и составил 40,9 %. В 2020 г. показатель составил 58,5 %. Максимальное количество спутниковых данных с поверхностными проявлениями плюма наблюдается в летние месяцы (июнь – август) — от 12 до 17 случаев, а минимальное количество в осенне-зимний период (октябрь – декабрь) — не более 3–5 случаев.
4. Получены зависимости характера распространения плюма от ветрового воздействия. При З/ЮЗ/ЮЮЗ ветрах, воды из залива распространяются в северо-восточном направлении. При В/СВ/ВСВ ветрах вынос распространяется в юго-западном направлении. При резких сменах характера ветрового режима, на западной периферии выноса могут образовываться вихревые или грибовидные структуры. Для затоков, обнаруженных по данным дистанционного зондирования, характерны сильные устойчивые З/СЗ ветра со средними скоростями 8–10 м/с.
5. Исследована трёхмерная структура плюма на основе данных квазисинхронных подспутниковых натурных измерений. Было получено, что в приповерхностном слое плюм характеризуется пониженными значениями солёности, в среднем на 1–2 ед. меньше, чем морские воды (от 5,20 до 7,5 ед), и наоборот повышенными значениями мутности морской воды (в среднем от 8 до 17 НТУ). Исследование вертикальной структуры плюма показали, что в основном, воды Калининградского залива теплее вод Гданьского залива

на несколько градусов Цельсия (в летний период) и отличаются повышенными значениями концентрации хлорофилла *a* (5–6 мг/л с максимумами в подповерхностном слое до 17 мг/л). Глубина проникновения вод залива может варьироваться от 3 до 4,5 м. Это подтверждают как данные CTD-зондирования, так и полученные при ADCP-профилировании данные обратного рассеивания.

ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЮМА РЕКИ МЗЫМТЫ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

4.1 Основные физико-географические особенности района исследования в северо-восточной части Чёрного моря

4.1.1 Чёрное море

Чёрное море, являясь частью бассейна Атлантического океана, достаточно изолированный и практически замкнутый водный объект, по типу относящийся к внутренним морям. Чёрное море вытянуто вдоль параллели и расположено между $46^{\circ}33'–40^{\circ}56'$ с.ш. и $27^{\circ}27'–41^{\circ}42'$ в.д. Берега Чёрного моря изрезаны мало и, в основном, в северной его части. Единственный крупный полуостров — Крымский. Наибольшая длина Чёрного моря составляет 1148 км, а наименьшая ширина 258 км [Добровольский, Залогин, 1982]. Водообмен с соседними морями на юго-западе осуществляется через проливы Босфор и Дарданеллы; Керченский пролив соединяет Чёрное и Азовское моря. Площадь моря около 422 тыс. км², объём воды 537 тыс. км³, длина береговой линии 3400 км, средняя глубина моря 1240 м, максимальная глубина 2210 м [Симонов, Альтман, 1991].

Вклад материкового стока в водный баланс Чёрного моря составляет 346 км³ пресной воды в год. В Чёрное море впадают такие крупные реки как Дунай (201 км³/год), Днепр (52 км³/год), Днестр, Южный Буг, Ингури, Псоу, Бзыбь, Риони, Кодор, Мзымта и др. Почти 80% суммарного речного стока поступает в северо-западную часть моря, остальное поступает в районе Кавказских берегов. В целом, годовой речной сток Чёрного моря превышает атмосферные осадки (238 км³ в год) и приближается к величине испарения (396 км³ в год) [Альтман, Кумыш, 1986].

Гидрологический режим Чёрного моря формируется под влиянием водообмена с Мраморным и Азовским морями, стока переносимых вод с суши и климатических условий (в том числе величиной осадков). Поэтому, Чёрное море является высокостратифицируемым водным объектом. В целом, черноморские воды можно разделить на две водные массы: поверхностная (от поверхности до 150 м) — опреснённый, богатый кислородом деятельный слой, с температурой тесно связанной с приводным слоем, сформированная за счет поступления материкового стока и осадков, и глубинная (150–200 м и до дна) — более солёная и плотная, с постоянной температурой (~9 °C), анаэробная, сформированная за счёт поступления средиземноморских вод через Босфорский пролив. Эти водные массы разделены холодным промежуточным слоем (ХПС) (от 30 до 100 м), он всегда холоднее чем глубинные воды, так как, охлаждаясь за зимний период, не успевает прогреться за летний.

Средняя солёность Чёрного моря 21,90 ‰ (почти вдвое меньше солёности поверхностных вод Мирового океана — 35,4 ‰). Солёность увеличивается с глубиной в открытой части моря от значений 17–18 ‰ на поверхности до 22,5 ‰ у дна.

Хороший прогрев поверхности Чёрного моря обуславливает высокую *среднюю температуру* (8,9 °C) воды в нем. Зимой наиболее значительные изменения температуры происходят в мелководном северо-западном районе (от –0,5...+1,0 до +7 °C). Возможно образование ледяного покрова (толщина льда достигает 14–15 см (максимально до 50 см)). В области больших глубин, температура воды на поверхности в это время года равна 7–8 °C, а в юго-восточной части моря 8,5 °C. Во время летнего прогрева происходит повышение температуры поверхностного слоя воды по всей площади и может достигать значений 25–26 °C.

Рельеф морского дна Чёрного моря это так называемая Черноморская впадина, которая состоит из двух частей-западной и восточной, разделённых поднятием, являющимся естественным продолжением Крымского полуострова. Северо-западная часть моря характеризуется относительно широкой шельфовой полосой (до 190 км). Южное побережье и восточное имеет более крутой уклон, полоса шельфа не превышает 20 км и изрезана целым рядом каньонов и впадин. Материковый склон Чёрного моря заметно расчленён подводными долинами. Центральная часть черноморской котловины представляет собой относительно плоскую равнину. Глубины у берегов Крыма и черноморского побережья Кавказа увеличиваются крайне быстро, достигая отметок свыше 500 м уже в нескольких километрах от береговой черты.

В соответствии с очертаниями моря, рельефом дна и характером ветрового режима Чёрному морю присуща циклоническая направленность основных элементов циркуляции (Рисунок 36). Всё море вблизи берегов опоясывает *Основное черноморское течение* (ОЧТ).



Рисунок 36 — Схема основных элементов циркуляции Чёрного моря
(<https://anapacity.com/chernoe-more/techeniya-chernogo-morya.html>)

Динамика вод Чёрного моря является весьма изменчивой. Наиболее ярко выраженными формами этой изменчивости являются мезомасштабная и субмезомасштабная вихревая динамика. Один из основных механизмов образования мезомасштабных вихрей — бароклинная неустойчивость ОЧТ [Гинзбург и др., 2008]. В результате этой неустойчивости в области ОЧТ формируются крупные меандры и вихри, диаметр которых составляет $(2-7)R_d$, где R_d — локальный бароклинный радиус деформации Россби. Поскольку в глубоководной части Чёрного моря $R_d = 15-20$ км, диаметр мезомасштабных вихрей в верхнем своём переделе превышает 100 км. Эти долгоживущие (несколько месяцев и даже годы) квазигеострофические вихри и вихревые пары оказывают существенное влияние на структуру и положение ОЧТ.

Субмезомасштабные вихри — агеострофические, нестационарные. Их характерный горизонтальный масштаб ~ 10 км ($R < R_d$). Время жизни таких вихрей — несколько суток [Зацепин и др., 2011]. Субмезомасштабные циклонические и антициклонические вихревые структуры играют ключевую роль в водообмене между прибрежными и центральными районами моря. Средние скорости течений 0,45–0,50 м/с. В летний период они могут ослабевать до 0,20 м/с, а в зимний период, в стрекне ОЧТ, наоборот, достигать 0,90 м/с [Костяной и др., 2010].

Гидрохимические условия Чёрного моря имеют специфическую особенность. Начиная от горизонта 130–150 м и до самого дна, характеризуются присутствием ядовитого сероводорода (H_2S) в воде.

Средняя высота отливно-приливных колебаний черноморской воды колеблется в диапазоне от 3 до 10 см. Это изменение настолько мало, что Чёрное море принято считать бесприливным. Значительные по величине неперiodические изменения уровня вызывают *сгоны и нагоны* (до 40–50 см), появление которых связано с определённым развитием атмосферных процессов (возникают при резких колебаниях атмосферного давления и при прохождении мощных циклонов).

Помимо России, выход к Чёрному морю имеют несколько иностранных государств — это Турция, Грузия, Украина, Румыния и Болгария. Поэтому водоём активно подвергается антропогенной нагрузке. В первую очередь, для Чёрного моря характерно активное морское судоходство (грузовые и пассажирские перевозки). А также многие страны активно используют черноморское побережье как основную рекреационную зону.

4.1.2 Шельфовая зона северо-восточной части Чёрного моря. Река Мзымта

Характерными особенностями северо-восточной части Чёрного моря являются: наличие узкого шельфа, ширина которого здесь не превышает нескольких километров; существенное влияние Основного черноморского течения на прибрежные динамические процессы; близость континентального склона (наличие резкого свала глубин в нескольких километрах от берега); наличие достаточно обильного речного стока.

В пределах российского черноморского побережья в море впадают около 20 малых рек (например, Хоста, Кудепста, Херота и др.), а также около 10 средних: Сочи, Псезуапсе, Туапсе, Вулан и другие. Для каждой из этих средних рек характерен среднегодовой расход порядка 10–20 м³/с и годовой объём стока порядка 0,3–0,6 км³ [Завьялов и др., 2014]. Наиболее крупными реками этого региона являются река Шахе (37 м³/с, 1,2 км³) и река Мзымта (49 м³/с, 1,6 км³). Общий среднемноголетний объём стока в Чёрное море с территории России — 7 км³ в год [Джаошвили, 2002]. Этот объём составляет всего лишь около 2% от суммарного пресноводного стока в Чёрное море. При этом, объединяясь в одну прибрежную распреснённую струю (также в литературе это явление принято называть *опреснённым вдольбереговым геострофическим течением*), сток со всех рек российского черноморского побережья способен распространяться под действием ОЧТ на многие километры в северо-западном направлении, и оказывать существенное влияние на прибрежные экосистемы (на качество прибрежных вод).

Река Мзымта, как уже было сказано выше, самая крупная и полноводная река Российского сектора черноморского побережья (Рисунок 37). Исток реки находится на склонах Главного Кавказского хребта и почти на всём протяжении имеет бурный горный характер. Общая протяжённость реки 89 км, площадь водосбора 885 км². Питание реки

смешанное: осуществляется за счёт осадков, выпадающих на территорию водосбора и ледников Главного Кавказского хребта. В равнинной части дополнительную роль играет грунтовое питание. Для этой реки характерно хорошо выраженное половодье в тёплый период года, частые осенние паводки и устойчивая зимняя межень. Скорость течения реки изменяется в пределах от 0,4 до 2–3 м/с. Сток взвешенных наносов находится в прямой зависимости от стока воды: чем больше расход воды, тем больше сток наносов и наоборот. Среднегодовой сток взвешенных наносов 488,2 тыс. т и влекомых наносов 141 тыс. т. В гранулометрическом составе донных наносов преобладают фракции от 30 до 60 мм (60 %). Среднегодовой расход реки 45,6 м³/с [Дрожжина, 2013].



Рисунок 37 — Район исследований в северо-восточной части Чёрного моря

Существенную потенциальную антропогенную нагрузку на воды Мзымты могут оказывать многочисленные постройки вдоль её берегов. В верхней её части расположен знаменитый горнолыжный курорт Красная поляна с обширным гостиничным комплексом. В туристической отрасли пользуются популярностью и другие спортивные развлечения в устье реки: экстремальный сплав по реке, банджи и бейс-джампинг (англ. BASE and bungee jumping). В речных затоках расположены несколько форелевых ферм. На реке также расположена Краснополянская гидроэлектростанция, обеспечивающая электроэнергией город Сочи. Основная часть инфраструктурных объектов расположена в низменной части реки, в непосредственной близости к береговой зоне. Здесь, вдоль моря, растянуты города Сочи и

Адлер, расположены гостиничные комплексы и санатории, пляжи и рестораны. К зимней олимпиаде 2014 г. была активно освоена пойма восточнее русла. Была построена олимпийская деревня, ряд спортивных стадионов, парк развлечений, набережная, яхтенный порт и новые искусственно созданные песчаные пляжи. Теперь Сочи — крупнейший в России курортный город, пользующийся популярностью на протяжении всего года. Всё это может вносить существенный вклад в загрязнение речных вод, а как следствие и загрязнение прибрежной зоны и берегов.

4.2 Влияние материкового стока на гидрологическую структуру прибрежных вод

В этом разделе и во всех последующих разделах данной главы, будут представлены совместные результаты исследований и полученные выводы на основе данных экспедиционных измерений в районе выноса реки Мзымты, проведённых в апреле 2018, 2019 и 2021 гг. [Назирова и др., 2019; Nazirova, 2019].

Выделение границ речного плюма Мзымты. Несмотря на то, что речной плюм чётко выделяется на спутниковых изображениях видимого диапазона, задача определения его пространственного размера и границы оказалась далеко не тривиальной. Во-первых, вследствие того, что в исследуемом районе находится ещё и устье реки Псоу (см. Рисунок 37 выше), не всегда можно однозначно разделить плюмы этих двух рек. Во-вторых, встаёт вопрос — какое использовать пороговое значение, для «очерчивания» границ основного плюма. Лучше всего границы плюма идентифицировались на цветосинтезированных изображениях в псевдо-естественных цветах (True color image). Границы хорошо выражены за счёт контрастных оптических различий речных и морских вод.

На основе карт пространственного распределения концентрации Chl-a, построенных с использованием оптических спутниковых данных, определить точные границы плюма невозможно. Они размываются, вынос реки Мзымты выглядит более обширным и однородным. Концентрация хлорофилла — параметр, характеризующий биомассу фитопланктона, тесно связан с объёмом выноса речных вод и интенсивностью цветения водорослей в прибрежной зоне, но как было установлено, не совсем подходящий для идентификации границ речного плюма в исследуемом районе.

В поле TSM структура плюма выглядит сложнее, область с максимальными значениями более локализована. Однако здесь как раз и возникает проблема о пороговом значении концентрации взвешенного вещества, которое могло бы служить индикатором границы плюма, особенно для приустьевой области, где наблюдается наибольшая концентрация терригенного вещества (Рисунок 38).

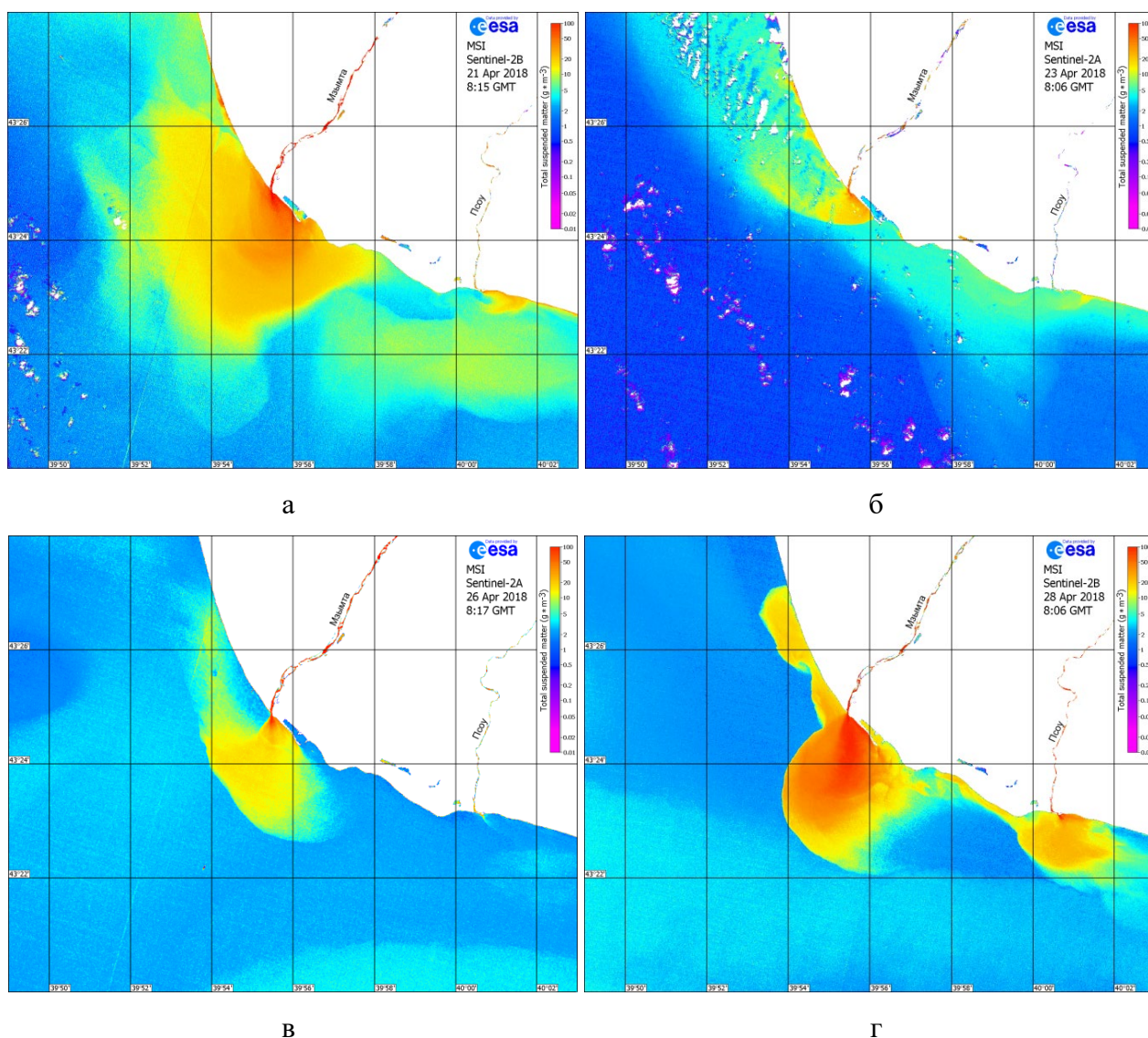


Рисунок 38 — Проявление плюма реки Мзымты на картах TSM, полученных по данным MSI Sentinel-2 в период проведения натурных измерений в 2018 г.: а — 21.04; б — 23.04; в — 26.04; г — 28.04

В результате серии подспутниковых экспедиционных измерений был предложен алгоритм для «кластеризации» области, находящейся под большим влияем речных вод в конкретный момент съёмки. Как правило, подветренная сторона плюма выражена наиболее яркой фронтальной границей речных и морских вод. Значение мутности морской воды даже в нескольких метрах от плюма практически нулевое. Получив пороговое значение на соседних станциях яркого фронтального раздела, можно очертить границы всего плюма.

На Рисунке 39 разными цветами представлены границы плюмов, выделенные по картам TSM, за 21, 23, 26 и 28 апреля 2018 г. В данном случае пороговым значением по концентрации TSM служил интервал от 2 до 5 г/м³. Для большей точности использовались данные MSI Sentinel-2A, -2B, имеющие пространственное разрешение 10 м. Были

приблизительно оценены площади плумов и максимальное расстояние выделенной границы от береговой черты. Результаты оценок представлены в Таблице 9.

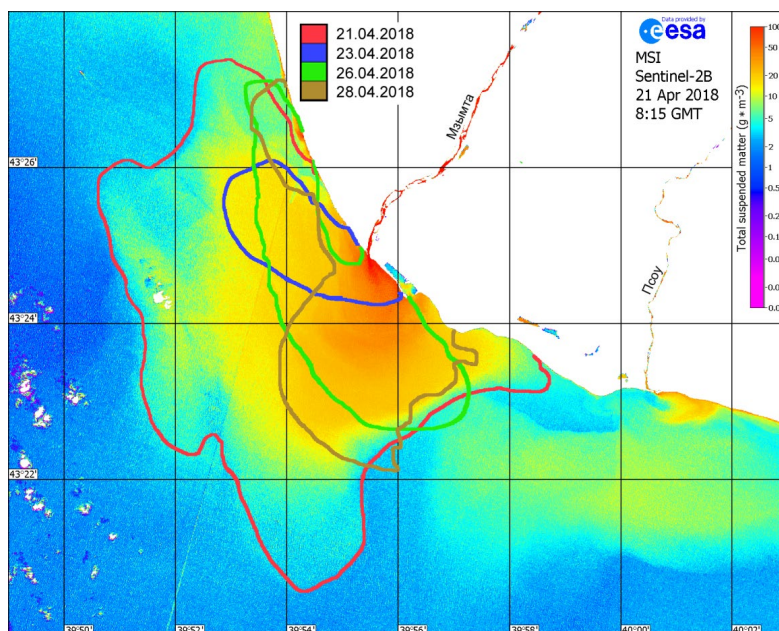


Рисунок 39 — Условные границы плюма реки Мзымты, определённые по картам TSM во время натурных измерений в 2018 г.

Таблица 9 — Основные пространственные характеристики плюма реки Мзымты и гидрометеоданные на момент спутниковой съёмки

Дата	Площадь плюма, км ²	Максимальное удаление границы плюма от берега, км	Уровень реки Мзымты на водомерном посту Казачий Брод, см	Скорость ветра, м/с	Направление ветра
21.04.2018	71,7	7,9	127	2,8	Ю/ЮЗ
23.04.2018	8,9	1,37	111	2,9	Ю/ЮЗ
26.04.2018	21,9	2,9	109	2,6	З/ЮЗ
28.04.2018	20,97	4,8	121	3,2	З/ЮЗ

Как показывают полученные данные, максимальная площадь плюма во время экспедиционных измерений 2018 г. составила 71,7 км², а максимальное удаление границы плюма от береговой черты — 7,9 км.

Чем может объясняться такое сильное изменение как в площади плюма, так и направления его распространения в течение 2–3 дней? Возможны три причины: резкое изменение 1) интенсивности речного стока; 2) скорости и направления ветра; 3) структуры прибрежного течения.

Поскольку мы не имели возможность получить данные о расходе реки, мы использовали данные об уровне воды в реке (Рисунок 40, Таблица 9), определённые на водомерном посту в пос. Казачий Брод (расстояние от устья ~14 км). Оперативные данные об уровне воды в реке Мзымте предоставляются в свободном доступе на портале ЕСИМО (Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане, функционирующая в соответствии с Положением о ЕСИМО, утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации от 29.12.2005 г. № 836) (<https://www.esimo.ru>).

В момент проведения экспедиционных работ в 2018 г. скорость ветра была в пределах от 1 до 4 м/с, направление постоянно менялось. В Таблице 9 представлены средние значения за пятичасовой период до момента спутниковой съёмки. Данные о скорости и направлении ветра были получены с метеорологического сервиса <https://www.meteoblue.com> в рамках проектов ИКИ РАН (в узле с координатами 43,4° с.ш. и 39,91° в.д.). Что касается характера прибрежного течения, то, как показали наши измерения с помощью ADCP, его направление в целом совпадало с направлением ОЧТ, скорость не превышала 10 см/с. Анализ спутниковых радиолокационных изображений SAR-C Sentinel-1 за 25–26 апреля 2018 г. показал, что наблюдалось усиление вихревой активности мористее района работ, которая не оказала значительного влияния на распространение выноса речных вод.

Как видно из графика изменения уровня реки Мзымты (см. Рисунок 40), 20–21 апреля наблюдался резкий подъем уровня воды, что сказалось на интенсивности стока. Соответственно и площадь плюма 21 апреля увеличилась до 71,7 км².

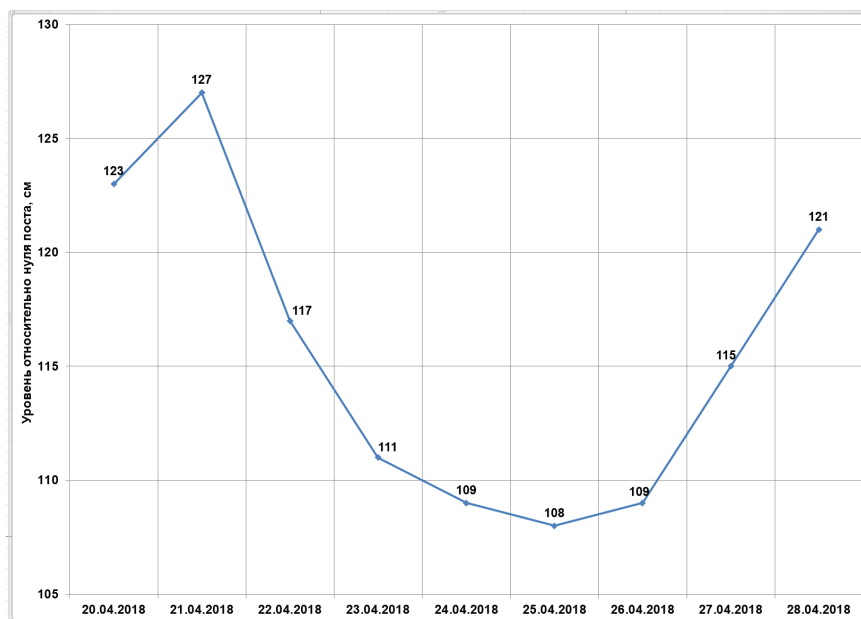


Рисунок 40 — Уровень реки Мзымты относительно нуля водомерного поста в посёлке Казачий Брод в период с 20 по 28 апреля 2018 г.

Таким образом, можно сделать вывод, что пространственные размеры плюма определялись интенсивностью стока реки, а ветровое поле несколько видоизменяло его направление распространения. При усилении юго-юго-западного ветра, 23 апреля плюм прижат к берегу. Резкая граница плюма наблюдалась на его юго-восточной части. В остальные дни прослеживалась резкая перпендикулярная берегу западная граница.

4.2.1 Пространственное распределение основных гидрологических параметров (температура, солёность, мутность морской воды) в плюме по данным измерений *in situ* в 2018 г.

Стоит отметить, что в ходе экспедиционных работ в апреле 2018 г. различить морские и речные воды с борта маломерного судна было затруднительно. В открытом море граница речного плюма не имела чёткого фронтального раздела, за исключением западного фронта (первые 300–400 м от берега, далее визуальную границу сложно было идентифицировать).

На Рисунке 41 представлены две фотографии фронта реки Мзымта западнее устья (25 и 26 апреля). Обе фотографии были сделаны с борта судна примерно в одно и то же время с одного и того же ракурса (т.е. при условии одинаковой освещённости) во время проведения СТД-зондирования. Данные фотографии демонстрируют, как в течение суток могут изменяться оптические свойства речных вод, вследствие изменения минерального состава взвешенных веществ и увеличения интенсивности стока реки (см. Рисунок 40).



а



б

Рисунок 41 — Граница речных и морских вод западнее устья 25 апреля (а) и 26 апреля (б) 2018 г (фотографии Назировой К.Р.)

В следующих разделах этой главы будет показано, как изменились количественные значения концентрации взвешенного вещества и мутности вод в эти дни.

Для определения пространственной структуры плюма, во время экспедиции в 2018 г., были проанализированы данные измерений *in situ* на всех 70 станциях. Остановимся на результатах натурных измерений, проведённых 28 апреля, когда зондирование проводилось на разрезе, перпендикулярном к берегу практически до границы плюма. Было сделано 16 станций, расположенных примерно на расстоянии 200 м друг от друга (Рисунок 42).

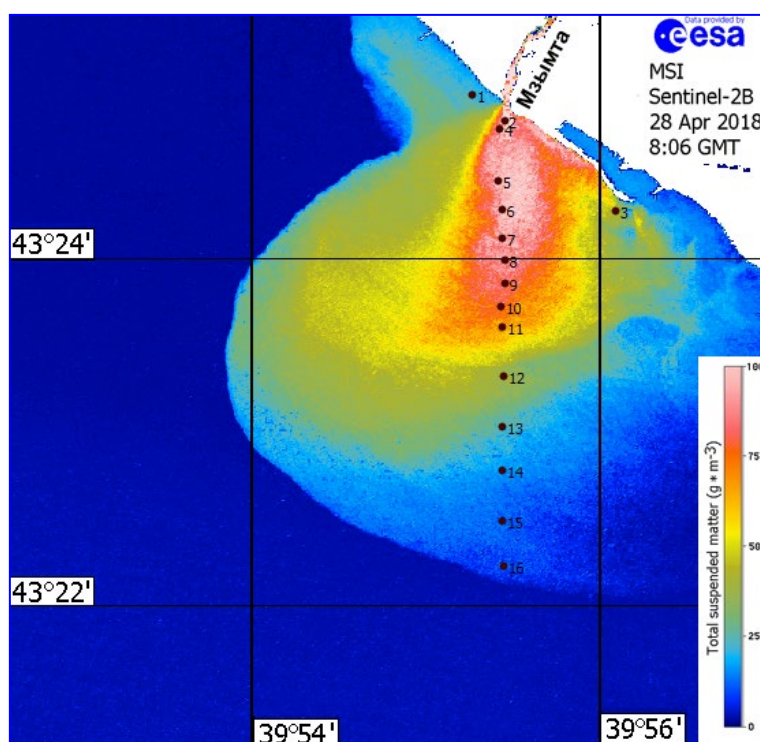


Рисунок 42 — Схема расположения станций зондирования на разрезе 28 апреля 2018 г.

Измерялись следующие параметры: температура воды, солёность, мутность морской воды. Значения всех измеренных в этот день параметров в верхнем горизонте (на глубине 0,3–0,4 м) представлены в Таблице 10, а на Рисунке 43 отражены их пространственное распределение. Анализ результатов измерений показал следующее: границы распространения речных вод идентифицируются не так однозначно по натурным измерениям, как по спутниковым данным. Была выделена область (в 2018 г. это станция № 4), после которой уменьшение/увеличение исследуемых характеристик происходило постепенно, равномерно и между соседними точками незначительно. Данная станция располагается на расстоянии 200–400 м от береговой зоны (в зависимости от интенсивности стока). Назовём условно эту область «выходом на стационарный режим». Другими словами, используя термины гидрологов, выделенную точку можно обозначить границей маргинального фильтра. Принято считать, что

в среднем для рек мира в этой зоне откладывается 93–95 % от взвешенных и 20–40 % от растворенных веществ речного стока, включая загрязнения [Лисицын, 1994].

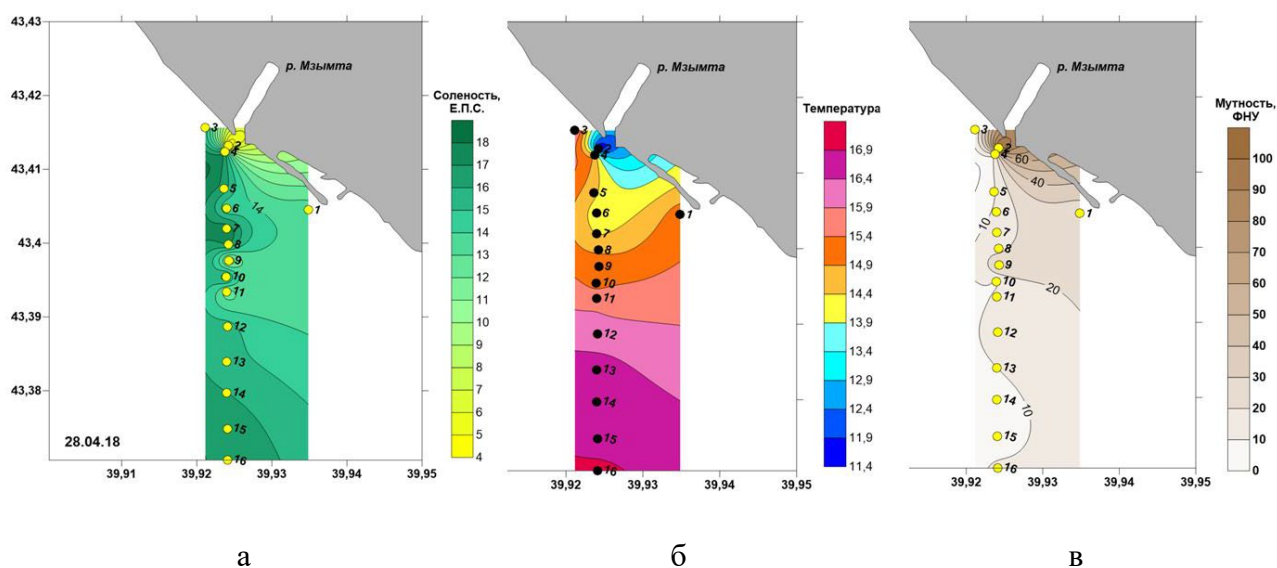


Рисунок 43 — Пространственные распределения полей солёности (а), температуры (б) и мутности (в) по данным CTD-зондирования 28 апреля 2018 г. в приповерхностном слое

Таблица 10 — Значения температуры воды, солёности и мутности по данным измерений in situ на разрезе 28 апреля 2018 г.

№ станции	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	Температура, °С	Солёность, епс	Мутность, ФНУ
2	43,4132	39,9242	11,356	3,77	105,5
4	43,4123	39,9237	14,771	16,79	11,8
5	43,4074	39,9236	14,513	16,58	9,08
6	43,4047	39,9239	14,138	13,99	12,19
7	43,4019	39,924	14,367	17,86	16,17
8	43,3998	39,9242	14,804	17,33	15,53
9	43,3976	39,9243	15,24	10,58	32,11
10	43,3954	39,9239	15,173	17,08	9,3
11	43,3934	39,9240	15,775	12,24	11,18
12	43,3886	39,9241	16,078	15,56	13,79
13	43,3839	39,924	16,691	15,23	9,98
14	43,3796	39,924	16,681	16,03	6,96
15	43,3748	39,9240	16,614	16,73	4,87
16	43,3706	39,9241	17,067	16,77	11,69

Как показали результаты измерений, хорошо идентифицируется только граница маргинального фильтра, после которой значения мутности уменьшаются сразу практически в 10 раз со 105,5 до 11,8 ФНУ на расстоянии в 200 м. Мористее значения мутности уменьшаются плавно, на отдельных станциях, таких как 7–9, наоборот, происходит увеличение значений мутности, что говорит о наличии неоднородностей в самом плюме. Резкие изменения на 4-й станции наблюдаются также в температуре воды (с 11,4 до 14,7 °C) и в значениях солёности (с 3,77 до 16,79 епс). Следует отметить, что неоднородность, или «заток» более распреснённых вод, выявленный на 7–9 станциях в значениях мутности, отразился также и в значениях солёности (см. Таблицу 10).

При вдольбереговых измерениях, проведённых 26 апреля 2018 г., когда западная граница чётко идентифицировалась вблизи берега, как на спутниковых изображениях, так и при наблюдениях с борта судна (см. Рисунки 38 и 41) удалось зафиксировать резкий скачок в значениях всех измеренных параметров. В частности, на соседних станциях мутность уменьшилась с 45 до 2 ФНУ. На разрезе перпендикулярном к берегу «поймать» яркую дальнюю границу плюма на основе результатов натурных измерений в поле температуры, солёности и мутности невозможно, в отличие от спутниковых наблюдений. Из чего можно сделать следующий вывод: на спутниковых изображениях достаточно тонкого подповерхностного слоя с небольшими величинами мутности (по нашим данным ≤ 5 ФНУ) для проявления яркой границы плюма как в True color изображениях, так и в поле TSM. Качественно на True color изображениях практически была незаметна разница в проявлении плюма в приустьевой области и на дальних точках разреза, хотя значения мутности в некоторых случаях различаются более чем в 20 раз.

4.2.2 Изменчивость основных гидрологических параметров (температуры, солёности и мутности морской воды) в поверхностном слое в приустьевой зоне (на примере судовых измерений 2019 г.)

Температура морской воды. В ходе экспедиционных работ в 2019 г. происходило постепенное повышение температуры воды в приповерхностном слое, что хорошо коррелировало с постепенным повышением среднесуточной температуры воздуха в регионе. Самые низкие температуры воды обычно наблюдались у устья реки. На расстоянии не более 200–300 м от устья температура в поверхностном слое воды на глубине 50–80 см колебалась в пределах от 10,8 до 12,7 °C (Таблица 11). По мере перемешивания с морской водой температура воды постепенно увеличивалась по направлению к границе плюма. Поверхностная температура условно «чистой» морской воды за пределами плюма

варьировалась от 12,4 до 17,3 °С. Максимальные значения температуры были достигнуты 2 мая, когда воздух прогрелся до 24 °С.

Таблица 11 — Максимальные и минимальные значения температуры, солёности, мутности морской воды и концентрации взвешенного вещества в поверхностном слое в момент проведения судовых измерений в 2019 г.

Дата	Мин. температура, °С	Макс. температура, °С	Мин. солёность, епс	Макс. мутность, НТУ		Макс. количество взвешенного вещества, г/м ³
				ПМ*	Зонд**	Проба воды
23.04.19	11,04	12,37	11,36	22	31	18,7
24.04.19	11,61	13,65	10,95	13	16	18,1
25.04.19	11,17	13,24	10,38	15	20	16,1
26.04.19	10,77	13,53	6,23	28	31	22,8
28.04.19	11,09	14,46	6,55	54	78	46,3
01.05.19	12,69	15,50	9,24	68	75	64,5
02.05.19	12,28	17,25	9,80	125	129	106,6

* Измерения проводились портативным мутномером TN400 фирмы Apera Instruments.

** Измерения проводились датчиком мутности Seapoint Ltd., интегрированным в CTD-зонд.

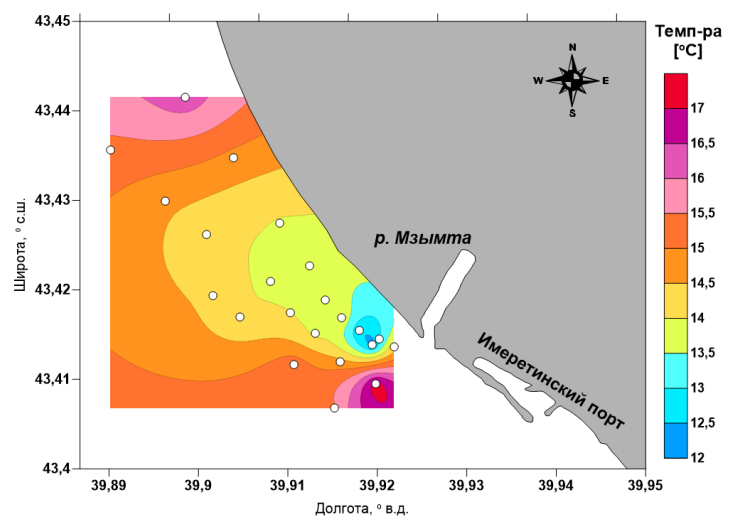
Солёность воды в поверхностном слое на ближайших к устью станциях варьировалась от 6,2 до 11,4 епс (см. Таблицу 11). На границе плюма солёность была близка к значениям солёности для открытых районов моря, которая в Чёрном море составляет в среднем около 18 епс.

Мутность морской воды. За девять дней экспедиционных измерений мутность в приповерхностном слое, согласно измерениям ПМ (портативного мутномера), увеличилась более чем в восемь раз (см. Таблицу 11), с 13 НТУ в начале до 125 НТУ в конце. Максимальная мутность была достигнута 3 мая (135 НТУ по данным ПМ), когда судовые измерения уже не проводились. Такое резкое повышение мутности морской воды может быть вызвано резким потеплением в верховьях Мзымты что привело к интенсивному таянию ледников и снега в горной части реки и, вследствие этого, увеличению стока реки, а также выпадением осадков в первых числах мая.

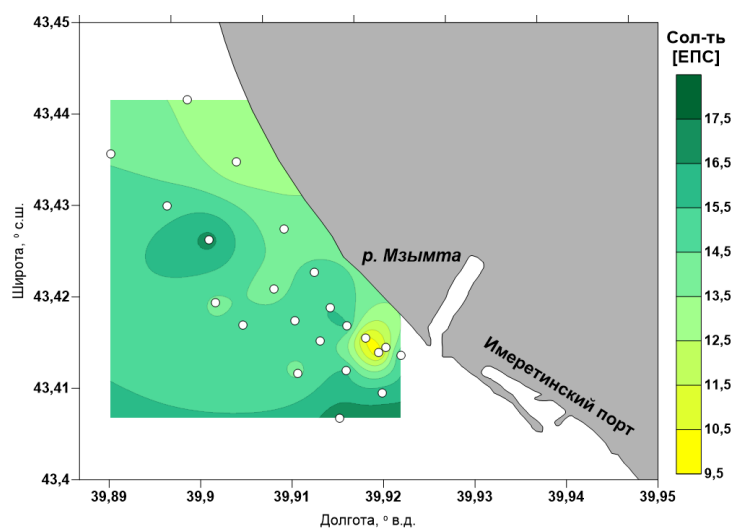
На основе всех экспедиционных измерений (в 2018–2021 гг.) была получена прямая связь между интенсивностью стока реки в весенне-летний период и ростом значений мутности морской воды в приустьевой области.

4.2.3 Пространственное распределение температуры, солёности и мутности морской воды непосредственно внутри речного плюма реки Мзымты

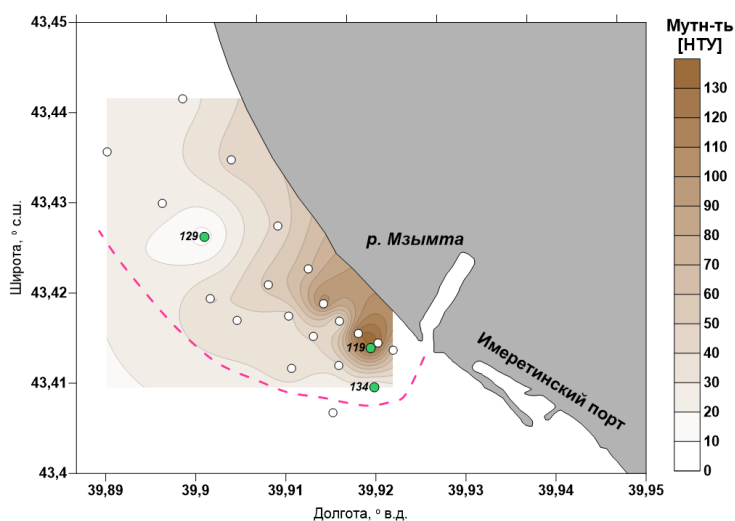
Было получено, что по мере распространения в море речных вод изменение основных параметров морской воды (температуры, солёности, мутности) происходит неравномерно. Это зависит как от скорости и расхода речного выноса, так и особенностей прибрежных течений, которые в данном районе крайне неоднородны. Совокупность внешних факторов и бароклинной неустойчивости на границе плюма приводит к заточкам морских вод через фронтальную зону плюма. Вследствие этого в приустьевой зоне Мзымты образуются локальные области увеличения/уменьшения мутности и солёности. К тому же в области плюма расположен выход трубы сточных вод города Адлера, солёность и мутность вод в данной точке резко отличаются от окружающих вод. В качестве примера на Рисунке 44 представлены карты пространственного распределения температуры, солёности и мутности, полученные по результатам измерений с судна с помощью CTD-зондирований 2 мая 2019 г.



а



б



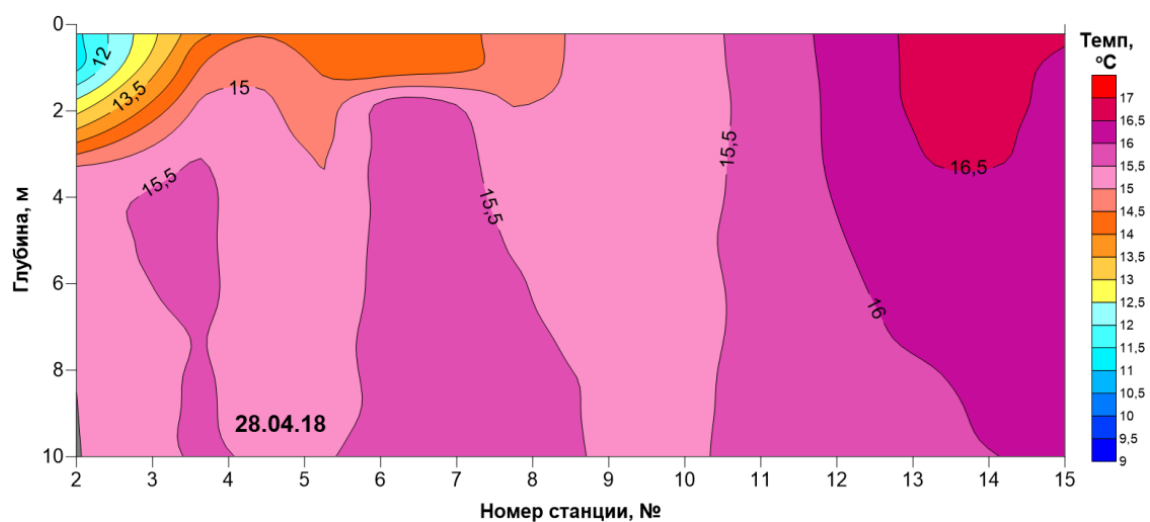
в

Рисунок 44 — Карты поверхностного распределения: а — температуры; б — солёности; в — мутности морской воды, построенные по данным STD-зондирований 2 мая 2019 г. Розовой пунктирной линией схематично изображено положение границы речного плюма

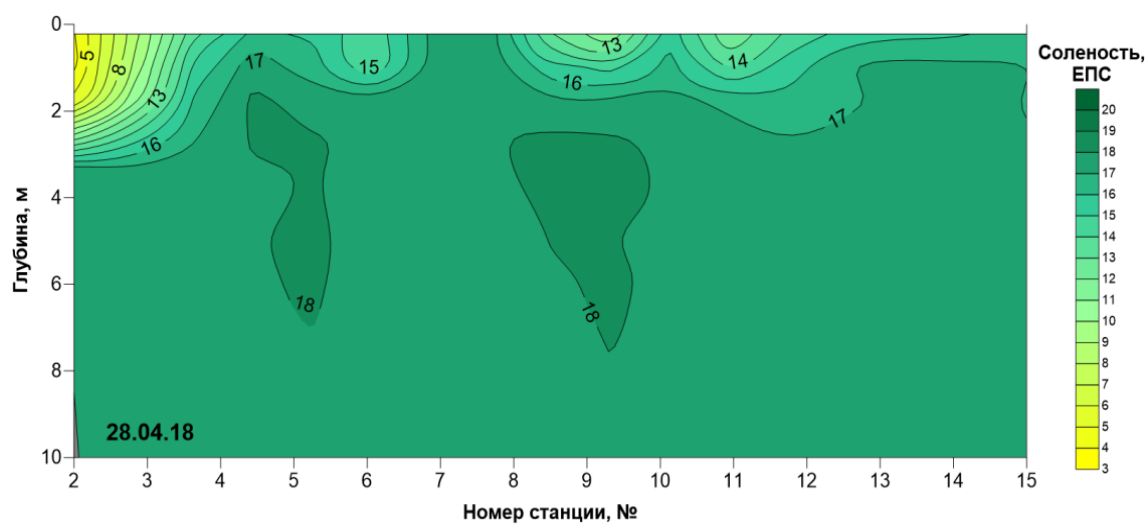
На Рисунке 44(в) розовой пунктирной линией схематично изображена граница речного плюма. Там же отмечены некоторые станции измерений в этот день: 119, 129 и 134. Станция 129 расположена у выхода трубы сточных вод. Выход сточных вод на морскую поверхность идентифицируются как небольшая область с практически нулевыми значениями мутности и более высокими значениями солёности по сравнению с пресными замутнёнными речными водами. Эта область хорошо выделяется и на спутниковых изображениях видимого диапазона.

4.2.4 Оценка положения нижней границы выноса речных вод на основе вертикального профилирования толщи морской воды в районе устья реки Мзымты

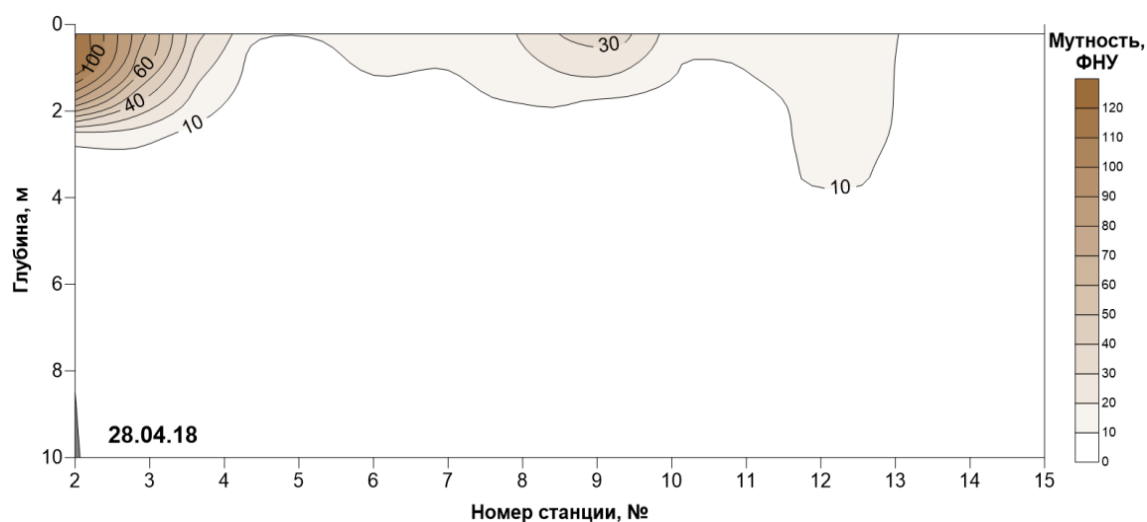
Как показали наши измерения, несмотря на километровые пространственные (поверхностные) размеры плюма, глубина «интрузии» речных вод составляет не более 3–4 м (в том числе при значительных расходах реки). В поле температуры и солёности — это тонкая линза, распространяющаяся до 8 км от берега (в период нашей экспедиции в 2018 г.). Стоит отметить, что в поле мутности морских вод (по данным измерений *in situ*) речные воды представлены более мощным слоем, чем, например, в поле солёности. В приустьевой зоне в приповерхностном слое значения T , S и $Turb$ могут отличаться в несколько раз (для мутности в десятки раз) по сравнению со значениями на 5 м или на станции в 200 м от берега. Так, например, при зондировании 28 апреля 2018 г. были получены следующие значения: температура в поверхностном слое на глубине 0,5 м составляла 11,5 °C, на глубине 3 м — 15 °C, солёность соответственно менялась с 4 до 17 епс; мутность — от 110 до 10 ФНУ (Рисунок 45).



а



б



в

Рисунок 45 — Распределение температуры (а), солёности (б), мутности (в) по глубине на станциях зондирования 28 апреля 2018 г.

Характерные значения температуры, солёности и мутности на разных горизонтах, измеренные *in situ* 28 апреля 2018 г. представлены в Таблице 12.

Таблица 12 — Значения температуры, солёности и мутности
на разных горизонтах за 28 апреля 2018 г.

Параметры	Станция № 2 (у устья)		Станция № 4 (200 м от берега)		Станция № 15 (4,38 км от берега)	
Глубина, м	0	5	0	5	0	5
Температура, °C	9	15,5	14	15,5	17	16
Солёность, епс	3	18	15	18	16	18
Мутность, ФНУ	105,5	~0	20	~0	~0	~0

В результате анализа натурных измерений был получен следующий вывод: наиболее характерным параметром для идентификации речного плюма является мутность морской воды. Только после этого солёность и в меньшей степени температура морской воды.

Другими словами, можно сделать вывод, что глубина проникновения речных вод невелика и быстро спадает по мере удаления от устья Мзымты. Рассмотрим изменение гидрологических характеристик на примере вертикальных профилей, полученных при СТД-зондировании 2 мая 2019 г внутри плюма, но на разном удалении от устья реки. Станция 119 располагалась в непосредственной близости к устью Мзымты, а станция 134 на границе плюма (Рисунок 46).

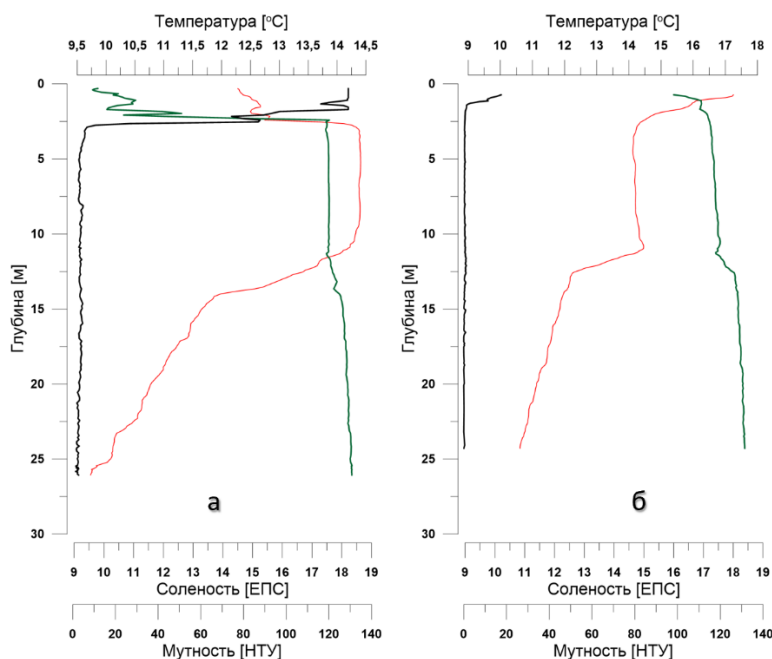


Рисунок 46 — Вертикальные профили температуры, солёности и мутности 2 мая 2019 г: а — на 119 станции, ближайшей к устью реки Мзымты; б — на 134 станции, ближе к границе плюма (см. Рисунок 44). Красная линия — температура воды, зелёная — солёность, чёрная — мутность морской воды

Изменения по глубине значений мутности, температуры и солёности на этих станциях показаны на Рисунках 46а (119 станция) и 46б (134 станция). На ближайшей к устью 119 станции толщина речного плюма составляет около 2,5 м, максимальная мутность морской воды в приповерхностном слое достигает 125 НТУ, а температура и солёность значительно ниже, чем у нижележащего слоя. Резкий скачок всех трёх измеренных параметров свидетельствует о положении нижней границы выноса. В 250 м мористее, у границы плюма, на станции 134 гидрологический разрез выглядит иначе (Рисунок 46б). Глубина интрузии речных вод составляет не более 1 м, мутность морской воды около 20 НТУ (в шесть раз меньше, чем на станции 119), а температура и солёность практически однородны по всей толще. Данный результат подтверждает полученный ранее вывод о резком уменьшении толщины интрузии речных вод при удалении от устья.

Часть результатов из раздела 4.2 опубликованы в работе [Назирова и др., 2019].

4.3 Влияние ветрового режима и прибрежных течений на распространение речного плюма

Классификация речных плюмов в районе исследования. Для работы с судовыми экспедиционными данными, для каждого периода подспутниковых измерений в 2018, 2019 и 2021 гг. производился анализ основных метеорологических параметров (температуры воздуха, скорости и направления ветра, количества осадков). Пример построенного графика основных метеорологических параметров для периода экспедиционных измерений в 2018 г. представлен ниже на Рисунке 47. При совместном детальном анализе последовательных спутниковых данных и изменчивости поля ветра над исследуемым полигоном удалось установить связь между «морфометрическими» параметрами речного плюма Мзымты и характеристиками ветрового воздействия. Были сделаны следующие выводы:

- плюмы изотропной формы образуются при отсутствии ветра или при слабых ветрах (1–2 м/с). Обладают наибольшей площадью (18,2 км²);
- при сгонных северо-восточных ветрах образуется узкий и сильно вытянутый в юго-западном направлении шлейф малой площади;
- при воздействии ветров юго-западных румбов плюм прижат к берегу и незначительно распространяется в обе стороны от устья;
- в силу морфологических особенностей дна и береговой зоны (наличие наносов в виде песчаной косы слева у устья) наблюдается асимметричность распространения речных вод (в приустьевой области вправо) и прослеживается резкая западная граница плюма.

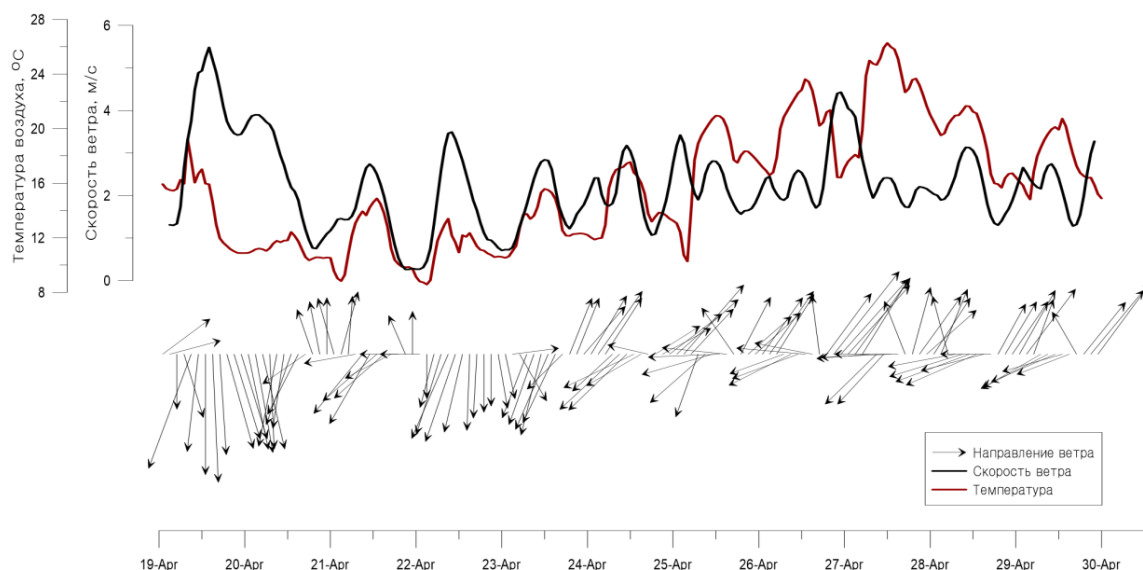


Рисунок 47 — Распределение основных метеорологических параметров за весь период экспедиции в районе исследования в 2018 г.

Стоит отметить, что связь между динамикой распространения речных плумов и ветровым воздействием для реки Мзымты, в частности, уже упоминалась ранее в работе [Завьялов и др., 2014]. Перечисленные выше закономерности полностью согласуются с работами этих авторов.

Мелкомасштабная динамика сдвига границы речного плума. После проведения серии экспериментов в 2019 г. (23, 25 и 26 апреля) были впервые оценены мелкомасштабные скорости смещения границы речного плума Мзымты и их связь с направлением ветра (Рисунок 48) [Nazirova, 2019; Лаврова, 2019].

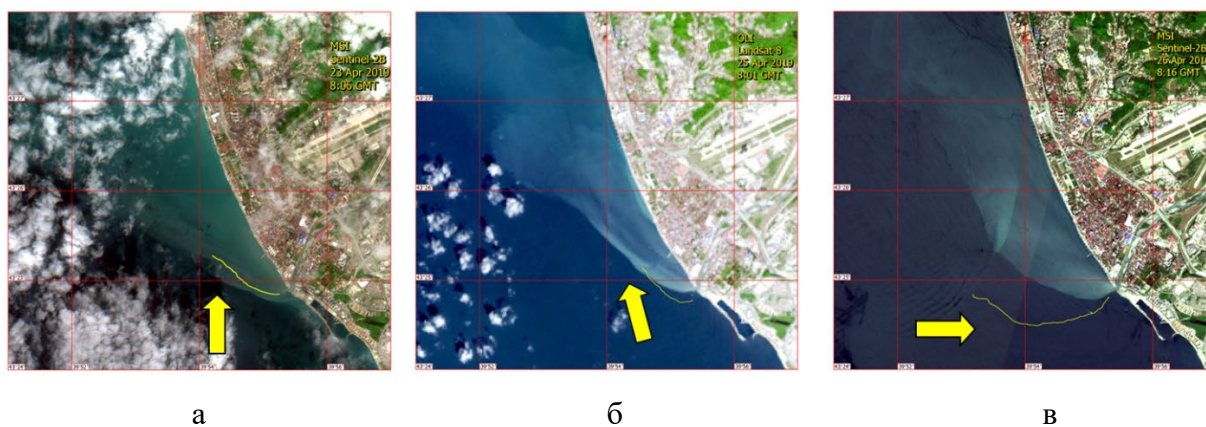


Рисунок 48 — Иллюстрация короткопериодного смещения границы речного плума на фрагментах спутниковых изображений за 23 апреля (а), 25 апреля (б) и за 26 апреля (в) 2019 г. На изображениях True Color жёлтой линией нанесён GPS-трек вдоль границы речного плума спустя 3 ч после пролёта спутников. Жёлтой стрелкой указано направление преобладающих румбов в течение этого времени

Суть эксперимента заключалась в том, чтобы после окончания подспутниковых измерений (CTD-зондирований и отбора проб морской воды), на обратном пути в порт пройти вдоль границы плюма, с помощью GPS-трекера определяя её координаты. Было получено, что при слабых ветрах южных, юго-восточных румбах смещение границы минимально: за три часа со скоростью 0,02–0,03 м/с она смещается на 250–350 м «прижимными» ветрами в сторону или вдоль береговой зоны (23 и 25 апреля). Максимальное смещение границы речного плюма отмечалось при западных румбах (26 апреля): за три часа граница сместилась на 900 м мористее. Скорость смещения составила 0,08 м/с. Результаты экспериментов подтверждают гипотезу о высокой мобильности речного плюма в целом и его границы в частности. Что, в свою очередь, существенно усложняет задачу верификации количественных данных в конкретных станциях, полученных дистанционными и натурными данными, так как в течение нескольких часов подспутниковых измерений внутренняя тонкая структура плюма способна изменяться.

Результаты из раздела 4.3 опубликованы в работе [Nazirova et al., 2019].

4.4 Определение полей мутности и концентрации взвешенного вещества в приустьевой зоне по спутниковым данным и измерениям *in situ*

Далее будут представлены результаты попарного корреляционного анализа разных типов данных, результаты рентгенофазового анализа морских проб, описана связь минерального состава проб и оптической величины мутности, будет приведён сравнительный анализ различных алгоритмов по восстановлению поля концентрации взвешенного вещества методом дистанционного зондирования, рассмотрена достоверность этих данных и проведена верификация спутниковых данных натурными измерениями. Результаты, представленные в разделе 4.4 опубликованы в работе [Nazirova et al., 2021].

4.4.1. Корреляционный анализ двух типов натуральных данных мутности морской воды

Во время экспедиционных измерений в районе реки Мзымты в 2019 г. была выполнена обширная сетка гидрологических станций, общей численностью более 150 зондирований за семь выходов в море (23, 24, 25, 26, 28 апреля, 1 и 2 мая). Параллельно с CTD-зондированием толщи вод в приповерхностном слое производился отбор морских проб и в этом же объёме воды производились измерения мутности морской воды посредством портативного турбидиметра. Динамика изменения максимальных значений мутности морской воды (как правило, соответствующих станциям, располагающимся ближе всего к устью реки) в тонком

приповерхностном слое (от 0 до 15 см), измеренных при помощи портативного турбидиметра, представлена на Рисунке 49.

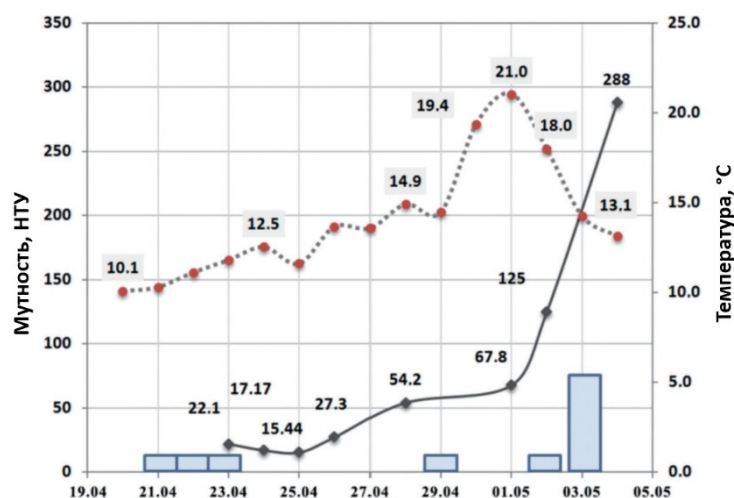


Рисунок 49 — График изменения максимальных значений мутности морской воды (чёрная линия), среднесуточной температуры воздуха (пунктирная линия) и количества выпавших осадков (синие столбцы) во время экспедиционных измерений 2019 г.

В период экспедиционных работ был отмечен экспоненциальный рост данного параметра. Минимальные измеренные значения составляли 15,44 НТУ, максимальные значения были получены 4 мая — 288 НТУ. Абсолютные максимумы значений мутности в приустьевой зоне увеличились в 18 раз. Скорее всего, это было связано с суммарным эффектом увеличения среднесуточных значений температуры воздуха к концу экспедиционных работ (активировавшие процессы таяния снежного и ледникового покрова в горной части Кавказа) и выпавшими осадками 3 мая (около 30 мм).

Такой обширный диапазон измеренных значений позволил произвести разные виды корреляционного анализа и в результате получить закономерности при разных условиях мутности морской воды, в том числе используя натурные измерения 2021 г., во время которых в среднем поверхностные значения поля мутности превышали абсолютные максимумы 2019 г. практически в три раза. Максимальные измеренные значения мутности морской воды в 2021 г. равнялись 518 НТУ.

Экстремальные значения температуры, солёности и мутности по данным натурных измерений 2021 г. представлены в Таблице 13. Интересно отметить, что во время экспедиционных измерений 2021 г в отличие от 2019 г. отмечалась обратная картина — уменьшение абсолютных значений мутности морской воды (практически в четыре раза от первого дня измерений).

Таблица 13 — Экстремальные значения мутности, температуры и солёности морской воды в приповерхностном слое воды во время экспедиционных измерений 2021 г.

Дата	Мин. температура, °C	Макс. температура, °C	Мин. солёность, епс	Макс. мутность, НТУ		Макс. количество взвешенного вещества, г/м ³
				ПМ*	Зонд**	Проба воды
22.04.2021	9,54	13,07	5,72	407	518	435,9
29.04.2021	11,10	13,30	7,20	332	390,39	269,9
30.04.2021	9,05	15,82	6,43	258	331,38	226,2
02.05.2021	13,40	16,69	8,60	105,5	173,31	104,2

* Измерения проводились портативным мутномером TN400 фирмы Apera Instruments.

** Измерения проводились датчиком мутности Seapoint Ltd., интегрированным в CTD-зонд.

Результаты сравнения данных мутности морской воды по данным экспедиционных измерений в апреле – мае 2019 г., полученные разными приборами на одних и тех же станциях представлены на Рисунке 50. Для датчика, установленного на CTD-зонде, выбирались значения мутности, измеренные на максимально возможном приповерхностном горизонте (0,35–0,5 м). Значение величины достоверности аппроксимации линейной функцией составило $R^2 = 0,93$, что говорит о достаточно высоком соответствии между полученными данными. В среднем, значения мутности по показаниям CTD-зонда (Turb2) несколько выше, чем показания портативного мутномера (Turb1) в 1,042 раза. При больших значениях мутности наблюдается большой разброс (Рисунок 50, измерения 2 мая) в обе стороны от линейного тренда. Данные закономерности также прослеживаются в данных 2021 г. Возможное объяснение может быть следующим: вблизи устья на мелководье измерения производятся в условиях нестационарного взаимодействия речных вод с морскими, в близких по пространству точках значения мутности могут сильно различаться. Особенно это наблюдается в период резкого увеличения скорости воды в реке, как это происходило 2 мая. Скорость воды увеличилась от 2 м/с, как это наблюдалось в среднем в предыдущие дни, до 6–8 м/с. Для значений мутности от 15 до 40 НТУ результаты измерений разными приборами практически полностью совпадают, с небольшим превышением для значений, полученных зондом. При значениях меньше 15 НТУ можно отметить занижение данных зондом. Это объясняется тем, что по мере распространения речных вод в море, значение мутности и толщина плюма резко снижается (см. Таблицу 12), соответственно датчик CTD-зонда может находиться ниже зоны распространения плюма по глубине. Это также справедливо, если

толщина плюма в целом невелика даже в приустьевой зоне. В дальнейшем, для верификации спутниковых данных и приповерхностных измерений мутности морской воды, можно ограничиться измерениями с помощью только одного прибора, делая поправки на полученные результаты.

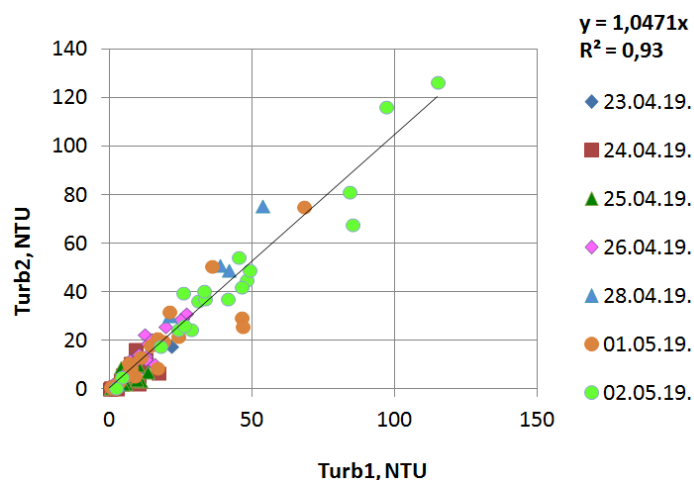


Рисунок 50 — Сопоставление значений мутности приповерхностного слоя воды, полученных при помощи портативного мутномера (Turb1) и CTD зонда (Turb2) в апреле – мае 2019 г.

4.4.2 Корреляционный анализ мутности морской воды и концентрации взвешенного вещества, измеренных *in situ*

Проведён корреляционный анализ данных о мутности морской воды в приустьевой зоне плюма, полученных двумя разными оптическими датчиками и данных о концентрации взвешенного вещества в пробах воды (весовой метод), отобранных на тех же станциях, где проводились измерения мутности в 2019 г.

Анализ показал, что концентрация m (в г/м^3) взвешенного вещества в пробах прямо пропорциональна мутности Turb1 в НТУ поверхностного слоя воды, определённой с помощью портативного мутномера. Как показано на Рисунке 51а, полученные значения хорошо аппроксимируются прямой, проходящей через начало координат: $m = 0,84\text{Turb}$. Величина достоверности аппроксимации R^2 очень высока и составила 0,98. Эта зависимость проявлялась во всех без исключения пробах морской воды и не зависела от дня эксперимента и погодных условий.

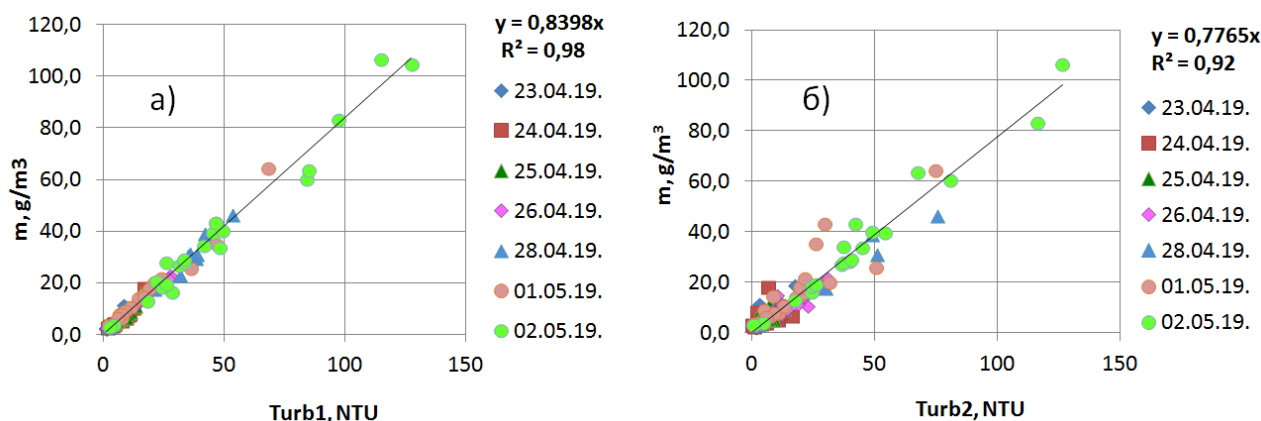


Рисунок 51 — Сопоставление значений мутности, определённых портативным турбидиметром (Turb1) (а), с помощью CTD-зонда (Turb2) (б), и массовой концентрации взвеси в пробе воды по данным натурных измерений в 2019 г.

Похожая зависимость была определена и между концентрацией m в г/м³ взвеси в пробах и мутностью Turb2 в НТУ, определённой по данным CTD зонда (Рисунок 51б). Однако в этом случае величина достоверности аппроксимации (R^2) чуть ниже $R^2 = 0,92$, а аппроксимационная прямая имеет коэффициент 0,78. Такое различие легко объяснимо. Пробы воды для определения концентрации взвеси и для измерений с помощью портативного мутномера брались на той же глубине (0,1–0,25 м). А измерения с помощью CTD-зонда, как неоднократно указывалось выше, начинались на больших глубинах (0,35–0,5 м).

Практически такая же положительная высокая корреляционная связь была получена для данных 2021 г., где в среднем значения мутности были в три раза больше, чем в 2019 г. Величина достоверности аппроксимации (R^2) составила 0,96. Для речных проб, взятых непосредственно в реке (чуть выше по руслу), $R^2 = 0,89$ (Рисунок 52). Следует отметить, что при проведении измерений в 2022 и 2023 гг. были получены практически идентичные результаты.

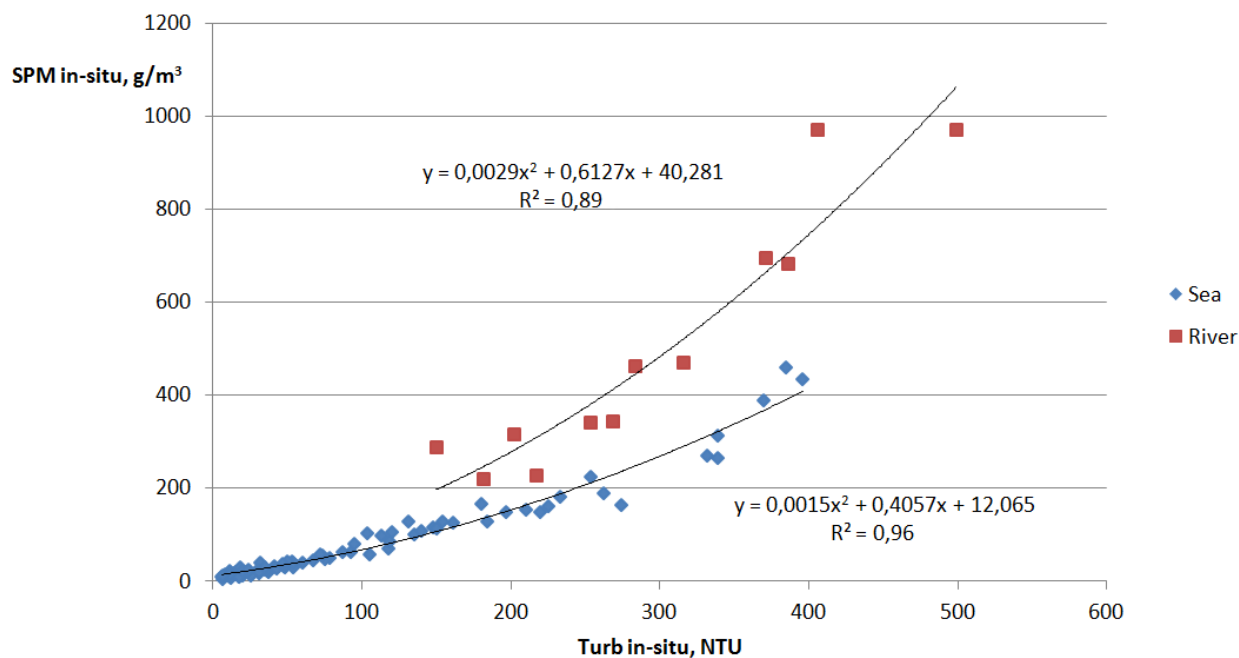


Рисунок 52 — Сопоставление значений мутности, определённых портативным турбидиметром (Turb in situ) и массовой концентрации взвеси в пробе воды (SPM in situ) по данным натурных измерений в 2021 г. Красным цветом нанесены результаты измерений непосредственно в реки Мзымте

Было принято решение использовать данные портативного мутномера для дальнейшего сравнения с весовым методом и верификации данных дистанционного зондирования, так как по сравнению с CTD-зондом он способен производить измерения в более тонком приповерхностном слое (первые десятки сантиметров).

Учитывая такую высокую корреляцию между данными портативного мутномера и концентрацией взвеси, можно сделать вывод, что в данном районе можно производить преобразования и проводить пересчёт одних единиц в другие (НТУ в г/м³), используя приведённую выше формулу. Главным преимуществом этого является возможность не проводить трудоёмких работ по определению весовой мутности, а использовать только оптические датчики мутности.

4.4.3 Корреляционный анализ данных о концентрации взвешенного вещества, полученных весовым методом и рассчитанных по спутниковым данным при помощи стандартного алгоритма C2RCC

Одна из основных задач подспутниковых натурных экспедиционных работ заключалась в сравнении количественных данных о концентрации взвеси, полученных двумя способами: в результате отбора проб воды и спутниковыми дистанционными методами.

Поэтому очень важно было проводить измерения в близкие моменты времени и в одних и тех же условиях. А именно в области максимальной мутности, заведомо внутри плюма или вне его.

Как уже было показано в параграфе 4.3, речной плюм является высокодинамичной субмезомасштабной структурой, его форма и границы могут смещаться/видоизменяться в течение нескольких часов. В качестве примера на Рисунке 53 приведены положения юго-восточной границы плюма 26 апреля 2019 г. в 07:30–08:00 UTC (жёлтая линия); в 09:11–09:29 UTC (розовая линия) и в 10:30–11:00 UTC во время возвращения судна в порт (зелёная линия). Съёмка данного района с помощью MSI Sentinel-2 была в 08:27 UTC. Основываясь на полученных положениях плюма по расположению станций и границы, определённой по спутниковому изображению, была оценена скорость смещения юго-восточной границы плюма, которая увеличивалась от 5 до 13 см/с. Было получено, что граница плюма меняет свое положение с достаточно большой скоростью, что очень важно учитывать при сравнении данных контактных и дистанционных измерений.



Рисунок 53 — Положения границы плюма 26 апреля 2019 г. в 07:30–08:00 UTC (жёлтая линия); в 09:11–09:29 UTC (розовая) и в 10:30–11:00 UTC (зелёная), наложенные на изображение MSI Sentinel-2В, полученное в тот же день в 08:27 UTC. Точки с цифрами — станции

Для проведения совместного анализа были отобраны результаты, полученные 26 апреля, потому что только в этот день в 2019 г. была ясная безоблачная погода. На Рисунке 54 представлена карта концентрации взвешенного вещества, построенная на основе данных MSI Sentinel-2B. Как было показано выше, граница плюма быстро сдвигалась в сторону открытого моря (Рисунок 53), поэтому часть станций, на которых производились измерения *in situ* либо находились внутри плюма, идентифицируемого на спутниковом изображении, либо вне его. Съёмка со спутника была проведена в 08:16 GMT.

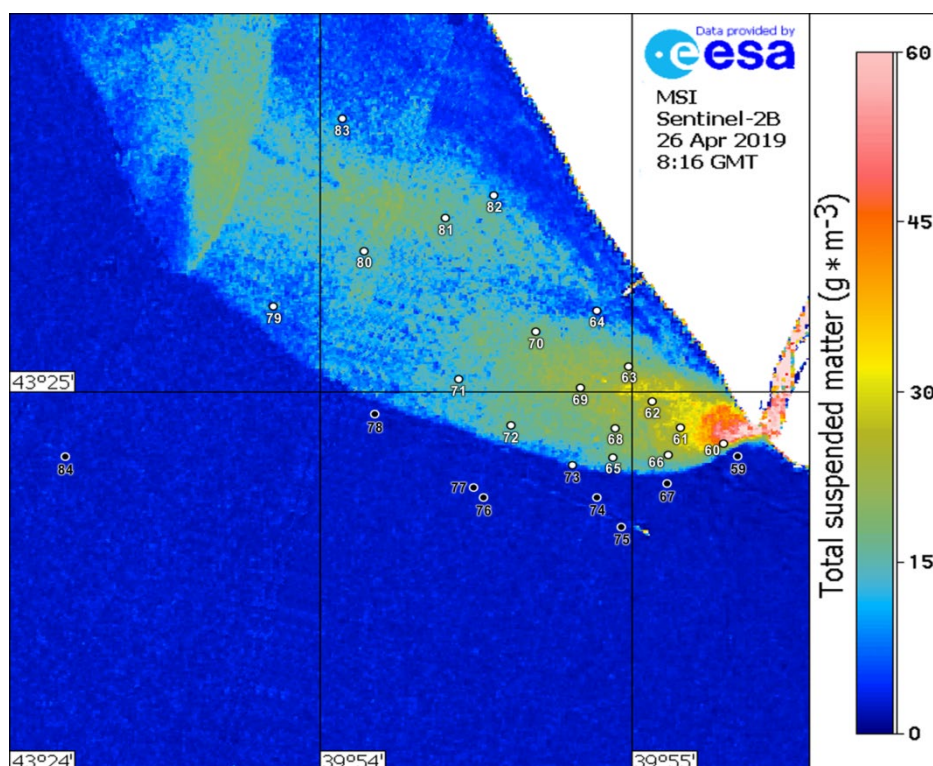


Рисунок 54 — Карта TSM, основанная на данных MSI Sentinel-2B от 26 апреля 2019 с нанесёнными на неё положениями станций измерений с судна в этот же день

Таким образом, все станции можно разделить на три основные группы. К первой группе относятся станции, измерения на которых были проведены в близкое к пролёту спутника время, они располагались внутри плюма, как по данным визуальных наблюдений с судна, так и по спутниковым наблюдениям. Это станции 61–63, 68–72. На Рисунке 55 им соответствуют голубые маркеры, которые аппроксимируются прямой $M2 = 1,353M1$, с $R^2 = 0,99$. Превышение спутниковых значений над значениями концентраций взвешенного вещества, полученными весовым методом, может объясняться тем, что они определяются в некотором объёме, а не просто в точке верхнего горизонта.

Вторая группа станций, отмеченная на Рисунке 55 красным маркером, это станции 65, 66, которые в момент измерений *in situ* находились на границе плюма, а в момент спутниковой съёмки внутри него. Поэтому значения концентрации взвеси по спутниковым данным сильно

превосходят значения натурных измерений. Особо следует отметить серьёзные различия в результатах измерений на станции 60. Эта станция находилась непосредственно у устья, значения TSM (по спутниковым данным) на ней максимальны, они составили $51,8 \text{ г/м}^3$, однако измерений *in situ* показали только $10,5 \text{ г/м}^3$. Возможно, такое несоответствие вызвано тем, что непосредственно у устья отмечаются очень высокие градиенты мутности. Во время отбора проб с судна, измерения могли быть сделаны не в самом стрежне плюма (где величины мутности максимальны). Допустимы небольшие погрешности в координатах, сместившие точку на несколько десятков метров, что вполне достаточно для обнаруженных различий мутности. Также могут влиять сложные условия на мелководье (обрушения, резкое перемешивание, дополнительное отражение от дна) при дистанционном зондировании. Перечисленные факторы могли повлиять на полученные результаты и отрицательную корреляцию между ними.

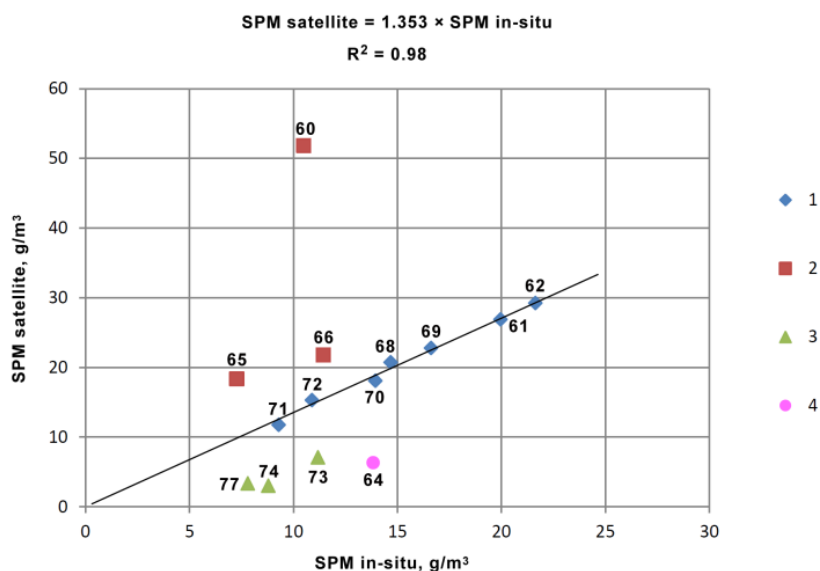


Рисунок 55 — Массовая концентрация взвеси, определённая по результатам взвешивания (горизонтальная ось) и по спутниковым данным (вертикальная ось). Станции группы 1 не изменили своего положения относительно границы плюма за время между пролётом спутника и отбором проб; станции группы 2 находились непосредственно на границе плюма в момент отбора проб. На спутниковом изображении они находятся внутри плюма; станции 3 находились внутри плюма в момент отбора пробы, по спутниковым данным оказались вне плюма; 4 — станция 64, напротив пирса. Линия тренда построена только для группы 1.

Числа у маркеров — номера станций

Третья группа станций (73, 74, 77) находилась внутри плюма во время отбора проб (зелёные маркеры). Но измерения *in situ* на этих станциях проводились через час-полтора после пролёта спутника, когда граница плюма сместилась относительно границы,

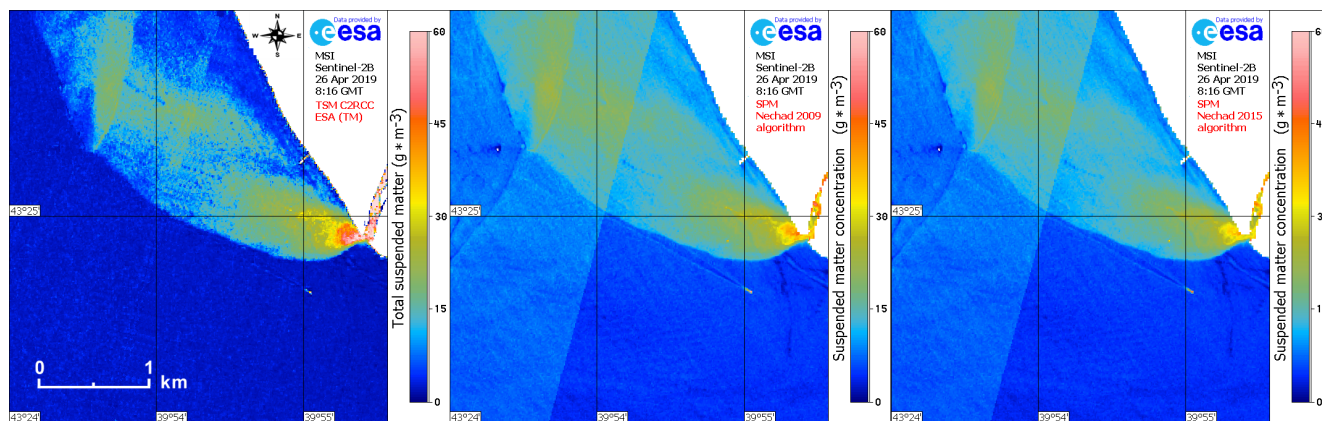
определяемой по спутниковому изображению, почти на 250 м. На спутниковом изображении эти станции находятся вне плюма. Соответственно TSM на этих станциях меньше, чем концентрация взвеси, измеренная *in situ*.

И наконец, отмеченная на Рисунке 55 станция 64 (группа 4), находилась на внутренней границе плюма, которая тоже смещалась, правда не так быстро, как внешняя. Будучи внутри плюма во время измерений *in situ*, она оказалась практически вне его во время спутниковой съёмки. Этим объясняются более высокие значения концентрации взвеси в пробах воды, чем измеренные дистанционно.

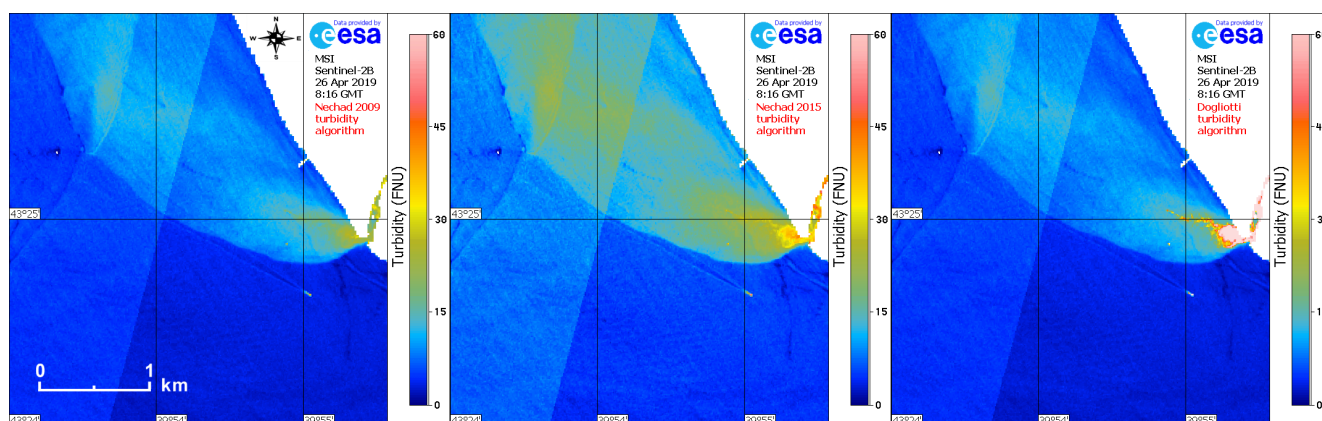
То есть, подводя общие итоги сравнения полученных количественных данных натурными измерениями и данными дистанционного зондирования, можно сделать вывод, что для значений, выполненных на станциях по времени квазисинхронно с пролётом космического аппарата и заведомо находящихся внутри речного плюма (исключая влияние быстродинамического сдвига границы плюма), была получена высокая корреляционная связь ($R^2 = 0,98$). Тем самым была подтверждена возможность использования стандартного алгоритма (C2RCC) для восстановления поля мутности в районе реки Мзымты, при условии небольших значений концентрации взвешенного вещества (от 10 до 50 г/м³). Более подробно о преимуществах и различиях с другими стандартными алгоритмами восстановления поля мутности будет сказано в отдельном параграфе ниже.

4.4.4 Корреляционный анализ концентрации взвешенного вещества и мутности морской воды по данным контактных натуральных измерений и данным дистанционного зондирования с использованием различных спутниковых алгоритмов

Одной из основных целей нашей работы был выбор наилучшего стандартного алгоритма для восстановления поля концентрации взвешенного вещества и мутности по данным дистанционного зондирования с точки зрения корреляции с натурными измерениями. Для восстановления количественных данных о концентрации взвешенного вещества, помимо алгоритма C2RCC, мы использовали Nechad 2009 [Nechad et al., 2010], Nechad 2015 [Nechad et al., 2015] и Dogliotti [Dogliotti et al., 2015]. Карты поверхностного распределения концентрации взвешенного вещества (англ. Total Suspended Matter - TSM, г/м³), построенные для 26 апреля 2019 г. с использованием трёх алгоритмов, показаны на Рисунке 56а.



а



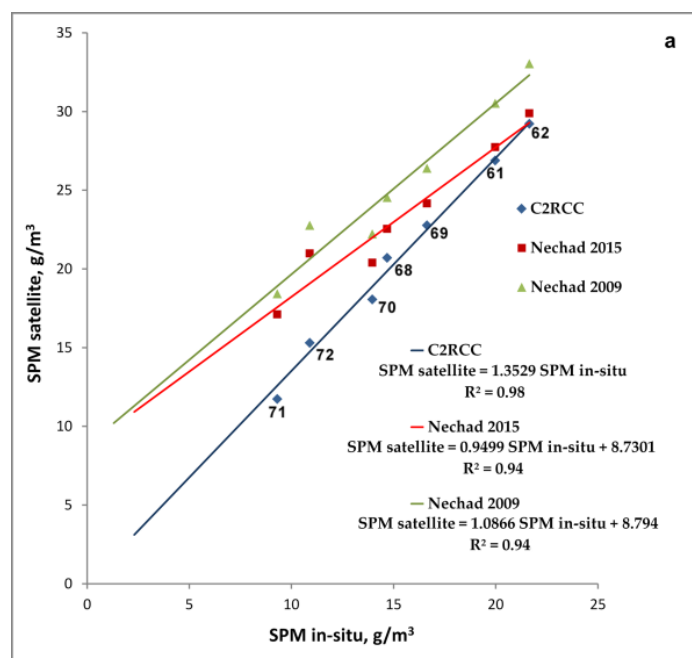
б

Рисунок 56 — Результаты применимости различных спутниковых алгоритмов для восстановления: а — концентрации взвешенного вещества; б — мутности морской воды, рассчитанная на основе данных спутника Sentinel-2B (MSI) для 26 апреля 2019 г.

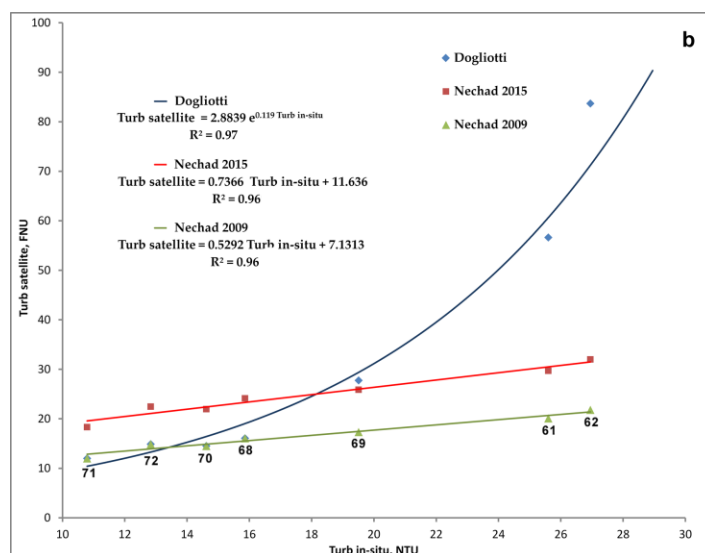
Качественно анализируя эти карты, можно сделать следующие выводы. Результаты C2RCC выглядят довольно зашумленными по сравнению с другими алгоритмами: при низких концентрациях взвешенного вещества соседние значения значительно различаются. Особенности границы плума не выражены. Результаты, рассчитанные при использовании алгоритмов Nechad 2009 и Nechad 2015 более гладкие, и все неоднородности границы плума можно различить. В то же время, три алгоритма дают разные распределения максимальных значений концентрации взвешенного вещества в непосредственной близости от устья Мзымты. На карте C2RCC область максимальных значений TSM значительно больше. Для обработки Nechad 2009, Nechad 2015 и сравнения с C2RCC мы использовали натурные данные только тех станций, которые были выполнены почти синхронно со съёмкой (группа 1, см. Рисунок 55) космического аппарата Sentinel-2B MSI 26 апреля 2019 г.

На Рисунке 57а представлено сравнение концентрации взвешенного вещества, измеренной *in situ* (весовым методом) и с помощью данных дистанционного зондирования, рассчитанной путём применения следующих алгоритмов: C2RCC, Nechad 2009 и Nechad 2015.

Несомненно, результаты C2RCC лучше всего согласуются с данными натурных измерений. Прямая линия аппроксимации для C2RCC проходит через начало координат, коэффициент детерминации $R^2 = 0,98$ (см. Рисунок 57а). Для двух других алгоритмов, Nechad 2009 и Nechad 2015, коэффициенты детерминации составляют только 0,94 для обоих алгоритмов.



a



б

Рисунок 57 — Анализ применимости различных спутниковых алгоритмов по сравнению с результатами натурных измерений, полученных в 2019 г.: а — концентрация взвешенного вещества (SPM), рассчитанная по спутниковым данным и измеренная in situ; б — значения мутности морской воды, полученные путём дистанционного зондирования (Turb satellite) и мутность морской воды, измеренная портативным мутномером in situ (Turb in situ). Номера станций указаны рядом с точками

Основное преимущество алгоритмов, использующие атмосферную коррекцию ACOLITE (см. Главу 2) заключается в том, что их результаты можно сравнивать с данными мутности морской воды, например, измеренными с помощью портативного турбидиметра, без преобразования оптических величин НТУ (в г/м^3) с использованием полученной зависимости (см. Рисунок 51 выше) и, что более важно, без отбора проб воды.

Для количественной оценки мутности мы использовали алгоритмы Nechad 2009, Nechad 2015 и Dogliotti [Dogliotti et al., 2015]. Карты распределения мутности, составленные с использованием этих алгоритмов для 26 апреля 2019 г., показаны на Рисунке 54б. Алгоритмы Nechad 2009 и Dogliotti показали неплохие результаты для низкого диапазона мутности. Вблизи устья Мзымты Dogliotti определённо завышает мутность. Интересно, что результаты, полученные по алгоритму Dogliotti, прорисовывают ярко выраженную струю высокой мутности в западном направлении от приустьевой зоны. Существование такой струи подтверждается, например, натурными измерениями на станциях 61 и 62 (см. Рисунок 54). Хотя станция 62 расположена несколько дальше от устья, но, в отличие от станции 61, она находится на струе и, следовательно, даёт более высокие значения концентрации взвешенного вещества и мутности.

Сравнение мутности, полученной Nechad 2009, Nechad 2015 и Dogliotti (Turb satellite) с мутностью, измеренной *in situ* (Turb *in situ*), представлено на Рисунке 55б. При низкой мутности, менее 16 НТУ (ФНУ), алгоритм Dogliotti даёт те же результаты, что и Nechad 2009. При значениях мутности 20–25 НТУ и выше Dogliotti переходит на другой метод расчёта [Nechad et al., 2010], подходящий для существенно более мутных вод, что в нашем случае в период экспедиционных измерений в апреле – мае 2019 г. не отмечалось.

Значения, полученные по алгоритмам Nechad 2009 и Nechad 2015, хорошо аппроксимируются прямыми линиями (см. Рисунок 57б). Коэффициент детерминации $R^2 = 0,96$ в обоих случаях, и линии почти параллельны.

В 2021 г. из-за большого количества пасмурных дней сравнение количественных характеристик мутности и TSM по спутниковым данным и натурным измерениям было возможно только для двух дней: 30 апреля и 2 мая. Почти полностью безоблачное изображение было получено 2 мая, но по техническим причинам судовые измерения были проведены через 5 ч после пролёта спутника. Учитывая большую изменчивость плюма даже в течение нескольких часов, для анализа были отобраны те станции, которые в течение всего этого времени либо оставались в пределах наиболее мутной области плюма Мзымты, либо, наоборот, за границей наиболее мутной части плюма. Расположение гидрологических станций показано на Рисунке 58а.

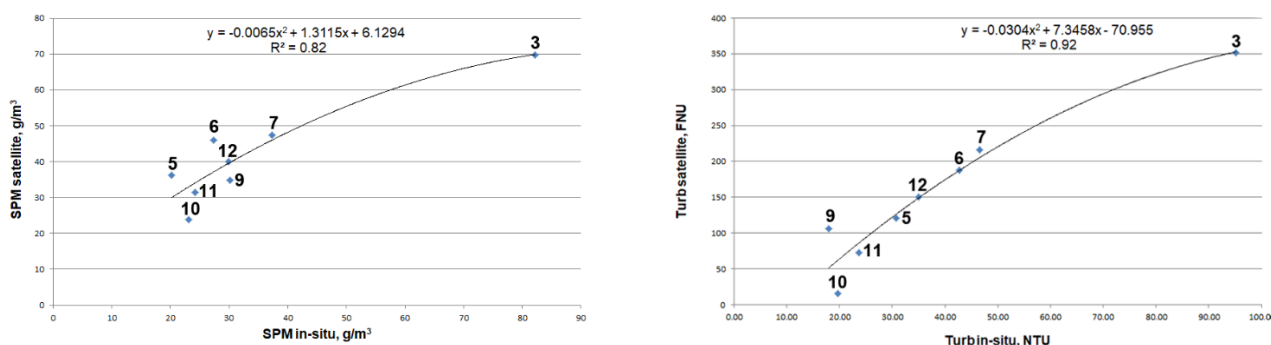


а

б

Рисунок 58 — Фрагмент спутникового снимка MSI Sentinel-2A в районе исследования за 2 мая 2021 г. а — расположение гидрологических станций; б — мутность морской воды, рассчитанная с использованием алгоритма Dogliotti

Как показал анализ данных за 2 мая 2021 г. по TSM и мутности морской воды, определённых по спутниковым данным и измерениям *in situ*, линейной зависимости между данными не наблюдается, какой бы из перечисленных алгоритмов мы ни использовали. Данные аппроксимируются квадратичным полиномом. Причём для TSM максимальный коэффициент детерминации достигается при использовании алгоритма Nechad 2015 и $R^2 = 0,82$ (Рисунок 59а). Более хороший результат получился при сравнении данных по мутности. При использовании алгоритма Dogliotti, который полностью совпадает с алгоритмом Nechad 2015 при мутности менее 40 ФНУ, был получен коэффициент детерминации $R^2 = 0,92$ (Рисунок 59б).



а

б

Рисунок 59 — Сравнение количественных данных дистанционного зондирования и натурных измерений для 2 мая 2021 г.: а — концентрация взвешенного вещества (рассчитанная по алгоритму Nechad 2015); б — мутность морской воды (рассчитанная по алгоритму Dogliotti).

Номера станций указаны сверху над точками. Пространственное расположение гидрологических станций 2 мая 2021 г. продемонстрировано на Рисунке 58а

Таким образом, можно сформулировать следующий вывод: при условии, что наилучшие результаты достигаются при сравнении спутниковых и натурных данных по мутности морской воды, отпадёт необходимость во взятии проб воды для определения концентрации взвешенного вещества, а можно будет определять зависимость только между данными портативного турбидиметра и спутниковыми данными, при этом применяя коэффициенты пересчётов неоднократно упомянутые ранее. Причём для больших значений мутности целесообразнее будет использовать алгоритм Dogliotti.

4.4.5 Масса и минеральный состав взвешенного вещества в приустьевой области, находящейся под влиянием стока реки Мзымты

Концентрация взвешенного вещества в пробах воды, отобранных за весь период исследования в 2019 г., изменялась от 2 до 106 г/м³. С 23 апреля по 2 мая 2019 г. масса взвеси в пробах постепенно увеличивалась: 23–26 апреля максимальные измеренные значения составили 23 г/м³, 28 апреля — 46 г/м³, 1 мая — 65 г/м³, 2 мая — 106 г/м³. Минимальные значения содержания взвеси в пределах плюма (на его границах) за всё время исследований составили примерно 2–3 г/м³.

Таблица 14 — Мутность в приповерхностном слое воды, масса и минеральный состав взвеси

Дата	№ ст.	Мутность морской воды, НТУ*	Концентрация взвешенного вещества в пробе, г/м ³	Кварц, мас.% **	Полевые шпаты, мас.%	Глинистые минералы, мас.%	Карбонатные минералы, мас.%	К** *
26.04	60_1	28	22,8	28	21	42	9	0,67
	64	16	13,8	30	24	46	0	0,65
	65	7	7,3	19	23	45	10	0,43
	69	20	16,6	23	21	45	10	0,51
	70	15	14,0	22	24	45	9	0,49
	71	11	9,3	16	23	38	22	0,42
	79	7	8,6	17	24	45	9	0,38
01.05	98	68	64,5	45	20	27	8	1,67
	99	47	43,1	38	24	32	6	1,19
	101	21	20,0	31	19	44	6	0,70

Дата	№ ст.	Мутность морской воды, НТУ*	Концентрация взвешенного вещества в пробе, г/м ³	Кварц, мас.% **	Полевые шпаты, мас.%	Глинистые минералы, мас.%	Карбонатные минералы, мас.%	К** *
	106	17	14,4	27	19	46	6	0,59
	109	7	7,8	22	12	58	8	0,38
02.05	120	97	83,0	35	16	45	4	0,78
	125	48	33,8	30	15	51	4	0,60
	128	26	19,4	24	27	42	6	0,58
	133	41	34,3	30	14	51	4	0,58
	137	33	27,8	28	19	47	6	0,60

* Мутность морской воды по данным измерений портативного мутномера Apera Ins.

** В процентах от массы взвеси.

*** Коэффициент, равный отношению массы кварца к массе глинистых минералов во взвеси.

Рентгенофазовый анализ минерального состава взвеси показал следующее. В отобранных пробах: 1) кварц составлял 16–45 % от массы взвеси; 2) полевые шпаты — 12–27 %; 3) различные глинистые минералы (каолинит, монтмориллонит, хлорит, гидрослюда, смешаннослойные минералы) — 27–58 %; 4) карбонатные минералы (кальцит, доломит и арагонит) — 0–22 %. С результатами рентгенофазового анализа для каждого измерения 26 апреля, 1 мая и 2 мая 2019 г. можно ознакомиться в Таблице 14.

4.4.6 Изменение мутности воды в зависимости от минерального состава взвешенного вещества в плюме

Гранулометрический состав и концентрация морской взвеси являются ключевыми характеристиками седиментогенеза.

Минеральный состав взвеси, приведённый в Таблице 14, показывает значительные вариации содержания минералов в различных пробах воды. Количественное соотношение минеральных фаз в составе взвеси зависит от разных факторов.

Размер взвешенного в воде материала, выносимого с речным стоком, может изменяться от первых микрон (~0,001 мм) до нескольких десятков долей миллиметра (~0,20 мм). Для каждой реки характерно своё уникальное соотношение тонко-, мелко-, средне- и

грубообломочного материала в воде в пределах зоны выноса. Это приводит к тому, что одни и те же значения НТУ в разных регионах отражают разное массовое содержание взвеси. Для получения объективных данных о количестве взвеси в пробах необходимо строить корреляционную зависимость между их оптическим показателем и массовой концентрацией взвеси.

Пробы с большими значениями мутности, в основном свойственные приустьевым зонам, характеризуются большим количеством кварца. Например, в пробах от 1 мая 2019 г. из приустьевой зоны отмечается относительно высокая мутность (до 68 НТУ) и преобладание кварца над суммарным количеством глинистых минералов (Рисунок 60).

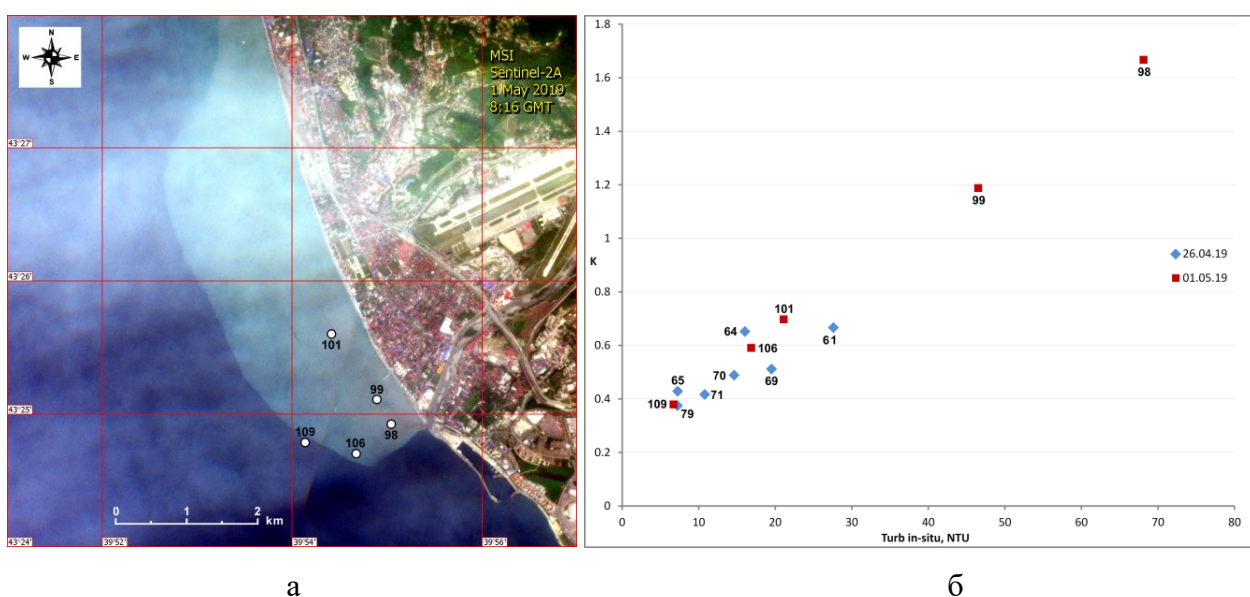


Рисунок 60 — Фрагмент спутникового изображения Sentinel-2A MSI от 1 мая 2019 г. в районе выноса р. Мзымта. Метки указывают расположение станций, где были взяты пробы для рентгенофазового анализа (а); отношение процентного содержания кварца в сухом веществе суспензии к процентному содержанию глинистых минералов (К) в зависимости от мутности, измеренной портативным турбидиметром (Turb in situ, NTU) (б). Номера станций указаны рядом с метками. Расположение станций 26 апреля (синие метки) показано на Рисунке 54 (выше по тексту)

При удалении от устья реки уменьшается количество взвеси в воде и меняется её минеральный состав. Происходит относительное увеличение количества глинистых минералов и уменьшение содержания кварца. Пробы с небольшими показателями мутности, отобранные на кромке плюма, характеризуются существенным преобладанием глинистых минералов в составе взвеси.

Данный результат хорошо согласуется с общеизвестной теорией гравитационной дифференциации материала, согласно которой, уменьшение размерности частиц происходит

по мере удаления от береговой зоны [Грабцевская, 1990]. Глинистые минералы имеют низкую твёрдость и низкую плотность, проще поддаются механическому выветриванию и формируют более мелкообломочный материал, способный переноситься на большие расстояния. Для кварца характерна более высокая твёрдость и плотность, поэтому при механическом разрушении из него преимущественно образуется более грубообломочный материал, который в большей степени откладывается в непосредственной близости к устью.

Ещё одним положительным результатом можно считать тот факт, что была получена высокая взаимосвязь между станциями, расположенными в разных частях речного плюма и выполненными в разные дни, но имеющими близкие значения НТУ и близкий минеральный состав (например, станция 109 от 1 мая и станция 79 от 26 апреля или группа станций 101, 106 и 69).

Установлена корреляция между значениями мутности проб воды (НТУ) и массовой концентрацией взвеси в пробах (С). В пробах с небольшим содержанием взвеси отмечается простая линейная зависимость между этими величинами, описываемая уравнением $НТУ = 1,197С \cdot 10^3$. При увеличении количества взвеси наблюдаются отклонения от линейной зависимости, как правило, выраженные в занижении значений НТУ. Несмотря на отклонения от линейного тренда при экстремальных значениях мутности, мы предлагаем считать полученную формулу — *универсальной корреляционной зависимостью* между массой взвешенного вещества и её значений мутности, характерной для данного региона и применимой для большей части года.

4.5 Выводы к главе 4

1. Изучена и описана гидрологическая структура прибрежной зоны, находящейся под влиянием речного стока р. Мзымта. Выделена область, за пределами которой уменьшение/увеличение исследуемых характеристик происходит постепенно и незначительно между соседними точками. Назовём условно этот процесс «выходом на стационарный режим». Данная область располагается на расстоянии 200–400 м от береговой зоны (в зависимости от интенсивности стока). Другими словами, используя термины гидрологов, границу этой области можно обозначить границей маргинального фильтра.
2. Установлено, что для проявления чёткой границы плюма на спутниковых изображениях достаточно тонкого подповерхностного слоя с небольшими величинами мутности (по нашим данным ≤ 5 ФНУ).
3. Установлено, что по мере распространения в море речных вод изменение основных параметров морской воды (температуры, солёности, мутности) происходит неравномерно.

Это зависит как от скорости и расхода речного выноса, так и особенностей прибрежных течений, которые в данном районе крайне неоднородны. Совокупность внешних факторов и бароклинной неустойчивости на границе плюма приводит к затокам морских вод через фронтальную зону плюма. Вследствие этого в приустьевой зоне р. Мзымта образуются локальные области увеличения/уменьшения мутности и солёности. Это также справедливо и для Балтийского плюма вод Калининградского залива.

4. Получено, что, несмотря на километровые пространственные (поверхностные) размеры плюма, глубина «интрузии» речных вод составляет не более 3–4 м (в том числе при значительных расходах реки). В поле мутности морских вод (по данным измерений *in situ*) речные воды представлены более мощным слоем, чем, например, в поле солёности. В приустьевой зоне в приповерхностном слое значения T , S и $Turb$ могут отличаться в несколько раз (для мутности в десятки раз) по сравнению со значениями на 5 м или на станции в 200 м от берега. В результате установлено, что наиболее характерный параметр для идентификации речного плюма — мутность морской воды. Только после этого солёность и в меньшей степени температура.
5. На основе спутникового мониторинга и многолетних натурных измерений предложена классификация форм речных плюмов. Проведённое исследование подтвердило предложенные ранее закономерности об особенностях распространения речного плюма Мзымты в зависимости от ветрового режима. Плюмы изотропной формы образуются при отсутствии ветра или при слабых ветрах (1–2 м/с). Они обладают наибольшей площадью (18,2 км²). При сгонных северо-восточных ветрах образуется узкий и сильно вытянутый в юго-западном направлении шлейф малой площади. При воздействии ветров юго-западных румбов плюм прижат к берегу и незначительно распространяется в обе стороны от устья.
6. Впервые оценены мелкомасштабные скорости смещения границы речного плюма Мзымты и их связь с направлением ветра. Было получено, что при слабых ветрах южных, юго-восточных румбов смещение границы минимально: за три часа со скоростью 0,02–0,03 м/с она смещается на 250–350 м «прижимными» ветрами в сторону или вдоль береговой зоны (23 и 25 апреля). Максимальное смещение границы речного плюма отмечалось при западных румбах (26 апреля): за три часа граница сместилась на 900 м мористее ($V = 0,08$ м/с).
7. Получена формула преобразования оптических единиц мутности НТУ в гравиметрические г/м³ для района исследования в период весеннего паводка: $m = 0,84Turb$, где m — массовая концентрация взвеси в пробах.
8. Проведённый корреляционный анализ данных о концентрации взвешенного вещества и мутности морской воды по данным контактных натурных измерений и данным

дистанционного зондирования с использованием различных спутниковых алгоритмов показал, что при малых значениях мутности и концентрации взвешенного вещества в исследуемом районе результаты применения алгоритмов C2RCC и Nechad 2015 лучше всего согласуются с данными натурных измерений. Выявлена линейная зависимость с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,98$. Для больших значений мутности (более 100 НТУ) вод плюма реки Мзымты целесообразнее использовать алгоритм Dogliotti.

9. Определена масса и минеральный состав взвешенного вещества в приустьевой области, находящейся под влиянием стока реки Мзымта. В результате рентгенофазового анализа установлена зависимость между минеральным составом взвеси мутностью воды в пробах. Получено, что в пробах с большими значениями мутности, характерно преобладание кварца над суммарным количеством глинистых минералов. При удалении от устья реки уменьшается количество взвеси в воде и меняется её минеральный состав. Происходит относительное увеличение количества глинистых минералов и уменьшение содержания кварца. Пробы с небольшими показателями мутности, отобранные на кромке плюма, характеризуются существенным преобладанием глинистых минералов в составе взвеси.

ГЛАВА 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЮМОВ РЕК ТЕРЕК И СУЛАК НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

5.1 Основные физико-географические особенности района исследования в северо-западной части Каспийского моря

5.1.1 Каспийское море

Каспийское море — самый большой замкнутый водоём мира, расположенный в глубине Евразии. Каспийское море омывает берега России, Казахстана, Туркменистана, Ирана и Азербайджана. Оно занимает обширную депрессию в земной коре, а уровень моря в настоящее время находится ниже уровня Мирового океана на 28,5 м. Площадь Каспия в этих условиях — около 370 тыс. км², объём воды — около 78 тыс. км³, средняя глубина — 208 м, наибольшая глубина — 1025 м. С севера на юг море вытянуто на 1030 км, при ширине от 200 до 400 км. Обширные размеры и большая меридиональная протяжённость определяют его климатические особенности и природное разнообразие различных районов Каспийского моря [Гидрология..., 1992; Зонн, 2004; Каспийское..., 1986, 1987; Kostianoy, Kosarev, 2005].

По физико-географическим условиям и характеру рельефа дна *море делится на три части*: Северный, Средний и Южный Каспий (Рисунок 61). Мелководная (до 15–20 м) северная часть моря целиком расположена на шельфе. Мангышлакским порогом она отделяется от Дербентской котловины Среднего Каспия с максимальной глубиной 788 м. Подводный Апшеронский порог с глубинами над ним до 160–180 м отделяет Дербентскую котловину от Южнокаспийской котловины, где находится максимальная глубина моря. Условными границами между Северным и Средним Каспием служит линия остров Чечень – мыс Тюб-Караган, а между Средним и Южным Каспием — линия остров Жилой – мыс Куули. Объём вод этих частей моря равен соответственно 0,5; 33,9 и 65,6 % общего объёма моря [Лаврова и др., 2022a].

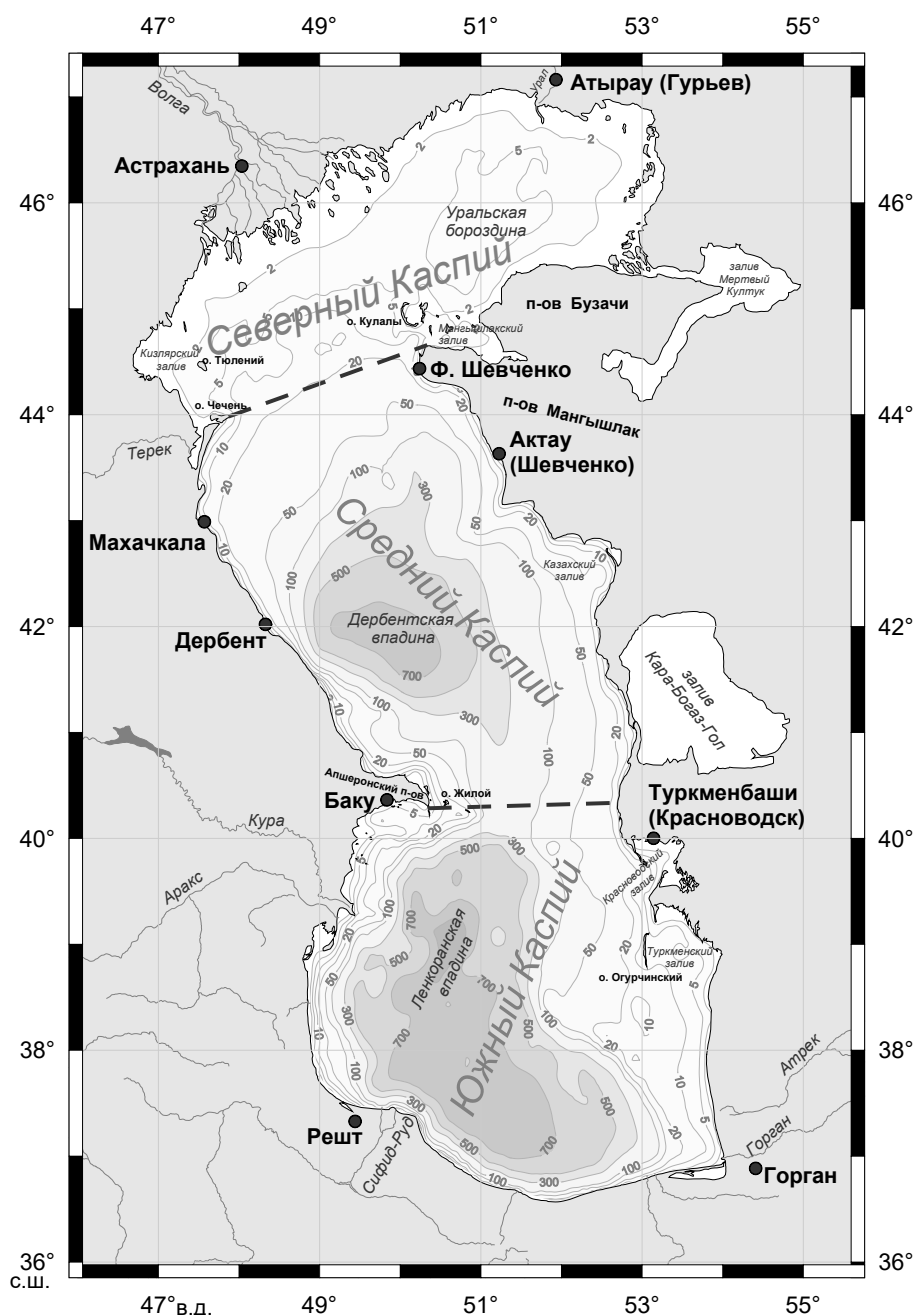


Рисунок 61 — Карта Каспийского моря [Лебедев, Костяной, 2005]

В общей сложности в Каспий впадают около 130 больших и малых рек, ежегодно поставляющих в него около 300 км^3 воды. Основной объём стока приносят реки Волга (80 %), Урал (5 %), Терек, Сулак, Самур (в сумме 5 %) и Кура (6 %). Сток рек иранского побережья, малых рек Кавказа и прочих составляет примерно 4 %. В приходной части водного баланса речной сток составляет в среднем 74–85 % [Гидрология..., 1992; Каспийское..., 1986; Водный..., 2016]. По данным за 1900–1990 гг. среднемноголетний суммарный речной сток составил примерно $300 \text{ км}^3/\text{год}$ [Смирнова, 1968; Шикломанов, 1976; Георгиевский, 1982].

С 1881 по 2013 г. наименьший сток наблюдался в 1898 и 1973 гг. — 162 км^3 , а максимальный — 368 км^3 в 1926 г. Водосборный бассейн моря охватывает площадь $3,5 \text{ млн км}^2$. Соотношение площадей моря и водосборного бассейна (1:10) объясняет

существенное влияние процессов, происходящих в бассейне моря, на его природный облик. Речная сеть в пределах Каспийского моря распределена очень неравномерно. Все основные реки впадают в Северный Каспий и в западную часть моря. Среднегодовой сток этих рек Волги, Урала, Терека, Сулака, Куры превышает 90 % суммарного стока всех рек в море. Остальная его часть приходится на реки Ирана и мелкие водотоки западного побережья Каспия. Восточное побережье моря полностью лишено постоянного речного стока в море.

Гидрологический режим Каспийского моря. Температура воды подвержена значительным широтным изменениям, наиболее отчётливо выраженным в зимний период, когда температура изменяется от 0–0,5 °C у кромки льда на севере моря до 10–11 °C на юге. При этом у западного побережья моря температура воды ниже благодаря переносу на юг холодных вод с севера, а вдоль восточного побережья моря выше в связи с поступлением на север более тёплых южно-каспийских вод. Для мелководных районов с глубинами менее 25 м годовая амплитуда может достигать 25–26 °C. В среднем температура воды у западного побережья на 1–2 °C выше, чем у восточного берега, а в открытом море температура воды выше, чем у побережий, на 2–4 °C. В апреле – мае область минимальных температур перемещается в Средний Каспий, что связано с более быстрым прогревом вод в мелководной северной части моря. В начале сезона в северной части моря большое количество тепла тратится на таяние льда, но уже в мае температура повышается здесь до 16–17 °C. В средней части моря температура в это время составляет 13–15 °C, на юге увеличивается до 17–18 °C. Весенний прогрев воды выравнивает горизонтальные градиенты, и разность температур между прибрежными районами и открытым морем не превышает 0,5 °C. В июне – сентябре наблюдается горизонтальная однородность в распределении температуры в поверхностном слое. В августе, который является месяцем наибольшего прогрева, температура воды по всему морю составляет 24–26 °C, в южных районах возрастает до 28 °C. В августе температура воды в мелководных заливах, например, в Красноводском, может достигать 32 °C [Гидрология..., 1992; Каспийский..., 2019].

Летом вдоль всего восточного побережья Среднего Каспия и в северной части Южного Каспия наблюдается *апвеллинг*. Подъем холодных глубинных вод происходит с различной интенсивностью в результате воздействия преобладающих в летний сезон северо-западных ветров. Ветер данного направления вызывает отток тёплых поверхностных вод от берега и подъем более холодных вод из промежуточных слоёв. Начало апвеллинга приходится на июнь, однако наибольшей интенсивности он достигает в июле – августе. Как следствие, на поверхности воды наблюдается понижение температуры до 7–15 °C. Горизонтальные градиенты температуры достигают 2,3 °C на поверхности и 4,2 °C на глубине 20 м. Очаг апвеллинга постепенно смещается с 41–42° с.ш. в июне к 43–45° с.ш. в сентябре. Апвеллинг имеет большое значение для Каспийского моря, в корне меняя динамические процессы на

обширной глубоководной акватории [Гидрология..., 1992; Гинзбург и др., 2006, 2020; Каспийский..., 2019].

Солёность Каспийского моря характеризуется диапазоном величин от 0,2–0,3 до 13,0–13,5‰. Средняя солёность моря в целом за последние 50–60 лет характеризуется значениями 12,82–12,86 ‰. Поле солёности испытывает пространственно-временные изменения, но их степень неодинакова в разных районах моря и от сезона к сезону. Зимой наблюдается общее увеличение солёности с северо-запада на юго-восток. На подавляющей части пространств моря солёность равна 12,8–13,0 ‰. Лишь в районе Апшеронского порога выделяется «язык» вод с солёностью 12,6 ‰. Он формируется распреснёнными водами,двигающимися с севера на юг вдоль западного берега и приносимыми из Южного Каспия в Средний по западной периферии антициклонального круговорота. Солёность более 13,0 ‰ наблюдается в юго-восточной части моря — районе, наименее подверженном распресняющему влиянию рек [Добровольский, Залогин, 1982].

Величина и распределение температуры и солёности в море обуславливают *особенности поля плотности*. Поскольку солёность в Каспийском море довольно однообразна, а температура изменчива, плотность определяется главным образом температурой. Изменения плотностной структуры вод в открытых глубоких районах Каспийского моря охватывают верхний 100-метровый слой летом, а зимой они прослеживаются и в более глубоких горизонтах. Основные черты вертикального распределения океанологических характеристик в Каспийском море во многом определяются влиянием перемешивания вод.

Общая циркуляция вод Каспийского моря формируется под воздействием ветра, пространственной неравномерности поля плотности, силы Кориолиса, конфигурации берегов и рельефа дна. В северной части моря, кроме того, имеют значение речной сток и колебания уровня. Совокупность этих факторов обуславливает сложную картину течений, которые образуют в общем циклоническую циркуляцию вод. Под влиянием преобладающих ветров северных румбов создаётся дрейфовый поток вод из северной части моря вдоль его западного берега на юг. Апшеронский полуостров делит это течение на две ветви. Одна из них (главная) огибает Апшерон и движется на юг до Иранских берегов, где поворачивает на восток, а вблизи шельфа восточного берега — на север, проникая в среднюю и северную часть моря. Другая ветвь отклоняется Апшеронским полуостровом на восток и у восточных берегов соединяется с водами, идущими на север. У полуострова Мангышлак эти воды частично отклоняются на запад и замыкают циклонический круговорот в Среднем Каспии, частично уходят в северную часть моря. В Южном Каспии, между Апшероном и устьем Куры, образуется местная антициклональная циркуляция.

Скорость и устойчивость дрейфовых течений в средней и южной части моря изменяются в зависимости от силы и продолжительности ветра и неодинаковы от места к месту. По инструментальным наблюдениям наиболее значительные скорости (до 80 см/с) отмечаются у западных берегов Среднего Каспия при сильных северных ветрах. При слабых и неустойчивых ветрах этих направлений течения имеют скорость 5–10 см/с, а при умеренных ветрах 30–40 см/с. У восточных берегов в соответствии с ветрами преобладают течения со скоростью до 10 см/с, но наблюдаются потоки со скоростями до 30 см/с.

Первостепенный интерес для Каспийского моря имеет изучение долговременных колебаний его уровня (Рисунок 62), которые существенно влияют на все основные процессы, происходящие в водоёме, а также на хозяйственную деятельность на его побережье. К основным факторам, вызывающим долговременные колебания уровня Каспия, относятся геологические (изменения ёмкости морской впадины в результате тектонических движений) и климатические (вариации водного баланса моря). За последние 2000 лет величина изменений уровня составила 7 м.

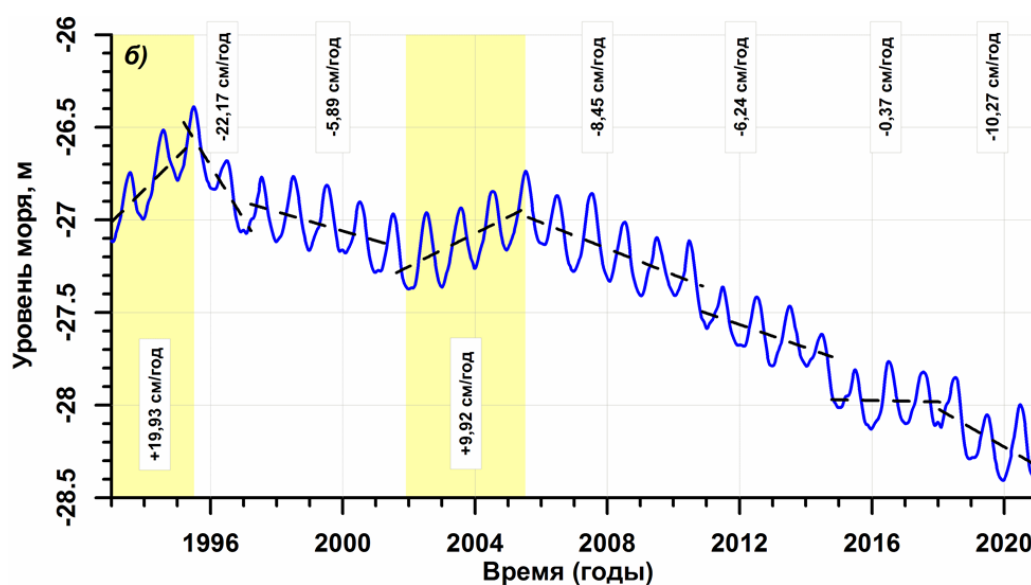


Рисунок 62 — Сезонная (сплошная линия) и межгодовая (пунктир) изменчивость аномалий уровня Каспийского моря (в см) с января 1993 г. по декабрь 2020 г. по данным альтиметрических измерений спутников TOPEX/Poseidon (англ. Topographic Experiment) и Jason-1, -2, -3 [Костяной и др., 2022].

Наибольшие прогнозируемые понижения уровня с 2020 г. до конца столетия дают результаты моделирования в работе [Nandini-Weiss et al., 2020]: 9 и 18 м или 8 и 16 м для сценариев антропогенного выброса парниковых газов в атмосферу RCP4.5 и RCP8.5 соответственно. При падении уровня на 9 или 18 м поверхность Каспия уменьшится на 23 или 34 %, при этом Северный Каспий и залив Кара-Богаз Гол полностью исчезнут, что может

привести к экологической катастрофе и социально-экономическим проблемам в Каспийском регионе [Prange et al., 2020].

Каспийская программа по защите окружающей среды отмечает, что Каспийское море подвержено возрастающему антропогенному воздействию. В результате, наблюдается рост эвтрофикации вод, загрязнение вод нефтепродуктами, тяжёлыми металлами, химическими продуктами, а также катастрофическое уменьшение биологических ресурсов Каспийского моря. Основными источниками нефтяного загрязнения моря являются: речной сток; промышленные и муниципальные стоки; добыча нефти в море и на берегу; транспортировка нефтепродуктов [Лаврова и др., 2011, 2016].

Коллапс наблюдательной сети на Каспии делает использование спутниковой информации для оперативного контроля экологического состояния, нефтяного загрязнения и колебаний уровня Каспийского моря безальтернативным.

5.1.2 Шельфовая зона северо-западной части Среднего Каспия. Реки Терек и Сулак

Шельфовая зона северо-западной части Среднего Каспия, простирающаяся от Аграханского полуострова до Махачкалы, характеризуется малыми глубинами, которые в среднем не превышают 20 м. В данном районе впадают две реки — Терек и Сулак (Рисунок 63).



Рисунок 63 — Район исследований в северо-западной части Среднего Каспия

Район дельты реки Терек является одним так называемым «уязвимым» местом в Каспийском море. Река Терек несёт в море много терригенного вещества, аккумуляция которого способствует выдвиганию дельты в море, даже в условиях повышения уровня моря. При понижении уровня выявляются дальнейшие изменения в зоне выдвигания дельты Терека, характеризующиеся образованием береговых баров, островков и лагун [Кравцова, Митькиных, 2013]. В районе дельты реки Терек находится Аграханский заказник (биосферный заповедник), в котором обитают редкие виды птиц, в частности кудрявые пеликаны.

Река Терек берёт начало на склоне Главного Кавказского хребта в Труссовском ущелье, из ледника горы Зилга-Хох на высоте 2713 м над уровнем моря. Протекает по территориям Грузии, Северной Осетии, Кабардино-Балкарии, Ставропольского края, Чечни и Дагестана. Длина реки — 623 км, площадь водосборного бассейна — 43 200 км². Впадает в Каспийское море, образуя дельту (площадь около 4000–6000 км²). Объём водного стока 11,1 км³/год, сток взвешенных наносов около 15,4 млн т/год. Терек относится к рекам тянь-шанского типа водного режима с растянутым летним половодьем, осложнённым летними паводками. Половодье в низовьях реки начинается в мае и продолжается около 150 дней.

Бассейн *реки Сулак* занимает часть предгорий и горных склонов Большого Кавказа, а также Прикаспийскую низменность. Сулак берет начало в месте слияния рек Андское Койсу и Аварское Койсу. Длина Сулака составляет 169 км. В горах Сулак имеет типично горное течение, полугорное (16 % длины) в предгорьях и равнинное в Прикаспийской низменности. При впадении в Каспийское море Сулак образует дельту площадью около 44 км². Средний расход воды составляет 126 м³/с. Объём водного стока 4 км³/год.

Сулак зарегулирован двумя водохранилищами: Чирюртовым и более крупным Чиркейским, расположенным в 142 км от моря. На Чиркейском водохранилище вода сбрасывается ежедневно через турбину ГЭС и объём сброса может довольно сильно меняться изо дня в день. Примерно раз в год осуществляется сброс через водосброс, но это не связано с повышением уровня воды в водохранилище. Естественная мутность воды во время паводков когда-то могла достигать 40 кг/м³ (при среднегодовом значении 3,09 кг/м³). При регулировании стока реки на Чиркейском водохранилище мутность воды снизилась до 380 г/м³, а объём взвешенных наносов в устье реки уменьшился с 14,7 до 1,6 млн т/год.

Устье Сулака может быть отнесено к дельтово-эстуарному типу: устьевая область включает дельту и эстуарные водоёмы лагунного типа — бухту Сулак и продольные узкие лагуны, отделённые от моря береговыми барами. Водным режим реки Сулак так же как и у реки Терек относится к рекам тянь-шанского типа с осложнённым паводками летним половодьем. Питание реки смешанное — снеговое, подземное, дождевое и ледниковое. В пределах устья реки Сулак находится пос. Сулак, рыбохозяйственные и рыбоперерабатывающие предприятия малого типа.

Судя по спутниковым данным, плюм реки Терек распространяется на бóльшие расстояния, чем плюм реки Сулак. Одна из возможных причин этого большая дисперсность взвешенных в воде частиц. Известно, что при движении воды происходит частичное осаждение и гидромеханическая дифференциация минерального вещества. От устья к краю плюма уменьшается количество взвеси, размерность частиц и их фазовый состав. Поэтому одна из поставленных в данной работе задач требовала рассмотреть минеральный состав плюмов этих рек и проверить связь между мутностью воды в плюме и минеральным составом взвеси.

Следует отметить, что спутниковый мониторинг и подспутниковые измерения в данном районе никем ранее не проводились.

5.2 Результаты спутникового мониторинга плюмов рек Терек и Сулак

Спутниковый мониторинг приустьевых зон рек Терек и Сулак проводился в период 2014–2022 гг. и базировался на данных оптических сенсоров MSI Sentinel-2A, -2B, OLI Landsat-8 и OLI-2 Landsat-9 (с 2022 г.) с использованием возможностей информационной системы See the Sea. Примеры проявлений плюмов на цветосинтезированном изображении в псевдоестественных цветах после атмосферной коррекции сенсора MSI Sentinel-2A представлены на Рисунке 64.

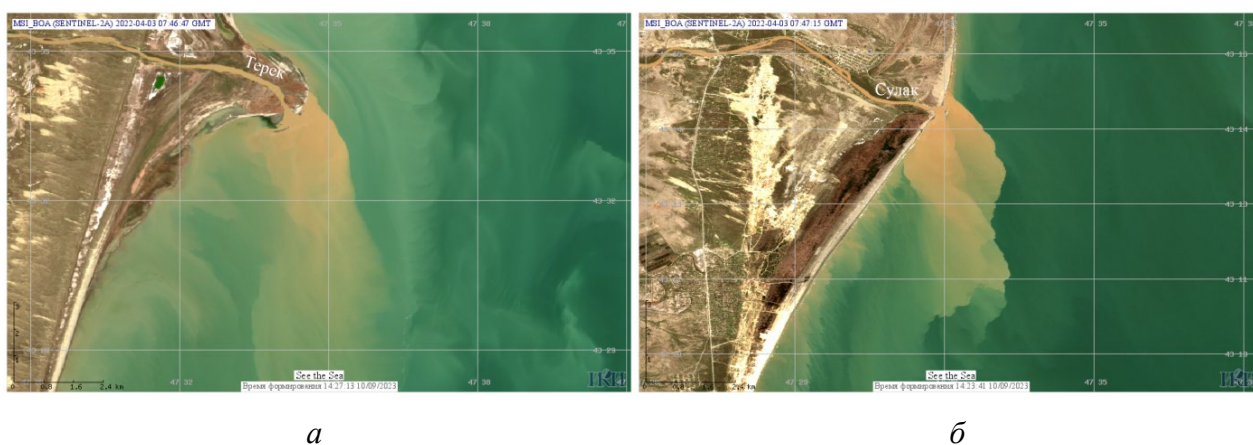


Рисунок 64 — Проявление плюмов реки Терек (*a*) и реки Сулак (*б*) на цветосинтезированном изображении (4-й, 3-й, 2-й спектральные каналы) сенсора MSI Sentinel-2A, полученном 3 апреля 2022 г.

Всего было обработано и проанализировано 1210 изображений приустьевой зоны реки Сулак, из них 43 % (525 изображений) были получены в безоблачную или малооблачную

погоду. На этих 525 оптических изображениях было выявлено 307 случаев проявлений пюма, что составляет 58 % от информативных изображений (Приложение К, Таблица К.1).

Для реки Терек за период мониторинга было обработано и проанализировано 1163 изображений, из них также 43 % (499 изображений) были получены в безоблачную или малооблачную погоду. На этих 499 оптических изображениях было выявлено 390 случаев проявлений пюма, что составляет 78 % от информативных изображений (Приложение К, Таблица К.2).

Для каждого выявленного случая проявления пюмов этих рек на спутниковых изображениях с помощью инструментария STS проводилось оконтуривание областей с большой мутностью, и полученные контуры заносились в тематическую базу данных системы STS. Полученные результаты позволили не только составить карту границ пюмов за весь период мониторинга, но и для каждого случая получить значения площади пюма. Полученные с помощью интегрированного в систему STS картографического интерфейса карты границ пюмов рек Терек и Сулак представлены на Рисунке 65.

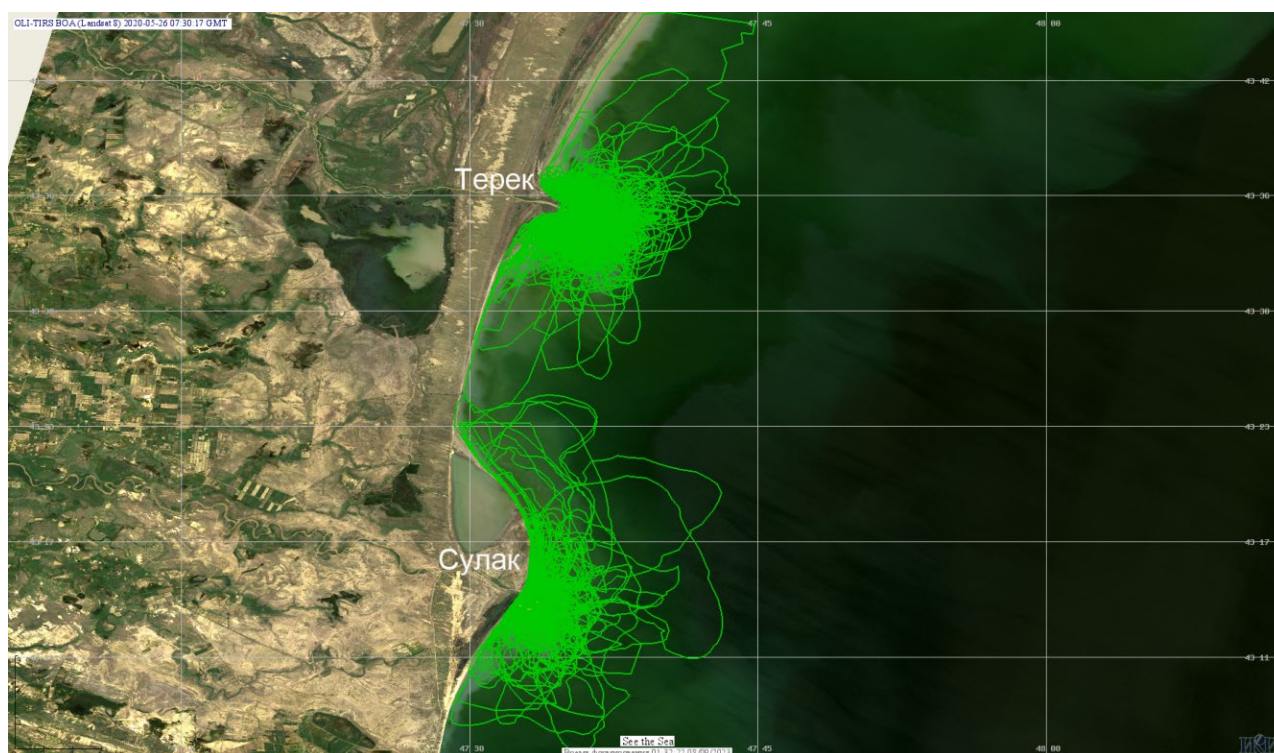


Рисунок 65 — Сводная карта границ пюмов рек Терек и Сулак, выявленных по спутниковым данным видимого диапазона за 2014–2022 гг.

На основе анализа данной карты было определено, что 73 км береговой черты потенциально подвержены загрязнению, попадающему в море с водами рек Терек и Сулак. Максимальное удаление в границы пюма реки Терек (перпендикулярно берегу) составляет 12 км, для реки Сулак — 14 км.

Анализ индивидуальных площадей плумов показал, что средняя площадь плума реки Терек составляла 12 км^2 , максимальная площадь была выявлена 20 июня 2022 г., она составила 155 км^2 . Для реки Сулак средняя площадь плума составляла 9 км^2 , максимальная площадь была выявлена 23 марта 2014 г., она составила 212 км^2 .

Направление распространения плума зависит от направления ветра и сформированного ветром вдольберегового течения. Их влияние проявляется в течение полусуток. Постоянного сильного течения, аналога Основного черноморского течения, в Каспийском море не существует. При восточном ветре, т.е. ветре перпендикулярном берегу, плум распространяется вдоль берега в северном направлении. Следует отметить, что при одном и том же направлении ветра направление распространения выносов этих двух рек может несколько отличаться, хотя расстояние между устьями составляет всего 37 км. Это объясняется, прежде всего, разной формой устьев этих рек, у Терека устье ориентировано на юг, у Сулака — на восток, практически перпендикулярно берегу.

Анализ полученных спутниковых изображений показал, что проявляется ярко выраженная пространственная асимметрия в направлении распространения выносов. Для обеих рек на большом временном интервале (2014–2022) существует доминирующее направление распространения, а именно юго-восточное. Для Терека на это направление приходится 27,7 % от общего количества всех направлений, а для Сулака — 36,8 %. Если для реки Терек южное направление практически сравнимо с юго-восточным (26,7 %), то для реки Сулак вторым по значимости является восточное направление — 23,5 %. Этот факт наглядно отражает представленная на Рисунке 66 диаграмма направлений распространения выносов.

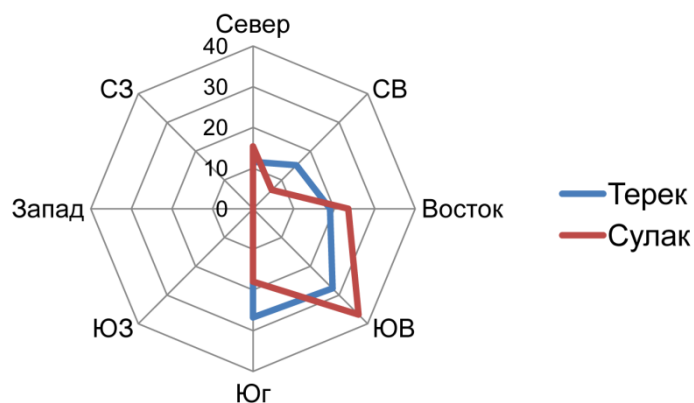


Рисунок 66 — Диаграмма распределения направления распространения выносов рек Терек и Сулак, построенная по результатам анализа спутниковых изображений за 2014–2022 гг.

Анализ спутниковых данных позволил проследить сезонную изменчивость проявлений плумов рек Терек и Сулак на изображениях видимого диапазона. На Рисунке 67 показана доля (в %) проявлений плумов для каждой реки, выявленных в каждый конкретный месяц на спутниковых изображениях за 2014–2022 гг. Видно, что более 60 % проявлений плумов,

выявленных по спутниковым данным, приходится на май – август. Поскольку питание этих рек смешенное, большое значение имеет паводок, связанный с таянием снега в горах. Для Сулака, для которого расстояние от гор до устья меньше, чем у Терека максимум половодья приходится на конец мая начало июня. А для Терека этот период продлевается до июля.

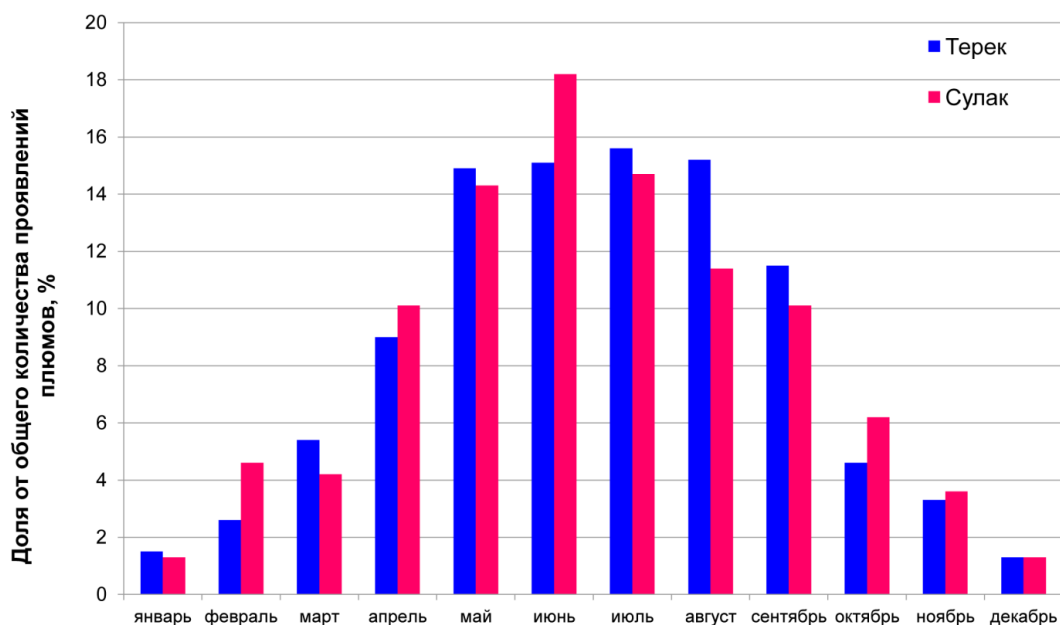


Рисунок 67 — Ежемесячное распределение количества проявлений плумов, выявленных на спутниковых изображениях за 2014–2022 гг.

Исходя из этих показателей, было принято решение проводить подспутниковые измерения в приустьевых зонах рек Терек и Сулак в начале июня.

5.3 Результаты натурных измерений

Как уже было сказано ранее, мелководная шельфовая зона в северо-западной части Среднего Каспия находится под влиянием материкового стока рек Терек и Сулак. Серия подспутниковых натурных измерений в 2023 г. в условиях безоблачной погоды над районами исследования позволила получить уникальные для этого региона данные о влиянии речного стока на гидрологическую структуру прибрежных вод республики Дагестан.

5.3.1 Результаты исследования трёхмерной структуры плума реки Терек

В районе выноса реки Терек 2 и 5 июня 2023 г. синхронно со спутниковой съёмкой прибора MSI спутника Sentinel-2B, было выполнено две серии продольных и поперечных разрезов (всего было выполнено четыре разреза), пересекающих исследуемый плум.

Фрагмент спутникового изображения в квазиестественных цветах True Color (каналы 4, 3, 2) MSI Sentinel-2B и расположение CTD-зондирований 2 июня 2023 г. представлены на Рисунке 68. Сетка CTD-станций, выполненная 5 июня 2023 г. продемонстрирована на Рисунке 68.



Рисунок 68 — Фрагмент спутникового цветосинтезированного изображения Sentinel-2B (MSI) за 2 июня 2023 г. Номера и положение CTD-измерений отмечены цветом: разрез № 1 (а), разрез № 2 (б). Красным цветом на изображении слева схематично обозначен пакет внутренних волн

На спутниковом изображении от 2 июня 2023 г. видно, что в момент съёмки речной плюм Терека имел сложную форму, представляющую из себя два грибовидных образования чуть севернее и южнее устья с общей куполовидной фронтальной зоной «плюм – море». Максимальная протяжённость выноса из реки не превышает 4 км от береговой зоны. Общая площадь плюма составляет $S = 28 \text{ км}^2$. Хорошо видно, что выполнив разрез № 1, нам удалось провести съёмку, перпендикулярную берегу и осуществить CTD-зондирования как в самых мутных областях (примыкающих к устью), так и за границей плюма в относительно чистых областях открытого моря (станция № 9 располагается в 5 км от береговой зоны). Восточнее границы плюма на цветосинтезированном изображении Sentinel-2B детектируется пакет внутренних волн (см. Рисунок 68), проявляющийся в равной степени в колебаниях изотерм нижней границы плюма (Рисунок 69б).

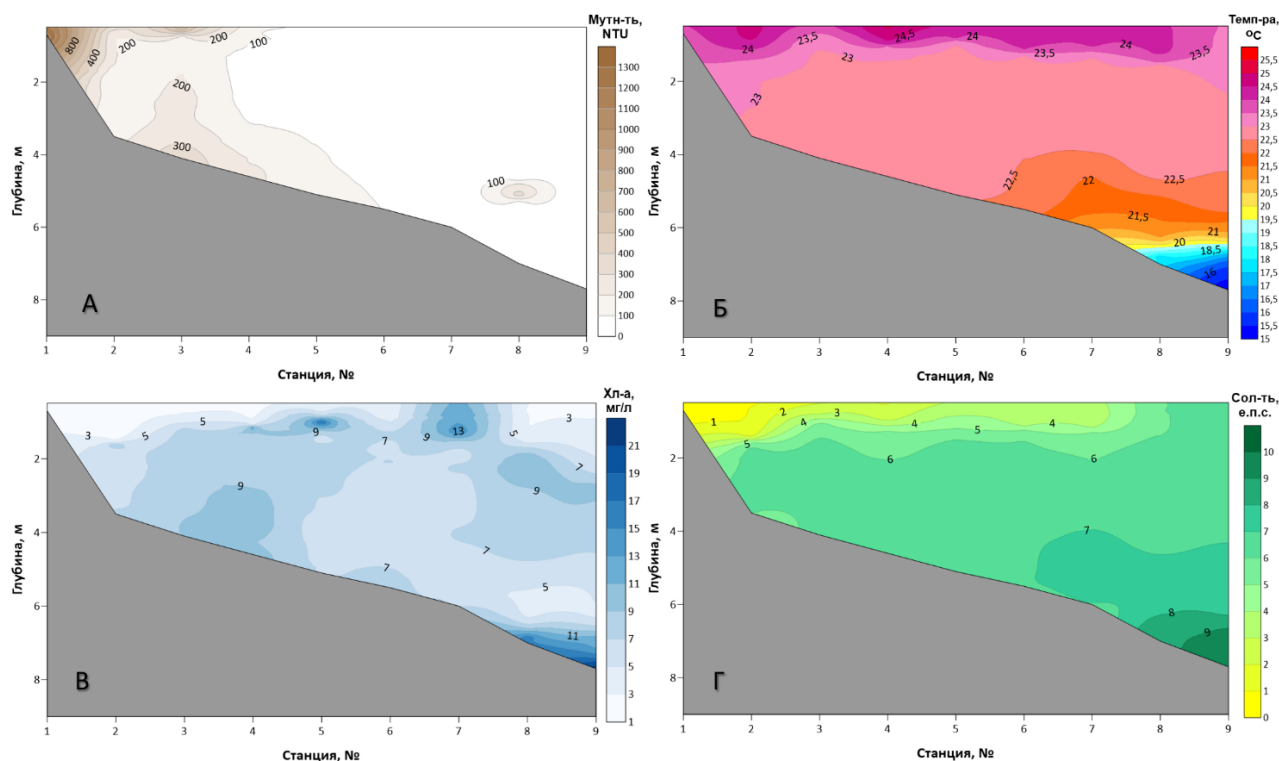


Рисунок 69 — Распределение мутности (а), температуры (б), концентрации Chl-a (в) и солёности (г) по глубине на станциях зондирования разреза № 1 от 2 июня 2023 г. (плюм р. Терек)

На Рисунке 69 представлены графики вертикального распределения температуры, солёности, мутности и концентрации хлорофилла *a* на перпендикулярном к береговой зоне разрезе № 1. Глубина интрузии речных вод в районе устья реки Терек составляет примерно 1,5–2 м. В поле мутности, плюм характеризуется экстремальными градиентами измеренных значений. В районе станции № 1 мутность морской воды составляет около 1300 NTU, тогда как на станции № 3 в чуть более 500 м от устья реки в приповерхностном слое мутность не превышает 500 NTU. На расстоянии 1,5 км от береговой зоны (на станции № 5 и далее) мутность морской воды меньше 100 NTU и продолжает уменьшаться при удалении от створа реки. На дальней станции за границей плюма (станция № 9) измеренная мутность морской воды в приповерхностном слое равняется 9 NTU.

В поле солёности, более наглядно прослеживается область влияния речных вод на прибрежную гидрологическую структуру. Распреснённая линза речного плюма распространяется на 4 км от береговой зоны и совпадает с границей плюма, визуализирующийся на цветосинтезированном спутниковом изображении за этот же день — в районе станции № 8 (см. Рисунок 68). В приустьевой зоне (станция № 1) солёность морской воды ~0,5 ‰. В километре от береговой зоны в приповерхностном слое солёность достигает 2,5–3 ‰. В процессе постепенного перемешивания с морской водой измеренные значения за

границей плюма уже составляют 6,5–7 епс, для нижней границе плюма характерна изогалина 4,5–5 епс.

Температура воды в прибрежной зоне в районе реки Терек 2 июня 2023 г. довольно однородна. Опираясь на данные разреза № 1, было определено, что температура речной воды сопоставима с температурой прибрежных вод — 23–24 °С. До глубины 4–5 м толща прибрежных вод квазиоднородно перемешана. Глубоководная водная масса прибрежных каспийских вод располагается на 7–8 м от поверхности. Характерные значения температуры 15–16 °С (значения солёности 9–10 епс).

Значения концентрации хлорофилла *a* в приустьевой области минимальны и составляют 1–2 мг/л. В 1,5 км от берега и на кромке плюма под нижней границей распреснённого слоя на глубине 1,5–2 м наблюдаются локальные области повышенных значений 9–13 мг/л. Максимальные значения концентрации хлорофилла *a* отмечаются в придонных слоях разреза и достигают 20 мг/л.

На Рисунке 70 представлены графики пространственного распределения основных гидрологических параметров на продольном разрезе № 2 от 2 июня 2023 г. (расположение станций см. на Рисунке 68). На данных графиках отчётливо прослеживается основная область, подверженная большому воздействию от поступления пресных вод, содержащих большое количество взвешенного вещества. Ей соответствует двухкилометровый участок, примыкающий к устью реки Терек (между станциями № 13–16 на Рисунке 68). Для этой области характерны повышенные значения мутности, минимальные значения солёности морской воды и, как правило, низкие значения концентрации хлорофилла *a*. Скорее всего, именно в этой области происходит основное осадконакопление выносимого взвешенного вещества с суши. Так же стоит отметить асимметрию основной оси распространения речных вод. Относительно устья речной сток распространяется севернее. Скорее всего, на настоящий момент определяющим фактором этого является песчаная отмель (бар) южнее устья, которая блокирует распространение речных вод в южном направлении. Она хорошо видна на фрагменте спутникового изображения Sentinel-2B (MSI) от 5 июня 2023 г. на Рисунке 71.

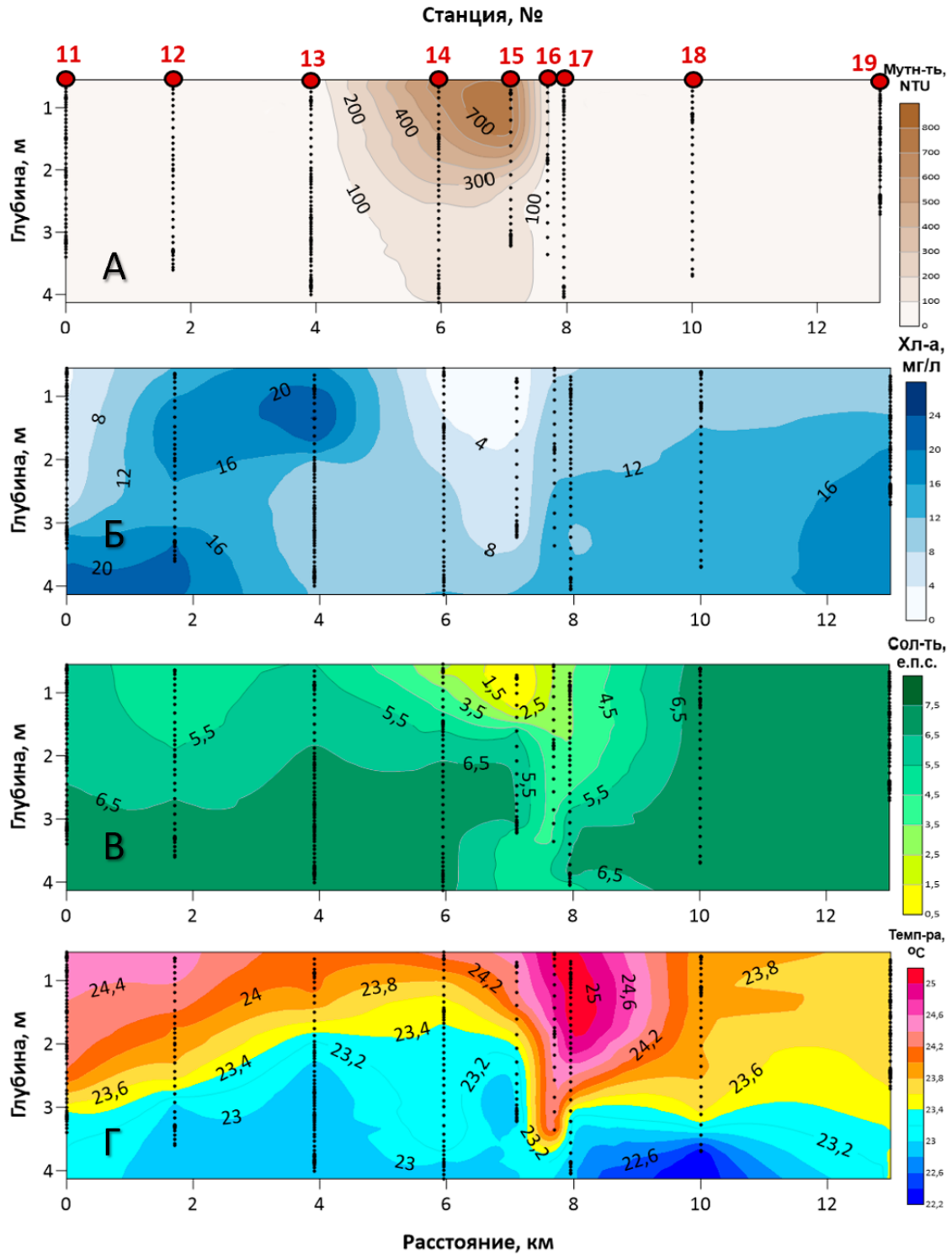


Рисунок 70 — Распределение мутности (а), концентрации Chl-a (б), солёности (в) и температуры (г) на станциях CTD-зондирования продольного разреза № 2 от 2 июня 2023 г.

Устье реки Терек расположено напротив станции № 15 (см. Рисунок 68)

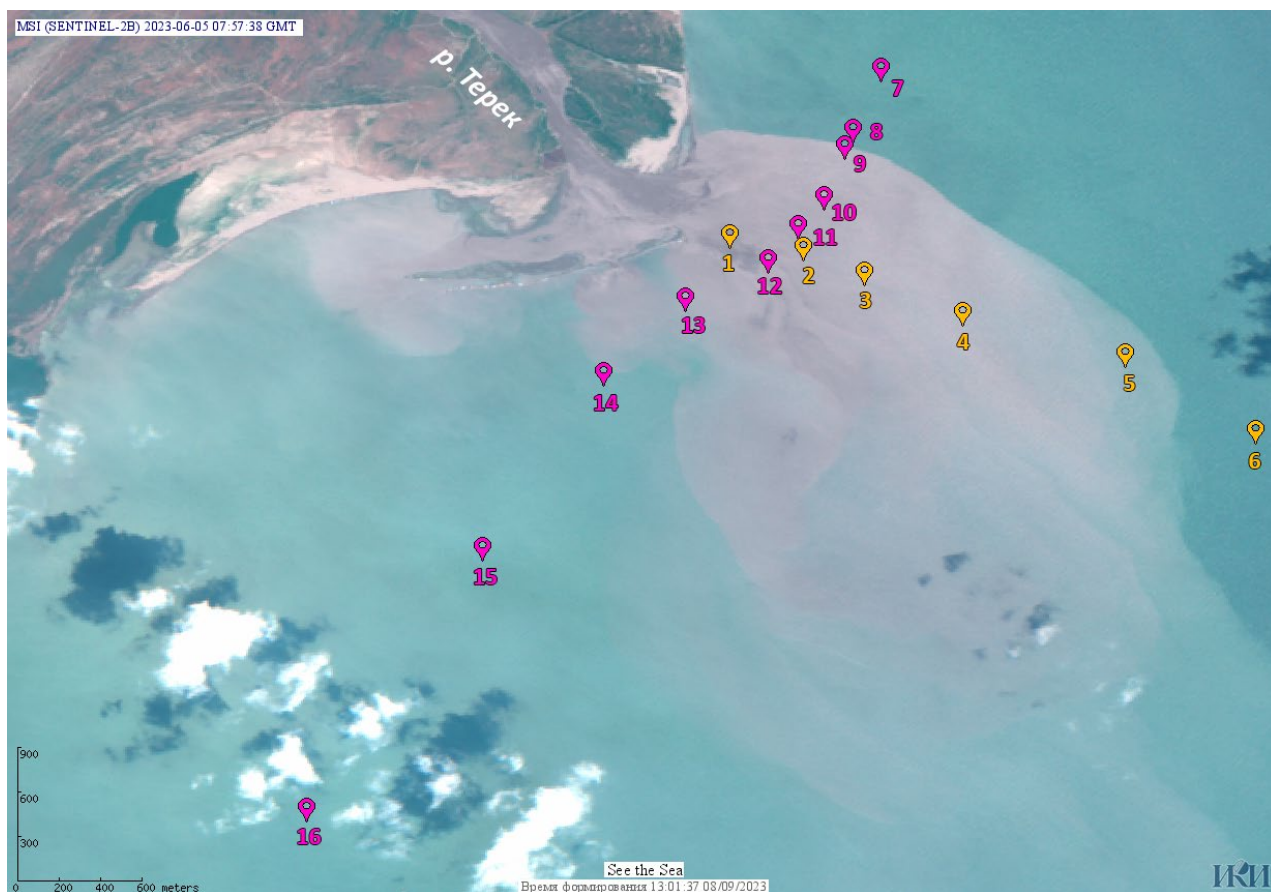


Рисунок 71 — Фрагмент спутникового цветосинтезированного изображения MSI Sentinel-2B за 5 июня 2023 г. Номера и положение CTD-измерений отмечены цветом: оранжевые метки — разрез № 1; розовые метки — разрез № 2

В районе устья реки Терек 5 июня 2023 г. была выполнена повторная CTD-съёмка. Расположение станций представлено на Рисунке 71. Так же, как и 2 июня 2023 г. были выполнены два разреза: параллельно и перпендикулярно устью реки Терек, квазисинхронно со спутниковой съёмкой. На спутниковом изображении MSI Sentinel-2B от 5 июня 2023 г. видно, что форма и размер речного плюма отличаются от рассмотренного ранее случая за 2 июня 2023 г. Факел выноса вытянут в юго-восточном направлении. В отличие от 2 июня 2023 г. максимальное удаление границы плюма от береговой зоны составляет около 2,8 км, что примерно в 1,5 раз меньше, чем несколько днями раньше. Площадь речного плюма в момент спутниковой съёмки и подспутниковых измерений составляет 7,64 км².

На Рисунке 72 представлены вертикальные графики распределения температуры, солёности, мутности и концентрации хлорофилла *a* на перпендикулярном к береговой зоне разрезе № 1. Несмотря на меньшие размеры плюма, глубина интрузии речных вод такая же, как и 2 июня 2023 г. — 1,5 м. На ближайшей станции к устью реки Терек измеренные значения мутности даже выше, чем 2 июня 2023 г. — чуть больше 1400 NTU. При этом область с максимальными значениями локализована в первых 500–600 м от береговой зоны.

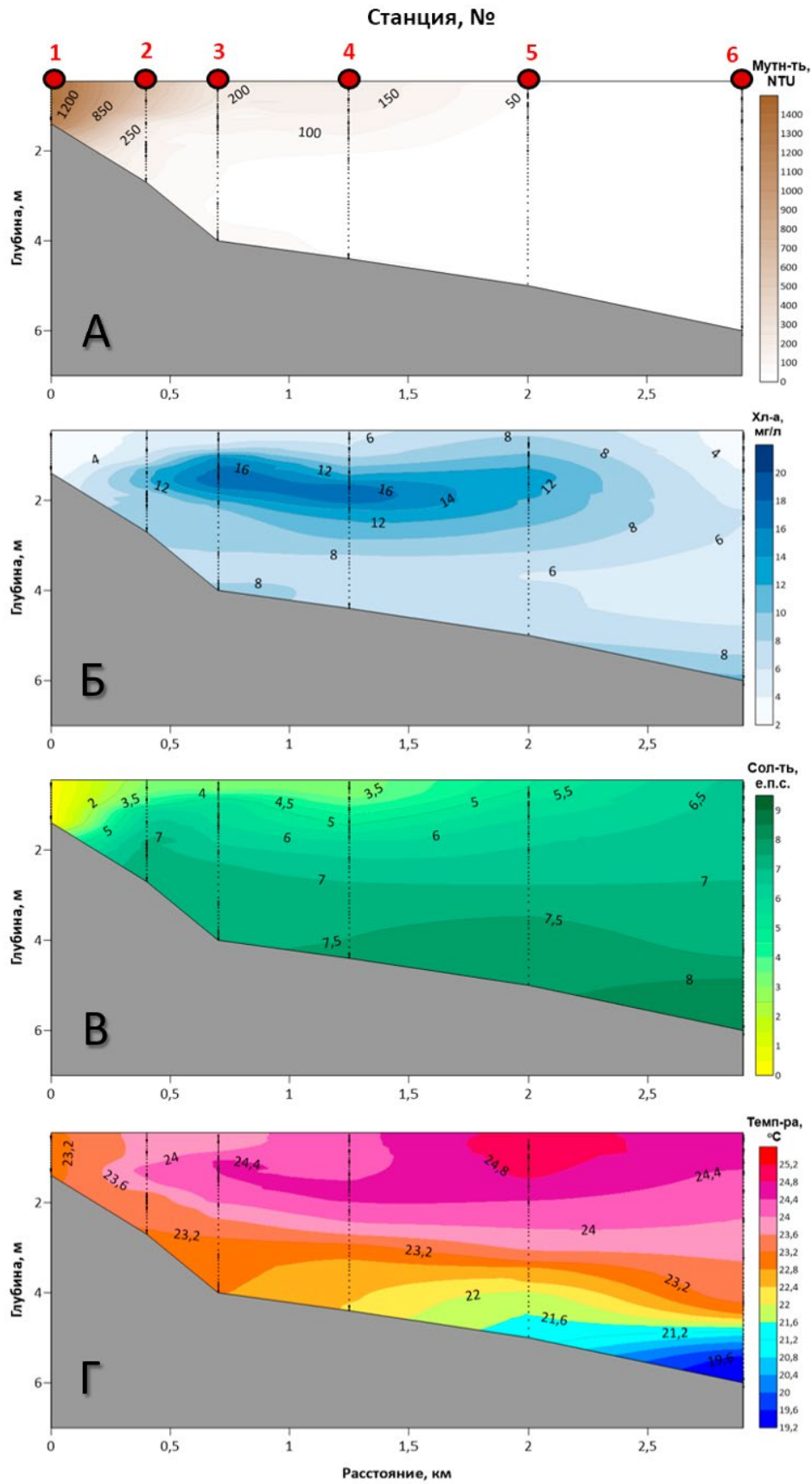


Рисунок 72 — Распределение мутности (а), концентрации Chl-a (б), солёности (в) и температуры (г) по глубине на станциях зондирования разреза № 1 от 5 июня 2023 г.

Станция № 5 расположена на кромке плюма и находится примерно в 2 км от берега. В поле температуры речные воды лишь на 1 °С холоднее ($T = 23,2$ °С) достаточно сильно прогретого поверхностного слоя прибрежных вод — от 24,2 до 25 °С. Изогалина 4,5–5 епс является нижней границей плюма, т.е. несмотря на количество взвешенного вещества выносимого с речным стоком и расхода реки, основная масса взвеси аккумулируется в одной и той же локализованной области (~500 м от берега), и сохраняется устойчивая стратификация прибрежных вод с примерно постоянной глубиной проникновения речных вод 1,5 м, максимум — 2 м, что соответствует положению изогалины 4,5–5 епс.

На Рисунке 73 представлены графики распределения основных гидрологических параметров на продольном разрезе № 2 за 5 июня 2023 г.

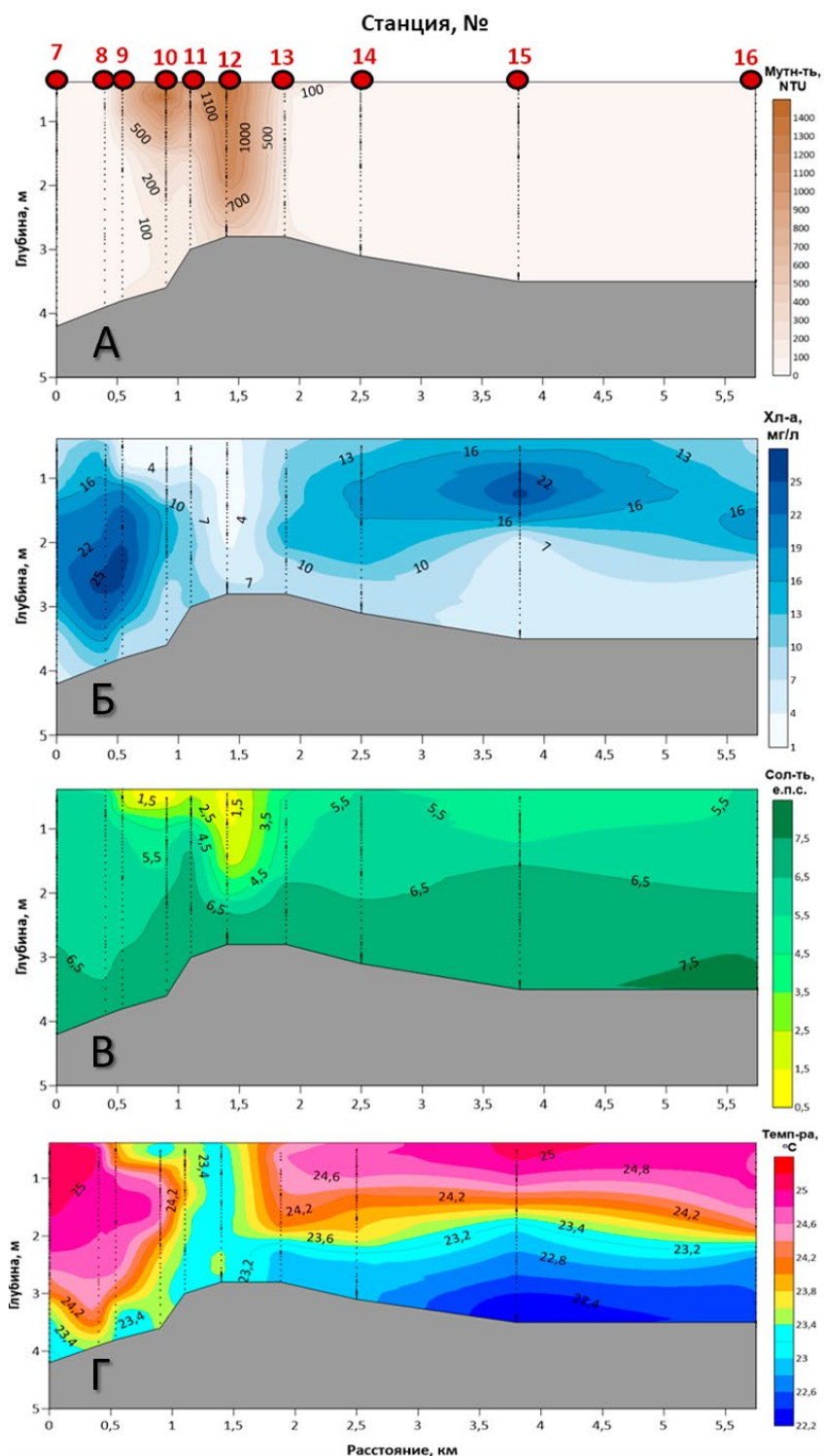


Рисунок 73 — Распределение мутности (а), концентрации Chl-a (б), солёности (в) и температуры (г) на станциях CTD-зондирования продольного разреза № 2 от 5 июня 2023 г.

Станция № 12 — ближайшая к устью реки Терек. Её местоположение такое же, как и у станции № 15 от 2 июня 2023 г. Проявляется та же асимметрия распространения речных вод к северу от устья, которая была отмечена ранее. Основная область влияния речных вод занимает не больше 1,5 км от створа реки.

5.3.2. Результаты исследования трёхмерной структуры плюма реки Сулак

В районе выноса реки Сулак подспутниковые натурные измерения проводились 4 и 5 июня 2023 г. На Рисунке 74 представлен фрагмент спутникового изображения Landsat-8 (OLI) за 4 июня 2023 г. и на нем отмечено положение СТД-станций за этот же день. 4 июня 2023 г. было выполнено три гидрологических разреза. В общей сложности СТД-зондирования и отбор морских проб был осуществлён на 24 станциях.

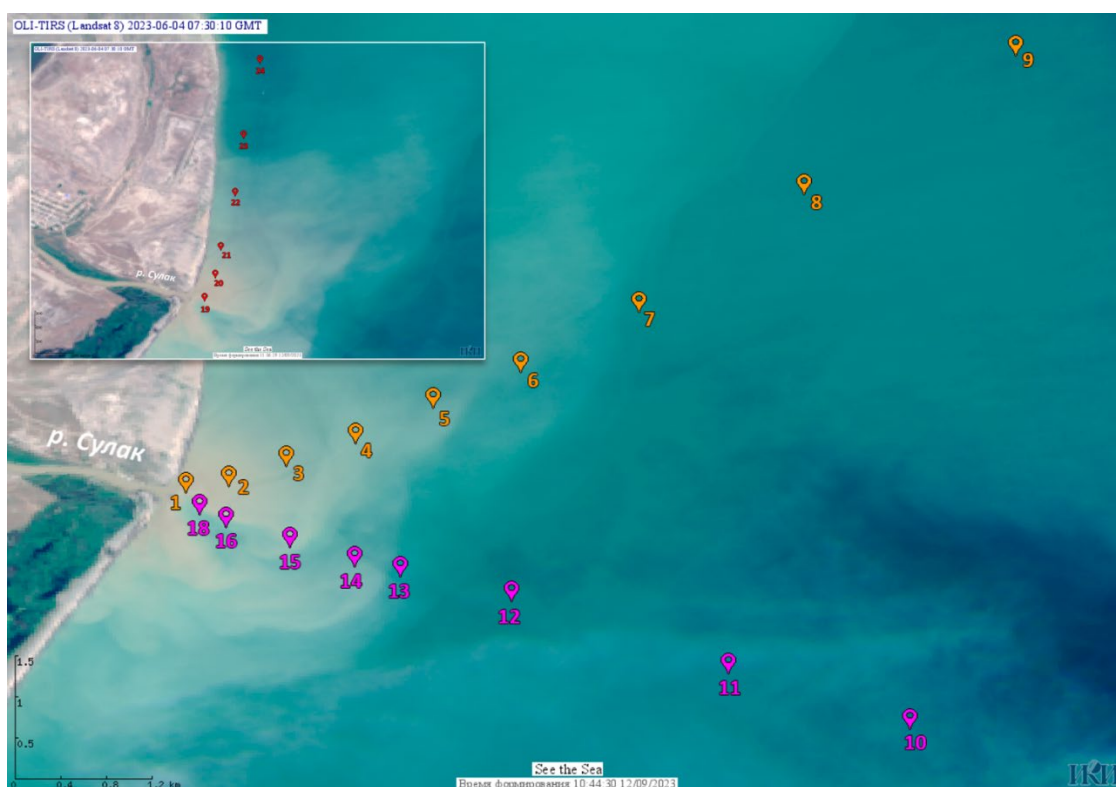


Рисунок 74 — Фрагмент спутникового цветосинтезированного изображения OLI Landsat-8 в районе выноса р. Сулак за 4 июня 2023 г. Номера и положение СТД-измерений отмечены цветом: оранжевые метки — разрез № 1; розовые — разрез № 2; красные — разрез № 3

4 июня 2023 г. площадь речного выноса не превышала 3 км². Максимальное удаление от берега наиболее мутной его части составляло около 1,5 км. Сам вынос разделялся на две части: севернее и южнее от устья. Этому способствовала песчаная отмель, образовавшаяся напротив устья на границе раздела «река – море», по аналогии, как и у реки Терек.

На Рисунке 75 представлены графики распределения основных гидрологических параметров на разрезе № 1 за 4 июня 2023 г. Разрез № 1 был выполнен по диагонали от устья реки Сулак. Общая протяжённость разреза составила 9 км.

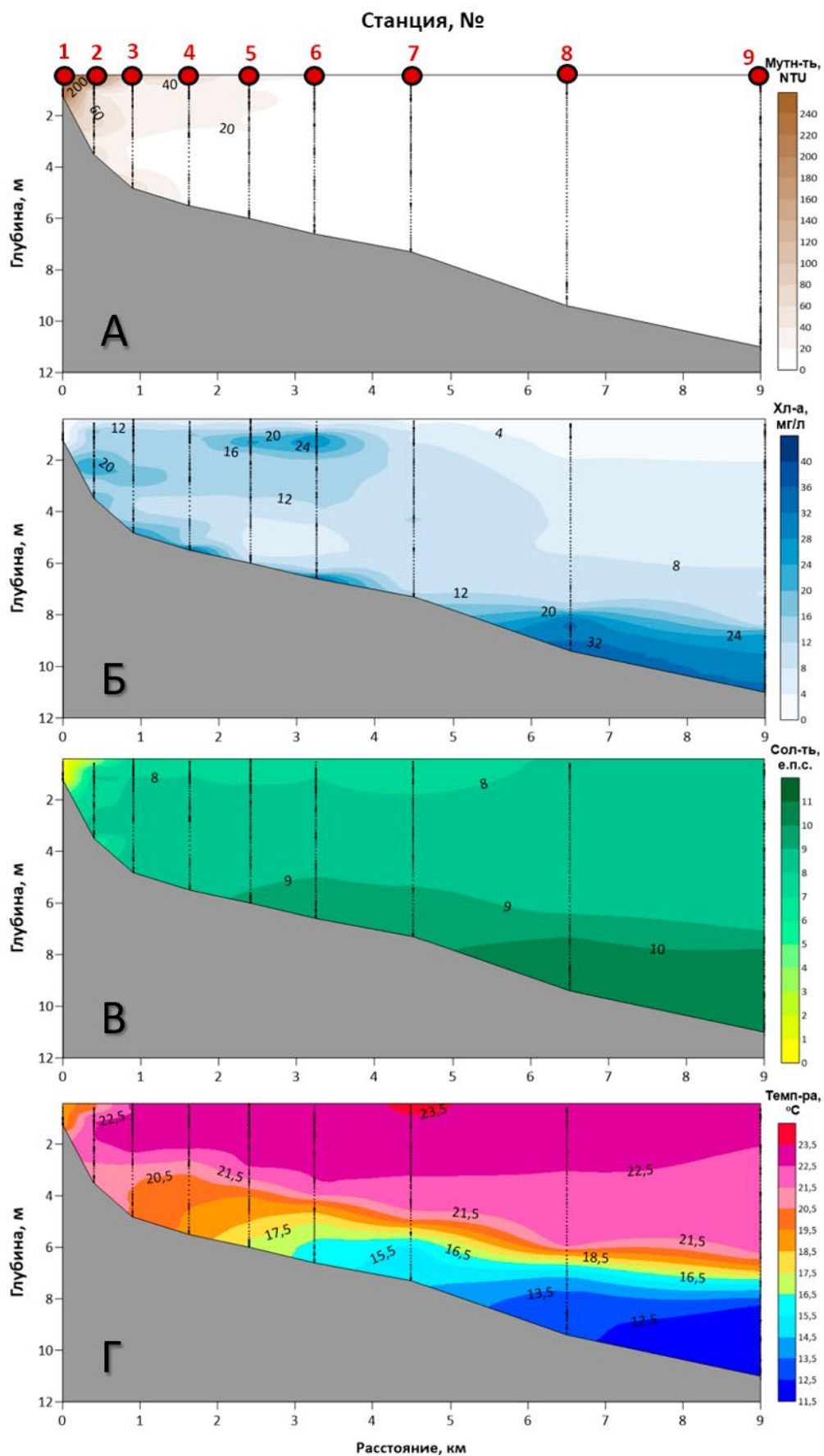


Рисунок 75 — Распределение мутности (а), концентрации Chl-a (б), солёности (в) и температуры (г) по глубине на станциях зондирования разреза № 1 от 4 июня 2023 г. в районе выноса р. Сулак

Как видно из данных разреза № 1 (см. Рисунок 75) основная область плюма локализована в первых 500 м от устья реки Сулак (между станциями № 1 и 2). Максимальные значения мутности морской воды достигают 223 НТУ (станция № 1). Далее идёт резкое уменьшение измеренных величин. Станция № 5 соответствует границе речного плюма (см. Рисунок 74). Она располагается в 2,5 км от устья реки. Измеренная мутность морской воды на границе плюма равняется 26 НТУ. За границей плюма в районе станции № 9 мутность морской воды 7,8 НТУ.

В поле температуры речной плюм Сулака характеризуется пониженными значениями температуры — 19–20 °С, на 3–4 °С холоднее прогретого примыкающего поверхностного слоя моря (23–24 °С).

Солёность в приустьевой зоне соответствует 0,2 епс. На станции № 2 в приповерхностном слое равняется 3,5 епс. На станции № 3 и далее измеренные значения превышают 7,5 епс. На дальней станции солёность морской воды в приповерхностном слое достигает 8,1 епс. Глубина интрузии речных вод составляет 1,5 м.

Графики распределения основных параметров морской воды на разрезе № 2 за 4 июня 2023 г. представлены в Приложении М, Рисунок М.1. В целом они повторяют особенности гидрологической структуры, описанные ранее по данным разреза № 1.

На Рисунке 76 представлены графики распределения основных гидрологических параметров на продольном разрезе № 3 за 4 июня 2023 г. Разрез был выполнен от устья реки Сулак на север (в сторону реки Терек). На графиках видно, что область максимальных значений мутности морской воды также не удалены от устья реки дальше 500 м. Вдольбереговая северная граница распространения речных вод находится в 2,5 км от устья (станция № 22). Станции № 23 и 24 расположены за границей плюма в относительно чистых морских водах. Примечательно, что неоднократное совпадение границ области влияния речных вод, установленных по спутниковым данным и измеренных *in situ*, позволяет с уверенностью использовать методы дистанционного зондирования для мониторинга приустьевых районов в отсутствии натурных данных.

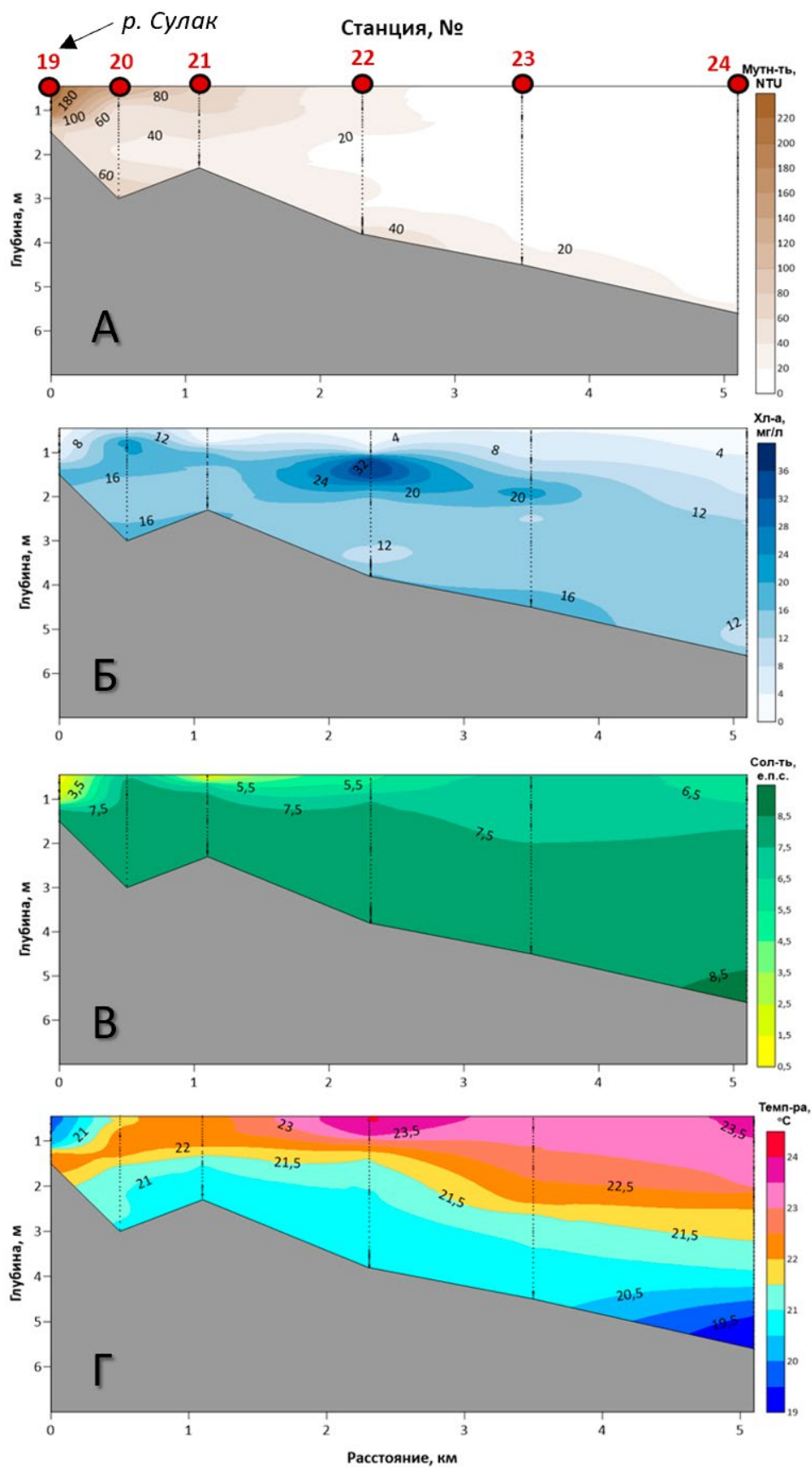


Рисунок 76 — Распределение мутности (а), концентрации Chl-a (б), солёности (в) и температуры (г) по глубине на станциях зондирования разреза № 3 от 4 июня 2023 г. в районе выноса р. Сулак

Повторные CTD-зондирования в районе устья реки Сулак были выполнены 5 июня 2023 г. На Рисунке 77 на фрагменте спутникового изображения Sentinel-2B (MSI) за 5 июня 2023 г. отмечено их местоположение. Как видно на спутниковом изображении, район исследования частично был покрыт облачностью. Речной плюм имел яркую подветренную северную границу. Площадь плюма примерно составляла 3 км². Факел выноса был направлен в юго-восточном направлении. По основной оси выноса был выполнен разрез № 3 (Приложение М, Рисунок М.3).



Рисунок 77 — Фрагмент спутникового цветосинтезированного изображения MSI Sentinel-2B за 5 июня 2023 г. Жёлтым цветом отмечены номера и положение CTD-измерений

Максимальные значения мутности морской воды вблизи устья реки Сулак 5 июня 2023 г. не превышали 106 НТУ, что в несколько раз меньше, чем днём ранее. На кромке плюма (станция № 17) мутность морской воды составляла 14 НТУ. Область повышенных значений мутности, как и 4 июня 2023 г. находилась не дальше 500 м от устья. Глубина интрузии речных вод — 1,5 м.

5.4 Определение полей мутности и концентрации взвешенного вещества в приустьевых зонах рек Терек и Сулак по спутниковым данным и измерениям *in situ*

5.4.1 Выявление зависимости между мутностью воды и концентрацией взвеси, определённых по данным натурных измерений

Значения мутности воды, определённой портативным турбидиметром и установленной в лабораторных условиях концентрации взвеси в пробах воды, вовремя подспутниковых натурных измерений в 2022 г. представлены в Приложение № Л, в Таблице Л.1. Как видно из Таблицы, значения мутности, измеренной на ближайших к устьям станциях (расположение STD-зондирований см. на Рисунке 78) в плюме реки Терек, значительно превышают значения мутности в плюме реки Сулак, 608 NTU в плюме реки Терек по сравнению с 137 NTU в плюме реки Сулак. Поскольку не существует единой формулы пересчёта из значений мутности, имеющей размерность NTU, в значения концентрации взвешенного вещества была предпринята попытка найти взаимосвязь между этими двумя величинами для тестовых районов (по аналогии с рекой Мзымтой в Чёрном море).

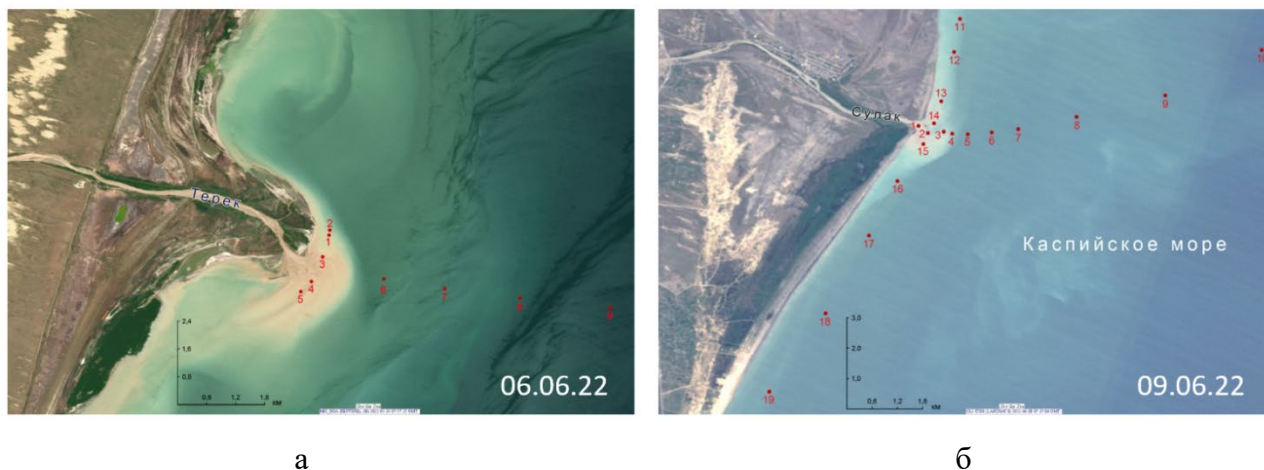


Рисунок 78 — Фрагмент спутникового изображения Sentinel-2B (MSI) за 7 июня 2022 г. (а), красным цветом отмечены номера и положение STD-измерений в районе реки Терек 6 июня 2022 г.; фрагмент спутникового изображения Landsat-8 (OLI-TIRS) за 8 июня 2022 г. (б), красным цветом отмечены номера и положение STD-измерений в районе реки Сулак 9 июня 2022 г.

На Рисунке 79 приведено сопоставление данных за полевой сезон 2022 г. подспутниковых измерений мутности воды и концентрации взвеси для плумов рек Сулак и Терек.

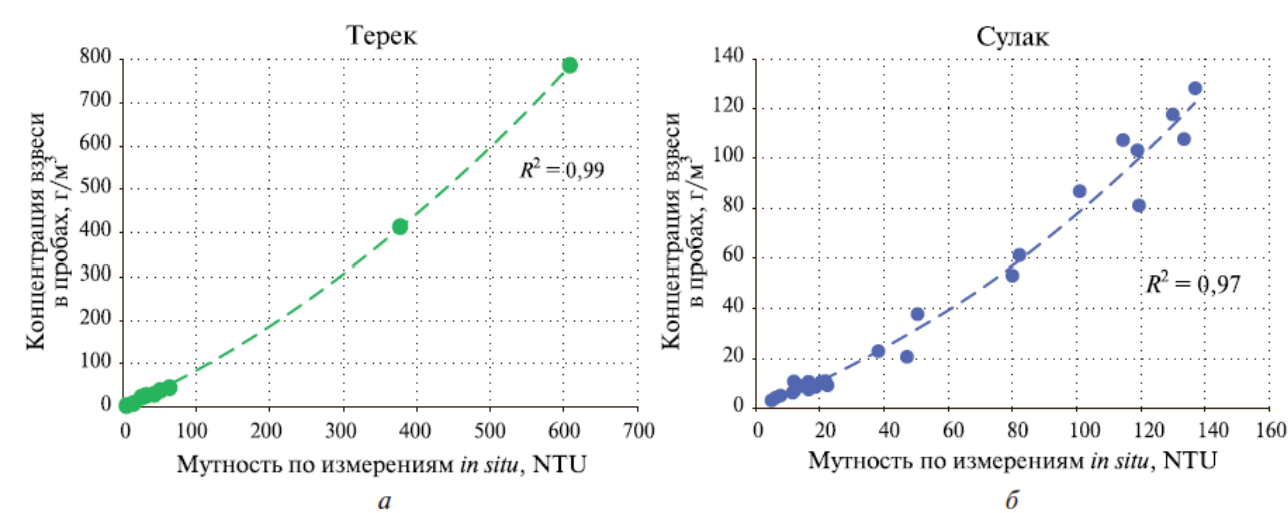


Рисунок 79 — Сопоставление значений мутности, определённых с помощью портативного турбидиметра, и концентрации взвешенного вещества в пробах воды: *a* — для реки Терек, измерения 6 июня 2022 г.; *б* — для реки Сулак, измерения 6 и 9 июня 2022 г.

Данные аппроксимируются простой линейной функцией $y = 0,83x$; величина достоверности аппроксимации в этом случае $R^2 = 0,9$. При аппроксимации квадратичной функцией достоверность увеличивается до $R^2 = 0,99$ для реки Терек и $R^2 = 0,97$ для р. Сулак. Массовая концентрация взвеси в воде растёт несколько быстрее, чем её мутность. Вероятно, это связано с изменением размера взвешенных в воде частиц. Вклад каждой крупной частицы в увеличение мутности воды меньше, чем её вклад в увеличение массы взвеси.

5.4.2 Сравнение измерений мутности воды по данным спутникового зондирования и подспутниковых измерений

Одна из основных задач данной работы заключалась в валидации стандартных спутниковых алгоритмов определения TSM с результатами *in situ* измерений. По аналогии с работой, которая была проведена для реки Мзымты (Чёрное море). В предыдущих исследованиях нами было получено, что выбор алгоритма напрямую зависит от мутности реки. Задача стояла подтвердить или опровергнуть эту теорию применительно к другим географическим объектам.

Во время экспедиционных работ в 2022 г. синхронные спутниковые данные были неинформативны в силу сплошной или частичной облачности над районами исследования. Поэтому сравнение проводилось с данными, полученными на следующий день, 7 июня, сенсором MSI спутника Sentinel-2B. На Рисунке 80а представлена диаграмма рассеяния значений мутности, полученных *in situ* с помощью портативного турбидиметра 6 июня 2022 г. в приустьевой зоне реки Терек, и определённых по данным MSI Sentinel-2B за 7 июня с

использованием алгоритма Dogliotti. Полученные значения аппроксимируются прямой, проходящей через начало координат и имеющей угловой коэффициент 0,85. Величина достоверности аппроксимации составляет $R^2 = 0,97$. Значения мутности, установленные по спутниковым данным, имеют несколько меньшие значения, чем при измерениях *in situ*.

Данные *in situ* измерений, проведённых 9 июня в районе реки Сулак, сравнивались с результатами, полученными по спутниковым данным от 8 июня. Максимальные измеренные *in situ* значения мутности на ближайших к устью станциях не превышали 140 NTU, что значительно ниже, чем у устья реки Терек. Для данных прибора OLI/TIRS спутника Landsat-8 от 8 июня для определения значений мутности были применены алгоритмы Nechad 2015 и Dogliotti. Результаты сопоставлений представлены на Рисунке 80б. Из них следует, что для значений мутности ниже 30 NTU результаты применения этих двух алгоритмов практически идентичны, как и в предыдущих наших работах для плёма реки Мзымты. Для значений, больших 50 NTU, результаты применения этих алгоритмов расходятся. Причём ни один из них не даёт высокую корреляцию с результатами измерений мутности *in situ*. И оба алгоритма дают сильно заниженные значения по сравнению с измеренными. Такое расхождение может быть объяснено тем, что измерения проводились не синхронно со спутниковой съёмкой. Пример существенных изменений параметров плёма реки Сулак в период летнего половодья представлен в подразделе ниже по тексту.

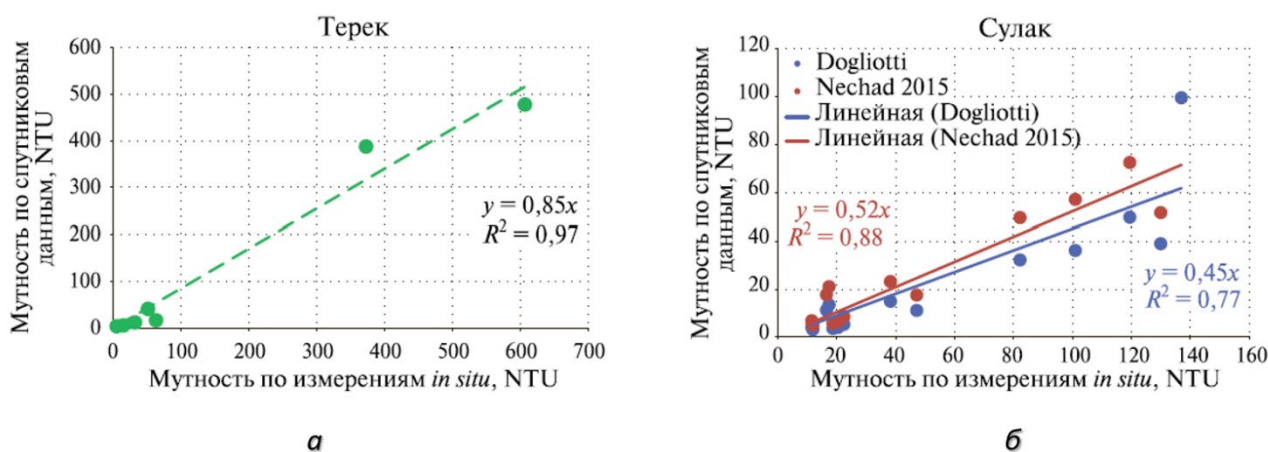


Рисунок 80 — Сравнение значений мутности по натурным данным и данным дистанционного зондирования во время экспедиционных измерений 2022 г.:

а — для реки Терек; б — для реки Сулак

Стоит отметить, что для данных, полученных в 2023 г. в районе реки Сулак в диапазонах значений мутности выше средних для данного периода и района (50–200 NTU) была подтверждена возможность применимости алгоритма Dogliotti для восстановления мутности морской воды в приустьевых районах (см. Рисунок 81).

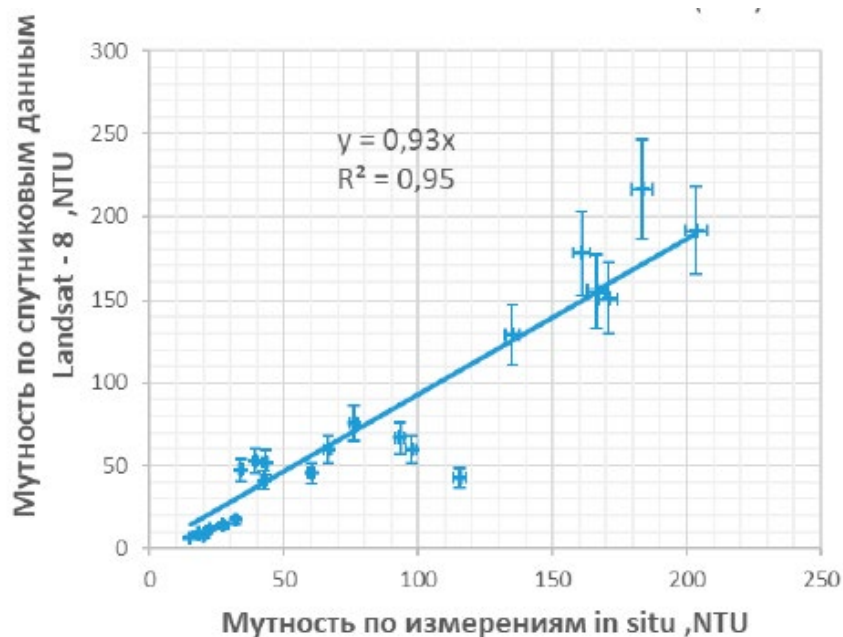


Рисунок 81 — Сравнение значений мутности по натурным данным и данным дистанционного зондирования во время экспедиционных измерений 4 июня 2023 г. в районе устья реки Сулак

5.4.3 Минеральный состав взвеси в пробах воды рек Терек и Сулак

На основе рентгенофазного анализа проведена оценка минерального состава взвеси в пробах воды, отобранных на станциях зондирования в плюмах рек Терек и Сулак в 2022 г. Как известно, при поступлении терригенного материала в море происходит его механическая дифференциация, обусловленная различной скоростью погружения обломков [Лисицын, 1994]. В соответствии с законом Стокса главным фактором, влияющим на скорость погружения взвеси, является линейный размер частиц: чем мельче взвесь, тем медленнее она тонет и тем дальше она может переноситься водными потоками. Этот механизм лежит в основе изменения минерального и химического состава взвеси в зависимости от расстояния до устья реки.

Причиной изменения количественного соотношения минералов в разных частях плюма является их разная устойчивость к механическому воздействию. Например, кварц обладает высокой сопротивляемостью к механическому разрушению, которая определяется, главным образом, его высокой твёрдостью. Все глинистые минералы относятся к группе силикатов с слоистыми структурами и имеют низкую твёрдость, низкую гидромеханическую устойчивость и, как следствие, большую дисперсность. Разница в среднем размере зёрен безводных алюмосиликатных и глинистых минералов, по всей видимости, является основным фактором, приводящим к изменению количественного минерального состава взвеси в разных частях плюма.

По результатам проведённого рентгенофазового анализа было установлено, что взвесь рек Терек и Сулак состоит преимущественно из кварца, различных гидрослюд и кальцита. В меньшем количестве в ней содержится хлорит, смешаннослойные образования слюда-сметит и плагиоклаз. В небольшом количестве присутствуют сметит, каолинит, доломит и щелочной полевой шпат.

Обнаруженные минеральные фазы были поделены на три группы:

1. *Безводные силикаты и алюмосиликаты.* В эту группу входят наиболее твёрдые минералы: кварц, щелочной полевой шпат и плагиоклаз. Их твёрдость равна 5–7 по шкале Мооса.
2. *Глинистые минералы.* В эту группу входят водные силикаты: гидрослюды, хлорит, смешаннослойные образования слюда-сметит, сметит, каолинит. Для них характерна относительно низкая твёрдость 1,5–3 по шкале Мооса и низкая плотность. За счёт этого они легко разрушаются, формируют тонкообломочный материал и переносятся водой на значительные расстояния.
3. *Карбонатные минералы.* Кальцит и доломит имеют относительно низкую твёрдость 3–4 по шкале Мооса. Они при попадании в солёную воду моря частично растворяются. В виде истинных растворов минералы этой группы могут переноситься на десятки и сотни километров.

В Таблице 15 в процентном соотношении представлены основные группы минералов, обнаруженные в пробах воды в наиболее близко расположенных к устьям рек станций (см. Рисунок 78).

Таблица 15 — Минеральный состав взвеси в выносах рек Терек и Сулак (мас.%).

Дата	Река	Номер станции	Силикаты и алюмосиликаты	Глинистые минералы	Карбонатные минералы
6 июня	Терек	1	33	61	7
		2	23	55	23
		3	37	41	22
		4	38	36	26
		5	38	55	7
	Сулак	13	47	50	3
		14	57	25	18
		17	37	35	29
		18	36	44	20
9 июня	Сулак	1	41	33	26

Дата	Река	Номер станции	Силикаты и алюмосиликаты	Глинистые минералы	Карбонатные минералы
		2	34	41	25
		3	34	44	23
		4	23	63	14
		14	37	40	23
		15	43	50	7
		16	44	54	2
		20	53	40	8

Примечание: К силикатам и алюмосиликатам отнесены кварц, щелочной полевой шпат и плагиоклаз. Глинистые минералы представлены гидрослюдами, смешаннослойными образованиями слюда-сметит, сметитом, хлоритом и каолинитом; карбонаты — кальцитом и доломитом.

Вблизи устьев минеральный состав взвеси в Тереке и Сулаке почти одинаковый (Рисунок 82). Он характеризуется содержанием безводных алюмосиликатов, глинистого и карбонатного материала примерно в равном количестве. Существенное отличие состава взвеси в выносе этих рек проявлено в количественном соотношении минералов у границ плумов. В стоке обеих рек отмечается рост количества глинистого материала относительно алюмосиликатов. Наиболее ярко он проявлен в плюме реки Терек. В то время как для Сулака даже у края плюма отмечается только небольшое преобладание глинистого материала над алюмосиликатами. Относительно небольшой рост соотношения глинистого и алюмосиликатного материала в выносе реки Сулак, по всей видимости, свидетельствует о достаточно высокой дисперсности алюмосиликатов в её устье. Возможно, крупные частицы безводных алюмосиликатных минералов осаждаются уже в искусственных водохранилищах и не попадают в приустьевую зону этой реки.

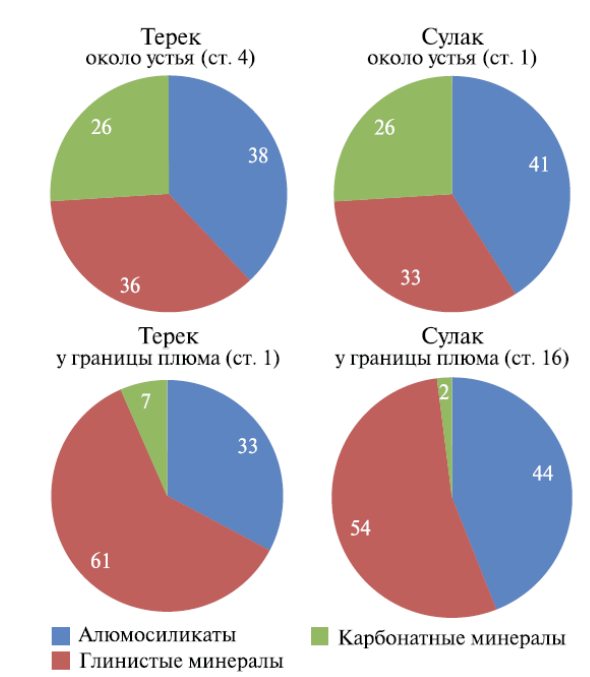


Рисунок 82 — Количественное соотношение (в %) минерального состава взвеси в выносах рек Терек и Сулак в разных частях плюма. Расположение станций см. Рисунок 78

Изменение минерального состава взвеси сопровождается значительным изменением мутности речных плюмов. В наиболее мутной приустьевой зоне во взвеси преобладает относительно крупнообломочный материал, содержащий большое количество зёрен кварца и полевых шпатов. Вдоль границы плюмов, в областях с относительно небольшой мутностью, преобладает тонкодисперсный глинистый материал. Нами высказано предположение о возможном присутствии зависимости между значениями мутности воды в плюме и минеральным составом взвеси. Для количественной характеристики минерального состава предложено использовать эмпирический коэффициент $K = (\text{масса безводных алюмосиликатных минералов})/(\text{масса глинистых минералов})$.

Среднее на пяти станциях отношение суммы алюмосиликатных минералов к сумме глинистых (K) в выносе Терека составляет $K = 0,72$. Ближе к устью оно увеличивается до 1,1. В выносе Сулака среднее за два дня измерений значение $K = 0,98$, у устья оно возрастает до 1,2.

Как показывает анализ Рисунка 83, в выносах рек Терек и Сулак действительно присутствует тенденция к увеличению коэффициента K при увеличении мутности воды. В пробах с высокой мутностью отмечается большое количество безводных алюмосиликатов. При уменьшении мутности проб наряду с валовым уменьшением массы взвешенного вещества выявлен рост относительного количества глинистого материала. Эта зависимость проявлена как для данных, полученных *in situ*, так и для значений мутности, установленных по данным спутника.

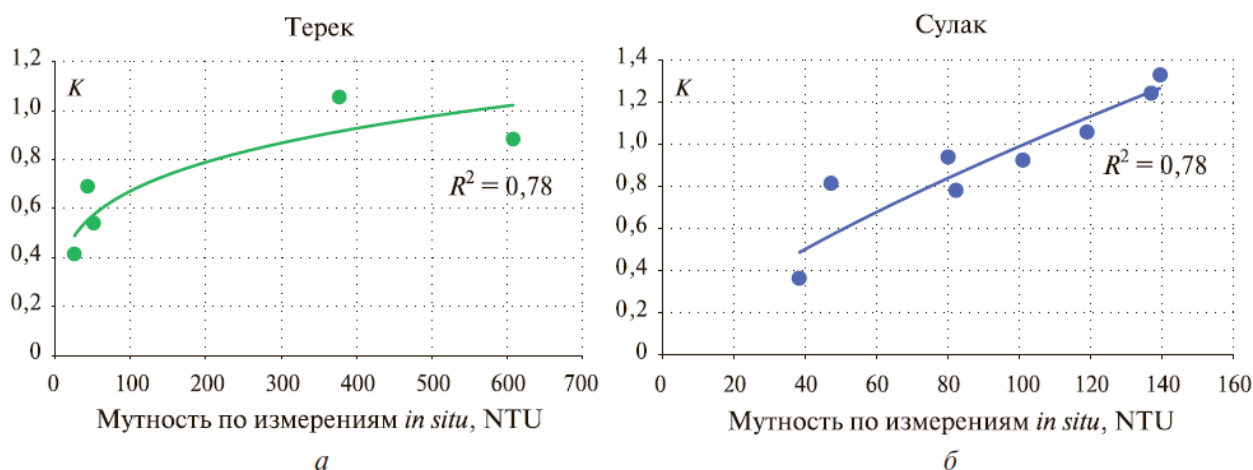


Рисунок 83 — Сопоставление значений мутности плумов рек Терек (а) и Сулак (б), полученных с помощью портативного турбидиметра, и коэффициента K , который отражает отношение алюмосиликатных минералов к глинистым минералам

Результаты, представленные в подпараграфах 5.4.1–5.4.3, были опубликованы в работе [Лаврова и др., 2022б].

5.4.4 Изменение параметров плума реки Сулак после схода селевых потоков в горах Дагестана в 2023 г.

В конце мая и в июне 2023 г. на юге России, на Северном Кавказе, прошли сильные ливни. По сообщениям средств массовой информации, 31 мая в горных районах Дагестана сильные ливни привели к образованию селевых потоков, которые сошли на участках трассы Хасавюрт – Тлох в Губметовском районе; была перекрыта дорога Буйнакск – Гимры – Чирката в Унцукульском районе, а дорога Мамраш – Ташкапур – Араканский мост в Лакском районе (<https://vestikavkaza.ru/news/v-gorah-dagestana-selevye-potoki-perekryli-dorogi.html>). Районы схода селевых потоков показаны на Рисунке 84. Селевые потоки в Гумбертовском и Унцукульском районах находились в водосборе рек Андийское и Аварское Койсу, которые при слиянии образуют реку Сулак. В Лакском районе сель сошёл в районе, где протекает множество небольших горных рек, которые впадают в реку Казикумухское Койсу, которая, соединяясь с рекой Каракойсу, впадает в реку Аварское Койсу. Таким образом, селевые массы попали в притоки, а потом и в саму реку Сулак и далее в Каспийское море.

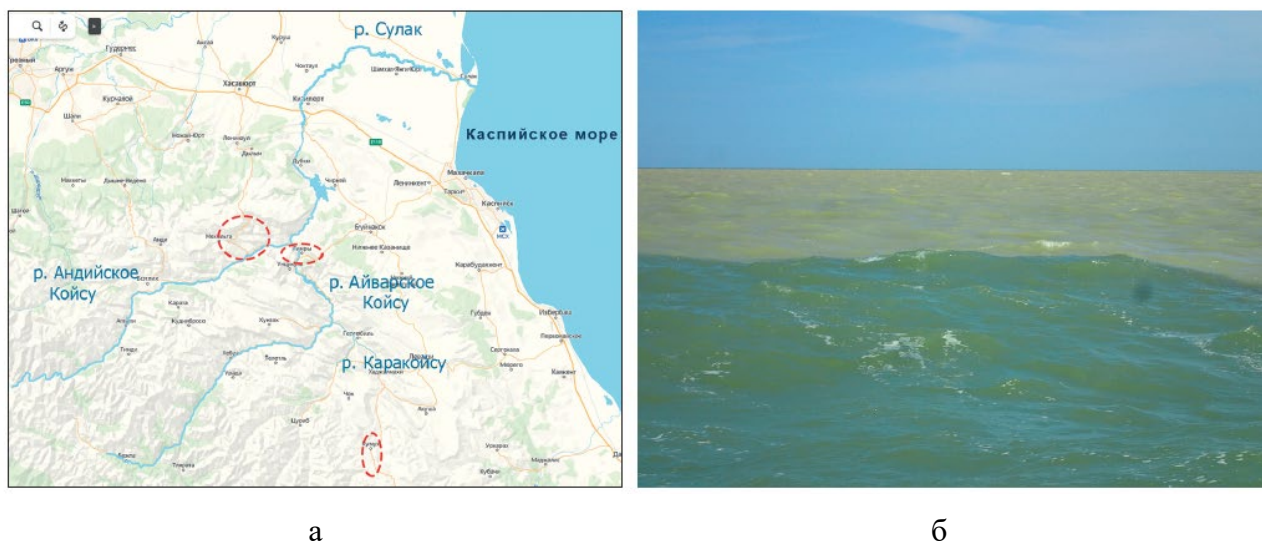


Рисунок 84 — Районы схода селевых потоков (отмечены пунктиром) (а), граница плюма реки Сулак 2 июня 2023 г. (б) (фотография Д.М. Соловьева)

На Рисунке 85 представлены цветосинтезированные изображения в псевдоестественных цветах (спектральные каналы 4, 3, 2) и карты мутности, определённой по алгоритму Dogliotti 2015 г. за весь период подспутниковых измерений в июне 2023 г. В качестве примера на Рисунке 85ж, приведено также изображение и карта мутности за 17 июня 2023 г., когда после очередных селей резко повысилась мутность в плюме реки Сулак. На наш взгляд, примерно такую ситуацию можно было бы наблюдать 2 июня 2023 г. на спутниковом изображении, если бы не было облачности.

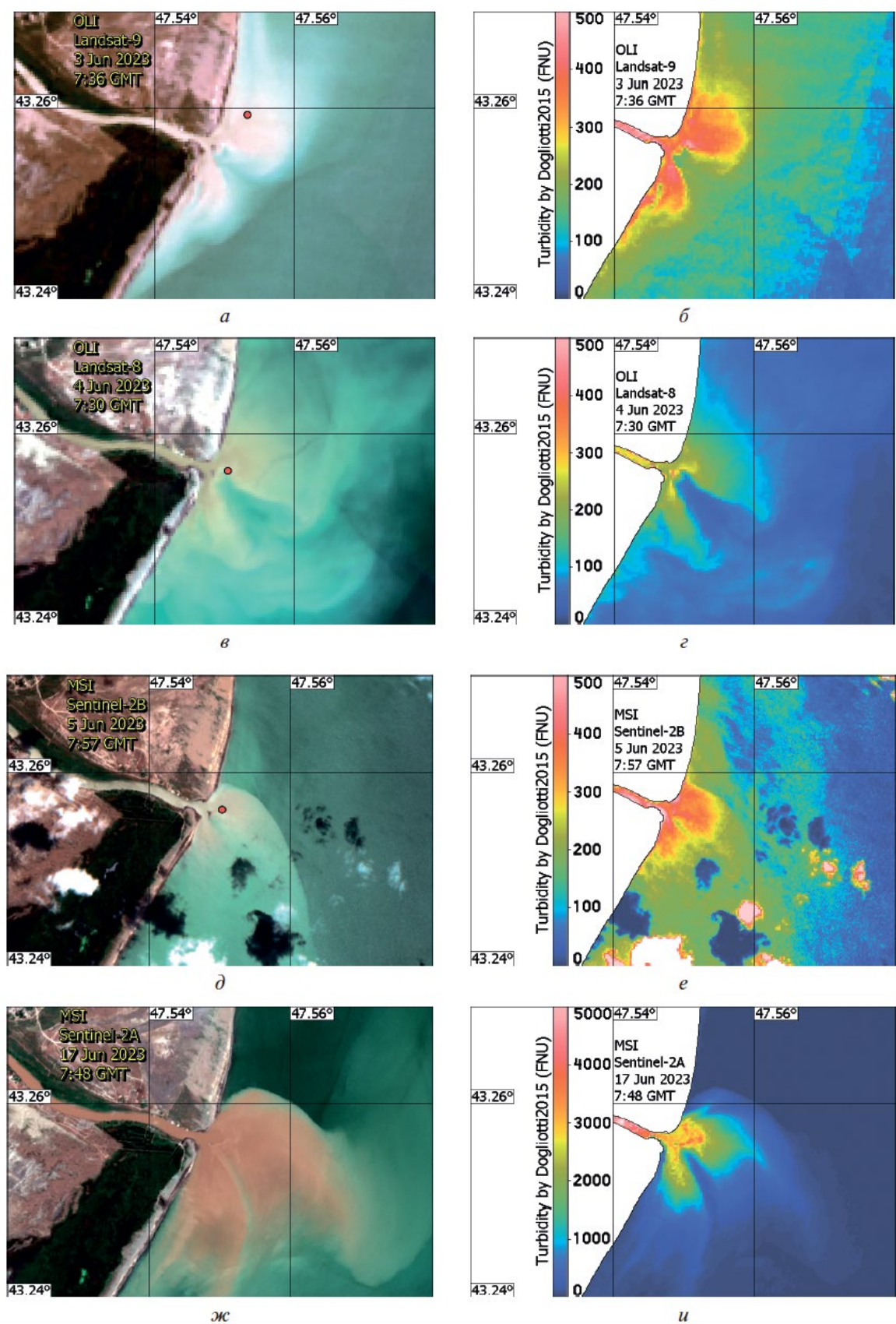


Рисунок 85 — Цветосинтезированные изображения (спектральные каналы 4, 3, 2) плюма реки Сулак (*а, в, д, ж*); кружками отмечены положения станций, где проводились измерения *in situ*, данные которых использовались для дальнейшего анализа. Карты мутности на те же дни, построенные с использованием алгоритма Dogliotti 2015 (*б, з, е, и*)

Изменение концентрации взвешенного вещества и мутности воды в дни подспутниковых измерений на станциях вблизи устья реки Сулак продемонстрировано на Рисунке 86. Значение мутности морской воды 2 июня 2023 г. было рассчитано (так как измерения показали превышение значений над возможным диапазоном измерений портативного мутномера) на основе регрессионного соотношения между мутностью воды и концентрацией взвешенного вещества $y = 0,88x$, где x — измеренная *in situ* мутность, а y — концентрация взвеси, определенная на основе проб воды. Подобное соотношение было получено нами как данных 2022 г., так и для данных 2023 г. Как видно на графике (см. Рисунок 86), 2 июня 2023 г. концентрация взвешенного вещества составляла 1097,4 г/м³, следовательно, расчётная мутность была определена как 1247 NTU. В последующие дни концентрация взвеси в пробах воды снижалась, и 7 июня она достигла значений 2022 г., когда её средние величины составляли примерно 95–120 г/м³.

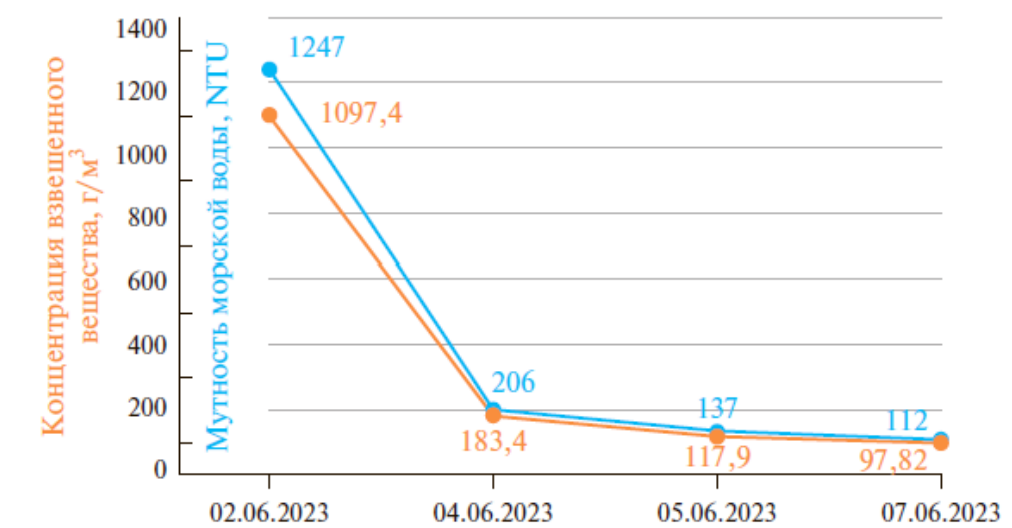


Рисунок 86 — Изменение концентрации взвешенного вещества и мутности морской воды в дни *in situ* измерений в июне 2023 г. на станциях вблизи устья реки Сулак

Взятые с верхнего горизонта (до 20 см) пробы воды использовались также для определения минерального состава взвеси. Минеральный состав взвеси 2 июня, в день поступления селевых масс в море, представлен преимущественно глинистыми минералами — 75 % от массы сухой взвеси (Рисунок 82). Содержание хлорита достигает 24 %, каолинита — 20 %, смешанослойных минералов слюда – смектит — 15 %, гидрослюда — 22 %. Количество карбонатов не превышает 1 %. Алюмосиликатные фазы представлены кварцем (20–25 %) и плагиоклазом (5 %). В дальнейшем содержание глинистых минералов во взвеси существенно понижается, достигая 44 % к 7 июня. Отмечается относительный рост количества карбонатного вещества и безводных алюмосиликатов. 7 июня 2023 г. минеральный состав

взвеси, определённый на ближайших к устью станциях, соответствует средним значениям, характерным для начала июня.

Таким образом, результаты спутниковых наблюдений и измерения *in situ* показали, что в результате попадания вместе с речной водой селевых масс в море резко повышается мутность воды в приустьевой зоне и концентрация взвешенного вещества. Минеральный состав взвеси в этот период представлен преимущественно глинистыми минералами. В течение последующих двух суток мутность и концентрация взвешенного вещества на ближайшей к устью станции уменьшились в шесть раз и продолжали снижаться до средних для этого района в начале июня значений. В дальнейшем, уже через 5 суток, все параметры (мутность воды, концентрация взвешенного вещества и минеральный состав взвеси) стали соответствовать средним значениям, характерным для начала июня для данного района.

Результаты исследования изменения параметров плюма реки Сулак после схода селевых потоков опубликованы в статье [Лаврова и др., 2023].

5.5 Основные выводы по главе 5

1. В результате спутникового мониторинга приустьевых зон рек Терек и Сулак за период с 2014–2022 гг. было определено, что 73 км береговой черты потенциально подвержены загрязнению, попадающему в море с водами этих рек. Максимальное удаление границы плюма реки Терек было зафиксировано на расстоянии 12 км, для реки Сулак — 14 км.
2. Была установлена связь между направлением распространения плюма и направлением ветра и сформированного им вдоль берегового течения. Было получено, что их влияние проявляется в течение полусуток.
3. Анализ полученных спутниковых изображений показал, что наблюдается ярко выраженная пространственная асимметрия в направлении распространения выносов. Для обеих рек на большом временном интервале (2014–2022) существует доминирующее направление распространения, а именно юго-восточное. Для р. Терек на это направление приходится 27,7 % от общего количества всех направлений, а для р. Сулак — 36,8 %. Если для р. Терек южное направление практически сравнимо с юго-восточным (26,7 %), то для р. Сулак вторым по значимости является восточное направление — 23,5 %.
4. В результате многолетнего спутникового мониторинга была выявлена сезонная изменчивость проявления плюмов рек Терек и Сулак на изображениях видимого диапазона. Более 60 % проявлений плюмов приходится на май – август, что объясняется периодом паводка, связанного с таянием снега в горах. Для Сулака этот период приходится на конец мая начало июня. Для Терека этот период продлевается до июля.

5. Впервые исследована трёхмерная структура плюма рек Терек и Сулак на основе данных натурных измерений. Было установлено, что изогалина 4,5–5 епс является нижней границей плюма и несмотря на количество взвешенного вещества выносимого с речным стоком и расхода реки, основная масса взвеси аккумулируется в одной и той же локализованной области (~500 м от берега) и сохраняется устойчивая стратификация прибрежных вод с примерно постоянной глубиной проникновения речных вод 1,5–2 м.
6. Установлено неоднократное совпадение границ области влияния речных вод как по спутниковым данным, так и измеренных *in situ*, что позволяет с уверенностью рекомендовать методы дистанционного зондирования для мониторинга приустьевых областей этих районов исследования при отсутствии натурных данных.
7. Получена формула преобразования оптических единиц мутности НТУ в гравиметрические г/м³ для рек Терек и Сулак в период весеннего паводка: $m = 0,83Turb$, где m — массовая концентрация взвеси в пробах, $Turb$ — значение мутности. Величина достоверной аппроксимации $R^2 = 0,9$. Данное соотношение практически совпадает (расхождение в одной сотой) с таким же соотношением для р. Мзымта.
8. Проведена валидация стандартных спутниковых алгоритмов пакета Acolite для тестовых районов в Каспийском море. Подтверждена возможность применимости алгоритма Dogliotti для восстановления мутности морской воды в приустьевых районах в диапазоне значений от 100 до 300 НТУ. При повторных численных экспериментах была подтверждена возможность применимости алгоритма Nechad при небольших максимальных значениях мутности 40–60 НТУ.
9. Определена масса и минеральный состав взвешенного вещества в приустьевой области, находящейся под влиянием стока рек Терек и Сулак. Установлено, что взвесь рек Терек и Сулак состоит преимущественно из кварца, различных гидрослюды и кальцита. Приведена и описана классификация минеральных фаз отобранных образцов. Выделены три преобладающие группы: безводные силикаты и алюмосиликаты, глинистые минералы и карбонатные минералы.
10. Установлена связь между значениями мутности морской воды в плюме и минеральным составом взвеси. Предложено использование эмпирического коэффициента $K = (\text{масса безводных алюмосиликатных минералов})/(\text{масса глинистых минералов})$. Установлено, что в выносе р. Терек среднее значение коэффициента $K = 0,72$. Ближе к устью оно увеличивается до 1,1. В выносе р. Сулак среднее значение $K = 0,98$. Получено, что в пробах с высокой мутностью отмечается большое количество безводных алюмосиликатов. При уменьшении мутности проб наряду с валовым уменьшением массы взвешенного вещества выявлен рост относительного количества глинистого материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использованный в работе комплексный подход научного исследования позволил объединить преимущества различных методов океанологических наблюдений: высокоточность контактных судовых измерений и объективность дистанционных методов.

В результате были сформулированы основные выводы диссертационной работы:

1. В результате многолетнего спутникового мониторинга выноса вод из Калининградского залива в Гданьский залив в период с января 2014 г. по декабрь 2020 г. были выявлены основные межгодовые и сезонные морфометрические характеристики плюма лагунных вод, его поверхностные проявления. Установлено, что размеры, площадь, форма и направление распространения плюма может существенно изменяться как от сезона к сезону, так и от года к году. Наблюдается высокая динамическая вариативность формы и размера плюма в течение нескольких суток. Существенное влияние на пространственное распространение плюма помимо прибрежных поверхностных течений оказывает ветровое воздействие. В более чем 80 % случаев вынос сконцентрирован в прибрежной зоне Балтийского пролива, не превышающей в размерах 10 км от береговой зоны и не более 8 км на запад и восток от створа пролива. За весь период исследований, максимальная площадь выноса одновременно составила 220 км² (13.08.20). Было получено, что максимальные площади выноса наблюдаются в летние месяцы при преобладании слабых С/СВ ветрах.
2. Получены зависимости характера распространения плюма лагунных вод от ветрового воздействия. При З/ЮЗ/ЮЮЗ ветрах, воды из залива распространяются в северо-восточном направлении. При В/СВ/ВСВ ветрах вынос распространяется в юго-западном направлении. При резких сменах характера ветрового режима, на западной периферии выноса могут образовываться вихревые или грибовидные структуры. Для затоков, обнаруженных по данным дистанционного зондирования, характерны сильные устойчивые З/СЗ ветра со средними скоростями 8–10 м/с.
3. Исследована вертикальная и пространственная структура плюма лагунных вод на основе данных натурных измерений. Было получено, что в приповерхностном слое плюм характеризуется пониженными значениями солёности, в среднем на 1–2 ед. меньше, чем морские воды (от 5,20 до 7,5 епс), и наоборот повышенными значениями мутности морской воды (в среднем от 8 до 17 НТУ). Исследование вертикальной структуры плюма показали, что в основном, в летний период, воды Калининградского залива теплее вод Гданьского залива на несколько градусов Цельсия и отличаются повышенными значениями концентрации хлорофилла *a* (5–6 мг/л с максимумами в подповерхностном слое до 17 мг/л). Глубина проникновения вод залива может варьироваться от 3 до 4,5 м.

4. На основе комплексного анализа спутниковых данных и синхронных контактных измерений выявлено, что для проявления чёткой границы плюма реки Мзымты на спутниковых изображениях достаточно тонкого (менее 1 м) подповерхностного слоя с небольшими величинами мутности (по нашим данным ≤ 5 НТУ). Температурные и плотностные градиенты не играют существенной роли.
5. Получена формула преобразования оптических единиц мутности НТУ в гравиметрические грамм на метр кубический для приустьевой зоны реки Мзымты в период весеннего паводка: $m = 0,84 \text{Turb}$, где m — массовая концентрация взвеси в пробах, Turb — значение мутности. Полученный результат позволяет применять только оптические датчики измерения мутности морской воды, не используя трудоёмкий весовой метод определения концентрации взвешенного вещества.
6. Проведённый корреляционный анализ значений концентрации взвешенного вещества и мутности морской воды, полученных по данным контактных измерений и значений, восстановленных из спутниковых данных с использованием различных стандартных алгоритмов показал, что при малых величинах мутности и концентрации взвешенного вещества в районе выноса р. Мзымта результаты применения алгоритмов C2RCC и Nechad 2015 лучше всего согласуются с данными натурных измерений. Для больших значений мутности вод плюма р. Мзымта (более 100 НТУ) целесообразнее использовать алгоритм Dogliotti.
7. Впервые исследована трёхмерная структура плюма рек Терек и Сулак на основе данных натурных измерений. Было установлено, что изогалина 4,5–5 епс является нижней границей плюма и, несмотря на количество взвешенного вещества выносимого с речным стоком и величины расхода реки, основная масса взвеси аккумулируется в одной и той же локализованной области (~500 м от берега) и сохраняется устойчивая стратификация прибрежных вод с примерно постоянной глубиной проникновения речных вод 1,5–2 м.
8. Установлено неоднократное совпадение границ области влияния речных вод Терека и Сулака как по спутниковым данным, так и по данным измерений *in situ*, что позволяет с уверенностью рекомендовать методы дистанционного зондирования для мониторинга приустьевых областей этих районов исследования при отсутствии натурных данных.
9. Результаты совместных исследований, основанных на спутниковом дистанционном зондировании и синхронных со спутниковой съёмкой измерений *in situ* в тестовых районах Каспийского моря, подтвердили возможность (адекватность) применимости стандартных алгоритмов для расчёта количественных значений мутности морской воды в приустьевых зонах. Были получены методические рекомендации по использованию определённых алгоритмов в зависимости от диапазона значений: алгоритма Nechad при

значениях 40–60 НТУ, алгоритм Dogliotti применим в периоды паводков для значений мутности от 100 НТУ и выше.

10. Определена масса и минеральный состав взвешенного вещества в приустьевых областях, находящихся под влиянием стоков рек Терек, Сулак и Мзымта. Установлено, что взвесь рек Терек и Сулак состоит преимущественно из кварца, различных гидрослюд и кальцита. Минеральный состав взвеси реки Мзымты преимущественно состоит из различных глинистых минералов (каолинит, монтмориллонит, хлорит, гидрослюды), кварца и полевых шпат. Установлена связь между значениями мутности морской воды в плюме и минеральным составом взвеси. Предложено использование эмпирического коэффициента $K = (\text{масса безводных алюмосиликатных минералов})/(\text{масса глинистых минералов})$. Получено, что в пробах с высокой мутностью отмечается большое количество безводных алюмосиликатов. При уменьшении мутности проб наряду с валовым уменьшением массы взвешенного вещества выявлен рост относительного количества глинистого материала.

На основе обобщения полученных в диссертационной работе результатов представляется возможным выделить некоторые сходства между исследованными речным и лагунным плюмами, а именно: горизонтальные (поверхностные) масштабы плюмов во много раз превышают вертикальные масштабы; глубина интрузии речных и лагунных вод в прибрежном районе в среднем 3–4 м и не зависит от горизонтальных размеров плюмов; плюмы речных и лагунных вод имеют схожие динамические свойства и в силу меньшей плотности, чем морские водные массы, в большей степени подвержены влиянию ветрового воздействия. С точки зрения дистанционного зондирования, четыре исследованных плюма различны по типу трассеров, за счёт которых они идентифицируются на спутниковых изображениях в видимом диапазоне. Для речных плюмов основным трассером являются воды с повышенным содержанием мутности, для выноса из Калининградского залива вид трассеров зависит от сезона: для весенне-летнего сезона — воды с повышенным содержанием хлорофилла *a*, вследствие интенсивного цветения цианобактерий в заливе, в остальные сезоны, либо мутные воды, либо битый лёд. Порядок измеренных величин мутности в речных плюмах намного выше и вариативнее, чем в лагунных. Измеренные максимумы мутности в лагунных плюмах ~20 НТУ, в речных плюмах могут достигать ~500 НТУ в период весенних паводков. Экстремальные значения мутности морской воды были измерены после схода селевых потоков в приустьевой зоне Каспийского моря ~1200 НТУ. Эти два фактора необходимо учитывать при использовании методов дистанционного зондирования для восстановления полей концентрации взвешенного вещества и мутности морской воды, применяя необходимые алгоритмы расчёта количественных параметров, с учётом специфики каждого района исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айбулатов Н.А., Завьялов П.О., Пелевин В.В. Особенности гидрофизического самоочищения российской прибрежной зоны Чёрного моря близ устьев рек // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2008. № 4. С. 301–310.
2. Альтман Э.М., Кумыш Н.И. Многолетняя внутригодовая изменчивость баланса пресных вод Чёрного моря // Тр. ГОИН. 1986. Вып. 176. С. 3–18.
3. Амбросимов А.К., Ключиткин А.К., Гольдин Ю.А., Захарова Е.Е. и др. Комплексные исследования системы Каспийского моря в 39-м рейсе научно-исследовательского судна «Рифт» // Океанология. 2014. Т. 54. № 3. С. 428–432. DOI: 10.7868/S0030157414020014.
4. Архипкин В.С., Косарев А.Н., Гиппиус Ф.Н., Мигали Д.И. Сезонная изменчивость климатических полей температуры, солёности и циркуляции вод Чёрного и Каспийского морей // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5. «География». 2013. № 5.
5. Буканова Т.В., Вазюля С.В., Копелевич О.В., Буренков В.И. и др. Региональные алгоритмы оценки концентрации хлорофилла и взвеси в Юго-Восточной Балтике по данным спутниковых сканеров цвета // Современные проблемы дистанционного исследования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 64–73.
6. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря: Моделирование и прогноз: научно-метод. пособие / ред. Е.С. Нестеров. М.: Триада лтд. 2016. 378 с.
7. Георгиевский В.Ю. Водный баланс Каспийского моря по данным наблюдений // Тр. Ленинградского гидрометеорол. ин-та. 1982. Вып. 79. С. 129–136.
8. Гидрология и гидрохимия морей. Т. 6. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / под ред. Терзиева Ф.С., Косарева А.Н., Керимова А.А. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 359 с.
9. Гидрометеорологический режим Вислинского залива / под ред. Н.Н. Лазаренко, А. Маевского. Ленинград: Гидрометиздат, 1971. 279 с.
10. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 3. Балтийское море. Вып. 2. СПб.: Гидрометеиздат, 1994. 436 с.
11. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Шеремет Н.А. Фронтальная зона апвеллинга у восточного побережья Каспийского моря (спутниковые наблюдения) // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 4. С. 1–12.
12. Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Пиотух В.Б. Мезомасштабная динамика вод Чёрного моря // Океанология на старте 21 века. М.: Наука, 2008. С. 11–42.
13. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Шеремет Н.А. Динамика зоны апвеллинга у восточного побережья Каспия в сезонном цикле (май – сентябрь) по спутниковым

- среднемноголетним температурным данным (2003–2019) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 215–226. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-215-226.
14. Глуховец Д.И., Салюк П.А., Шеберстов С.В. и др. Восстановление полного комплекса оптических характеристик для оценки теплосодержания в южной части Баренцева моря в июне 2021 г. // Современные проблемы дистанционного исследования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 214–225. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-214-225.
 15. Гоголев Д.Г., Буканова Т.В., Александров С.В. (2020а) Региональная коррекция алгоритмов расчета концентрации хлорофилла «а» по данным спутниковых радиометров VIIRS и OLCI в юго-восточной части Балтийского моря // Науч. журн. «Известия КГТУ». 2020. № 59. С. 13–23. DOI: 10.46845/1997-3071-2020-59-13-23.
 16. Гоголев Д.Г., Буканова Т.В., Кудрявцева Е.А. (2020б) Концентрация хлорофилла «а» в юго-восточной части Балтийского моря летом 2018 года по спутниковым данным // Вестн. Балтийского федер. ун-та им. И. Канта. Сер. «Естествен. и мед. науки». 2020. № 4. С. 83–91.
 17. Грабецкая Н.А. Гравитационная дифференциация материала как критерий восстановления условий осадконакопления // Бюл. комиссии по изучению четвертичного периода. 1990. № 59. С. 58–65.
 18. Джаошвили Ш. Реки Чёрного моря: Технический отчет № 71. Европейское агентство по охране окружающей среды, 2002. 58 с.
 19. Дзядюшко З., Зорина В.А. Сгонно-нагонные колебания уровня // Гидрометеорологический режим Вислинского залива / под ред. Н.Н. Лазаренко, А. Маевского. М.: Гидрометеиздат, 1971. С. 102–108.
 20. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
 21. Довыденко Л.В. Калининградский морской канал. Калининград: Живем, 2011. 192 с. ISBN 97859034001954.
 22. Доронин Ю.П. Региональная океанография. Л.: Гидрометеиздат. 1986.
 23. Дрожжина К.В. Особенности природно-климатических условий бассейна реки Мзымта для целей рекреационной деятельности // Молодой ученый. 2013. № 5(52). С. 196–198.
 24. Ельцева И.А. Течения // Гидрометеорол. режим Вислинского залива / под ред. Н.Н. Лазаренко, А. Маевского. М.: Гидрометеиздат, 1971. С. 130–142.
 25. Журбас В.М., Завьялов П.О., Свиридов А.С. и др. О переносе стока малых рек вдольбереговым бароклинным морским течением // Океанология. 2011. Т. 51. № 3. С. 440–449.

26. *Завьялов П.О., Маккавеев П.Н., Коновалов Б.В. и др.* Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Чёрного моря // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 3. С. 293–308.
27. *Залогин Б.С., Косарев А.Н.* Моря. М.: Мысль. 1999.
28. *Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В. и др.* Поверхностный опресненный слой в Карском море // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 698–708.
29. *Зацепин А.Г., Кондрашов А.А., Корж А.О. и др.* Суб мезомасштабные вихри на кавказском шельфе Чёрного моря и порождающие их механизмы // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 4. С. 592–605.
30. *Зонн И.С.* Каспийская энциклопедия. М.: Международ. отношения, 2004. 461 с.
31. *Иванов В.А., Ильин Ю.П.* Атмосферные и гидрологические условия, способствующие распространению речных вод в северо-западной части Чёрного моря // *Комплекс. экол. исслед. Чёрного моря*. Севастополь: МГИ НАН Украины, 1995. С. 68–81.
32. Каспийский регион: энциклопедия / сост. Зонн И.С., Костяной А.Г., Жильцов С.С., Семенов С.В. В 4-х т. Т. 1. Международно-правовые документы. М.: Московский ун-т им. С.Ю. Витте. М., 2019. 504 с.
33. Каспийское море. Гидрология и гидрохимия / отв. ред. Байдин С.С., Косарев А.Н. М.: Наука, 1986. 261 с.
34. Каспийское море. Геология и нефтегазоносность / ред. Крылов Н.А. М.: Наука, 1987. 295 с.
35. Каталог малых портов и гаваней Калининградского/Вислинского залива / под ред. Чубаренко Б.В., Шванковска Б., Федорова Г.М., Гриценко В.А. М.: Экслибрис. 2015. 180 с.
36. *Клювиткин А.А., Амбросимов А.К., Кравчишина М.Д. и др.* Комплексные исследования системы Каспийского моря во 2-м рейсе научно-исследовательского судна «Никифор Шуренков» // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 2. С. 344–347. DOI: 10.7868/S0030157415020070.
37. *Копелевич О.В.* Малопараметрическая модель оптических свойств морской воды // *Оптика океана*. М.: Наука, 1983. Т. 1. С. 208–234.
38. *Копелевич О.В., Вазюля С.В., Шеберстов С.В.* Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биооптических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвета // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2006. Т. 2. № 3. С. 99–105.
39. *Копелевич О.В., Буренков В.И., Вазюля С.В. и др.* Учет отражения солнечного излучения от дна на мелководье при обработке данных спутниковых сканеров цвета // *Современные*

- проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 117–127.
40. *Копелевич О.В., Вазюля С.В., Шеберстов С.В., Буканова Т.В.* Взвешенное вещество в поверхностном слое вод Юго-Восточной Балтики по спутниковым данным // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 1. С. 51–59.
 41. *Короткина О.А., Завьялов П.О., Осадчиев А.А.* Субмезомасштабная изменчивость полей течения и ветра в прибрежной акватории Сочи // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 5. С. 797–806.
 42. *Короткина О.А., Завьялов П.О., Осадчиев А.А.* Синоптическая изменчивость течений в прибрежной акватории г. Сочи // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 3. С. 581–593.
 43. *Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. и др.* Мелкомасштабные вихри Чёрного моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2010. Т. 7. № 1. С. 248–259.
 44. *Костяной А.Г., Еремина Т.Р., Иванов В.В. и др.* Морские природные системы // Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова; Росгидромет. СПб.: Научное издание. 2022. С. 192–238.
 45. *Кочергин В.С., Кочергин С.В.* Вариационный алгоритм идентификации скорости седиментации взвешенного вещества в море // *Экол. вестн. науч. центров Черноморского экон. сотрудничества*. 2020. Т. 17. № 4. С. 43–47. <https://doi.org/10.31429/vestnik-17-4-43-47>.
 46. *Кравцова В.И., Митькиных Н.С.* Устья рек России: Атлас космических снимков / под ред. В.Н. Михайлова. М.: Науч. мир, 2013. 124 с.
 47. *Краюшкин Е.В., Лаврова О.Ю., Назирова К.Р. и др.* Формирование и распространение вихревого диполя за мысом таран в Юго-Восточной Балтике // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 4. С. 214–221. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-214-221.
 48. *Краюшкин Е.В., Назирова К.Р., Лаврова О.Ю., Князев Н.А.* Субмезомасштабный циклонический вихрь за мысом Гвардейский в Юго-Восточной Балтике: спутниковые наблюдения и подспутниковые измерения // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 4. С. 290–299. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-290-299.
 49. *Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А. и др.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 470 с.
 50. *Лаврова О.Ю., Краюшкин Е.В., Соловьев Д.М. и др.* Влияние ветрового воздействия и гидродинамических процессов на распространение вод Калининградского залива в

акватории Балтийского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 76–99.

51. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 335 с.
52. Лаврова О.Ю., Краюшкин Е.В., Назирова К.Р., Строчков А.Я. Возможность получения динамических и пространственных характеристик процессов и явлений в прибрежной зоне на основе комплексного использования квазисинхронных спутниковых данных // Вестн. ТвГУ. Сер. «География и Геоэкология». 2018. № 3. С. 108–124. <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2018-3-108-124>.
53. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Уваров И.А., Луян Е.А. (2019а) Текущие возможности и опыт использования информационной системы See the Sea для изучения и мониторинга явлений и процессов на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 266–287. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
54. Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М., Строчков А.Я. и др. (2019б) Использование мини-дрифтеров для проведения подспутниковых измерений параметров прибрежных течений // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 5. С. 36–49. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019536-49>.
55. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г. (2022а) Спутниковые методы исследования изменчивости Каспийского моря. М.: ИКИ РАН, 2022. 250 с.
56. Лаврова О.Ю., Назирова К.Р., Алферьева Я.О. и др. (2022б) Сопоставление параметров рек Сулак и Терек на основе спутниковых данных и измерений *in situ* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 264–283. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-264-283.
57. Лаврова О.Ю., Назирова К.Р., Алферьева Я.О. и др. Изменение параметров плюма реки Сулак после схода селевых потоков в горах Дагестана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 323–329. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-323-329.
58. Лебедев С.А., Костяной А.Г. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. М.: Изд. центр «МОРЕ» Международ. ин-та океана. 2005. 366 с.
59. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
60. Лохов А.С., Кравчишина М.Д., Клювиткин А.А., Коченкова А.И. Измерение характеристик взвешенных частиц Баренцева моря *in situ* с помощью лазерного дифрактометра LISST-deep // Океанология. 2020. Т. 60. С. 747–761. DOI: 10.31857/S0030157420050159.

61. *Лупян Е.А., Матвеев А.М., Уваров И.А. и др.* Спутниковый сервис See the Sea — инструмент для изучения процессов и явлений на поверхности океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 251–262.
62. *Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А. и др.* Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
63. *Микаэлян А.С., Зацепин А.Г., Кубряков А.А.* Воздействие мезомасштабной вихревой динамики на биопродуктивность морских экосистем (обзор) // Морской гидрофиз. журн. 2020. Т. 36. № 6. С. 646–675. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-6-646-675>.
64. *Микулинский З.* Водный баланс Балтийского моря // Водные ресурсы. 1974. № 5.
65. *Михайлов В.Н., Морозов В.Н., Михайлова М.В.* Гидрологические процессы в устьевой области Дуная и их возможные изменения // Водные ресурсы. 1988. № 1. С. 24–32.
66. *Михайлов В.Н., Кравцова В.И., Магрицкий Д.В.* Особенности развития современной дельты р. Сулак // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 2. С. 133–147.
67. *Назирова К.Р., Жаданова П.Д., Князев Н.А.* Результаты многолетних исследований полей мутности и концентрации взвешенного вещества в приустьевой зоне р. Мзымты на основе натурных измерений и спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 321–332. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-321-332.
68. *Назирова К.Р., Лаврова О.Ю., Краюшкин Е.В. и др.* Особенности выявления параметров речного плюма контактными и дистанционными методами // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 227–243. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-227-243.
69. *Назирова К.Р., Краюшкин Е.В.* Мониторинг распространения вод Калининградского залива в акватории Гданьского залива (Юго-Восточная Балтика) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 271–284. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-271-284.
70. *Оптика океана / под ред. Мони́на А.С.* Т. 1. Физическая оптика океана. М.: Наука, 1983. 371 с.; Т. 2. Прикладная оптика океана. 236 с.
71. *Осадчиев А.А.* Речные плюмы М.: Науч. мир, 2021. 286 с. ISBN 978-5-91522-518-2.
72. *Осадчиев А.А., Барымова А.А., Седаков Р.О. и др.* Гидрофизическая структура и динамика течения плюма реки Кодор // Океанология. 2021. Т. 61. № 1. С. 5–20. DOI: 10.31857/S0030157421010159.

73. Паутова Л.А., Кравчишина М.Д., Силкин В.А. и др. Диатомовые виды-вселенцы в осеннем фитопланктоне Каспийского моря: роль в формировании общей биомассы и распределение в поле солёности // Российский журн. биологических инвазий. 2022. Т. 15. № 2. С. 68–82. DOI: 10.35885/1996-1499-15-2-68-82.
74. Рыбакова И.В., Копелевич О.В., Буренков В.И. и др. Верификация спутниковых биооптических алгоритмов для Каспийского моря по судовым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 202–209.
75. Серебряный А.Н. Эффекты нелинейности во внутренних волнах на шельфе // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1990. Т. 26. № 3. С. 285–293.
76. Симонов А.И. Гидрология и гидрохимия устьевого взморья в морях без приливов. М.: Гидрометеиздат, 1969. 230 с.
77. Симонов А.И., Альтман Э.Н. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Чёрное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 430 с.
78. Смирнова К.И. Изменчивость элементов водного баланса Каспийского моря // Тр. ГМЦ СССР. 1968. Вып. 34. С. 26–33.
79. Стонт Ж.И., Буканова Т.В., Крек Е.В. Изменчивость климатических характеристик прибрежной части юго-восточной Балтики в начале XXI века // Вестн. Балтийского федер. ун-та им. И. Канта. Сер. «Естественные и медицинские науки». 2020. № 1. С. 81–94.
80. Тужилкин В.С., Гончаров А.В. О вентилиции глубинных вод Каспийского моря // Тр. Гос. океаногр. ин-та. 2008. № 211. С. 43–64.
81. Шикломанов И.А. Гидрологические аспекты проблемы Каспийского моря. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 78 с.
82. Abascal-Zorrilla N., Vantrepotte V., Huybrechts N. et al. Dynamics of the Estuarine Turbidity Maximum Zone from Landsat-8 Data: The Case of the Maroni River Estuary, French Guiana // Remote Sensing. 2020. V. 12. Article 2173. <https://doi.org/10.3390/rs12132173>.
83. Agrawal Y.C., Pottsmith H.C. Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport // Marine Geology. 2000. V. 168. P. 89–114.
84. Andre G., Garreau P., Fraunie P. Mesoscale slope current variability in the Gulf of Lions. Interpretation of in situ measurements using a three-dimensional model // Continental shelf research. 2009. V. 29. P. 407–423. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.10.004>.
85. Babin M.A., Morel V., Fournier-Sicre F.F., Stramski D. Light scattering properties of marine particles in coastal and open ocean waters as related to the particle mass concentration // Limnology and Oceanography. 2003. V. 48. P. 843–859. DOI: 10.4319/lo.2003.48.2.0843.

86. *Balopoulos E. Th., Collins M.B., James A.E.* Satellite images and their use in the numerical modelling of coastal processes // Intern. J. Remote Sensing. 1986. V. 7. P. 905–919.
87. *Berdeal I., Hickey B., Kawase M.* Influence of wind stress and ambient flow on high discharge river plume // J. Geophysical Research. 2002. V. 107. Article 3130. DOI: 10.1029/2001JC000932.
88. *Bourrin F., Friend P.L., Amos C.L. et al.* Sediment dispersal from a typical Mediterranean flood: The Têt River, Gulf of Lions // Continental Shelf Research. 2008. V. 28. Iss. 15. P. 1895–1910. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.06.005>.
89. *Boyd P.W., Ellwood M.J., Tagliabue A., Twining B.S.* Biotic and abiotic retention, recycling and remineralization of metals in the ocean // Nature Geosci. 2017. V. 10. P. 167–173.
90. *Bricaud A., Babin M., Morel A., Claustre H.* Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization // J. Geophysical Research. 1981. V. 100. No. C7. P. 43–53.
91. *Brockmann C., Doerffer R., Peters M. et al.* Evolution of the C2RCC Neural Network for Sentinel 2 and 3 for the Retrieval of Ocean Colour Products in Normal and Extreme Optically Complex Waters // Living Planet Symposium: Proc. ESA Living Planet Symposium. Prague, Czech Republic, 9–13 May 2016. ESA-SP: São Paulo: Brazil, 2016. V. 740. ISBN 978-92-9221-305-3.
92. *Chen J., D'Sa E., Cui T., Zhang X.* A semi-analytical total suspended sediment retrieval model in turbid coastal waters: A case study in Changjiang River Estuary // Opt. Express. 2013. V. 21. P. 13018–13031. DOI: 10.1364/oe.21.013018.
93. *Chubarenko B., Margonski P.* The Vistula Lagoon // Ecology of Baltic Coastal Waters. Ecological Studies. V. 197 / ed. U. Sshiewer. Springer-Verlag, 2008. P. 167–195.
94. *Chubarenko B., Zakirov R.* Water Exchange of Nontidal Estuarine Coastal Vistula Lagoon with the Baltic Sea // J. Waterway Port Coastal and Ocean Engineering. 2021. V. 147. No. 4. Article 05021005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000633](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000633).
95. *Clark J.B., Mannino A.* The Impacts of Freshwater Input and Surface Wind Velocity on the Strength and Extent of a Large High Latitude River Plume // Frontiers in Marine Science. 2022. V. 8. Article 793217. DOI: 10.3389/fmars.2021.793217
96. *Constantin S., Doxaran D., Constantinescu S.* Estimation of water turbidity and analysis of its spatio-temporal variability in the Danube River plume (Black Sea) using MODIS satellite data // Continental Shelf Research. 2016. V. 112. P. 14–30. DOI: 10.1016/j.csr.2015.11.009.
97. *Darecki M., Stramski D.* An evaluation of MODIS and Sea WiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea // Remote Sensing of Environment. 2004. V. 89. P. 326–350.
98. *Doerffer R., Schiller H.* The MERIS Case 2 water algorithm // Intern. J. Remote Sensing. 2007. V. 28, 517–535. DOI: 10.1080/01431160600821127.

99. *Dogliotti A.I., Ruddick K.G., Nechad B. et al.* A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters // *Remote Sens. Environ.* 2015. V. 156. P. 157–168. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020>.
100. *Doxaran D., Froidefond J.-M., Castaing P.* A reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal waters // *Intern. J. Remote Sensing*. 2002. V. 23. No. 23. P. 5079–5085. DOI: 10.1080/0143116021000009912.
101. *Estourne C., Kondrachoff V., Marsaleix P., Vehil R.* The plume of the Rhône: numerical simulation and remote sensing // *Continental Shelf Research*. 1997. V. 17. No. 8. P. 899–924. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(96\)00064-7](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(96)00064-7).
102. *Fournier S., Vialard J., Lengaigne M. et al.* Modulation of the GangesBrahmaputra river plume by the Indian Ocean dipole and eddies inferred from satellite observations // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2017. V. 122. P. 9591–9604. <https://doi.org/10.1002/2017JC013333>.
103. *Gangloff A., Verney R., Doxaran D. et al.* Investigating Rhône River plume (Gulf of Lions, France) dynamics using metrics analysis from the MERIS 300 m Ocean Color archive (2002–2012) // *Continental Shelf Research*. 2007. V. 144. P. 98–111. DOI: 10.1016/j.csr.2017.06.024.
104. *Gernez P., Lafon V., Lerouxel A., Curti C. et al.* Toward Sentinel-2 High Resolution Remote Sensing of Suspended Particulate Matter in Very Turbid Waters: SPOT4 (Take5) Experiment in the Loire and Gironde Estuaries // *Remote Sensing*. 2015. V. 7. P. 9507–9528. DOI: 10.3390/rs70809507.
105. *Gohin F.* Annual cycles of chlorophyll-a, non-algal suspended particulate matter, and turbidity observed from space and in situ in coastal waters // *Ocean Sci.* 2011. V. 7. P. 705–732. DOI: 10.5194/os-7-705-2011.
106. *Gower J., Doerffer R., Borstad G.A.* Interpretation of the 685 nm peak in water-leaving radiance spectra in terms of fluorescence, absorption and scattering, and its observation by MERIS // *Intern. J. Remote Sensing*. 1999. V. 20. P. 1771–1786. DOI: 10.1080/014311699212470.
107. *Gower J., King S., Borstad G.A., Brown L.* Detection of intense plankton blooms using the 709 nm band of the MERIS imaging spectrometer // *Intern. J. Remote Sensing*. 2005. V. 26. P. 2005–2012. DOI: 10.1080/01431160500075857.
108. *Han B., Loisel H., Vantrepotte V. et al.* Development of a Semi-Analytical Algorithm for the Retrieval of Suspended Particulate Matter from Remote Sensing over Clear to Very Turbid Waters // *Remote Sensing*. 2016. V. 8. No. 3. Article 211. DOI: 10.3390/rs8030211.
109. *Hayes M., Puckett B., Deaton C., Ridge J.* Estimating Dredge-Induced Turbidity using Drone Imagery // <https://www.preprints.org>. 2022. Article 2022010424. DOI: 10.20944/preprints202201.0424.v1.

110. *Hobson L.A.* Some influences of the Columbia River effluent on marine phytoplankton during January 1961. // *Limnology and Oceanography*. 1966. V. 11. No 1. P. 223–234.
111. *Horner-Devine A.R., Hetland R.D., MacDonald D.G.* Mixing and transport in coastal river plumes // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2015. V. 47. P. 569–594. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010313-141408>.
112. *Knaeps E., Ruddick K.G., Doxaran D. et al.* A SWIR based algorithm to retrieve total suspended matter in extremely turbid waters // *Remote Sens. Environ.* 2015. V. 168. P. 66–79. DOI: 10.1016/j.rse.2015.06.022.
113. *Kniazhev N., Elizarov D., Lavrova O. et al.* Web service for storing and processing sea water data measured in situ concurrently with satellite survey // *Intern. J. Earth Sciences (Bollettino di Geofisica teorica ed applicata)*. 2021. V. 62. Suppl. 1. P. 186–188. ISSN 00066729.
114. *Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Ershova S.V. et al.* Application of SeaWiFS data for studying variability of biooptical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas // *Deep-Sea Research II*. 2004. V. 51. P. 1063–1091.
115. *Kopelevich O., Sheberstov S., Burenkov V. et al.* Assessment of underwater irradiance and absorption of solar radiation at water column from satellite data. In *SPIE Remote Sensing // Proc. Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters*. Moscow, Russian, 1–3 Jan. 2007. Bellingham, WA, USA: SPIE-Intern. Society for Optics and Photonics, 2007. V. 6615. Article 661507. DOI: 10.1117/12.740441.
116. *Kostianoy A.G., Kosarev A.N.* The Caspian Sea Environment: The Handbook of Environmental Chemistry. Ser. Water Pollution. V. 5. Pt. 5P. Berlin, Heidelberg, N.Y.: Springer-Verlag, 2005. 271 p. <https://doi.org/10.1007/b138238>.
117. *Kozlov I., Romanenkov D., Zimin A., Chapron B.* SAR observing large-scale nonlinear internal waves in the White Sea // *Remote Sens. Environ.* 2014. V. 147. P. 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.017>.
118. *Krayushkin E., Lavrova O., Nazirova K.* Distinctive features of the Vistula lagoon outflow by remote sensing and oceanographic experiments data // *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*. 2019. V. 11150. Article 111500W. DOI: 10.1117/12.2533024.
119. *Lavrova O.Y., Soloviev D.M., Strochkov M.A. et al.* River plumes investigation using Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI data // *SPIE Remote Sensing: Proc. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2016*. Edinburgh, UK, 26–29 Sept. 2016. Article 9999. DOI: 10.1117/12.2241312.
120. *Lavrova O., Mityagina M.* Satellite Survey of Internal Waves in the Black and Caspian Seas // *Remote Sensing*. 2017. V. 9. Article 892. DOI: 10.3390/rs9090892.

121. *Lavrova O., Nazirova K., Soloviev D.* Internal Waves on River Plumes // IGARSS 2018. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2018. P. 7937–7940. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517318.
122. *Lavrova O.Y., Krayushkin E.V., Nazirova K.R., Storchkov A.Y.* Vortex structures in the Southeastern Baltic Sea: Satellite observations and concurrent measurements // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2018. Article 1078404. DOI: 10.1117/12.2325463.
123. *Lavrova O.Yu., Nazirova K.R., Krayushkin E.V., Storchkov A.Ya.* Concurrent field experiments and satellite surveys for assessing environmental risk in the coastal zone of Southeast Baltic // *Ecologica Montenegrina*. 2019. V. 25. P. 44–54. <https://doi.org/10.37828/em.2019.25.5>.
124. *Loupian E., Lavrova O., Kashnitsky A., Uvarov I.* “See the Sea” — new opportunities for distributed collaboration aimed at solution of oceanographic problems using remote sensing // *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. 2018. V. 59. Supl. 1. P. 91–93.
125. *Many G., Bourrin F., Madron X. et al.* Particle assemblage characterization in the Phone River ROFI // *J. Marine Systems*. 2016. V. 157. P. 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2015.12.010>.
126. *Manzo C., Braga F., Zaggia L. et al.* Spatio-temporal analysis of prodelta dynamics by means of new satellite generation: the case of Po river by Landsat-8 data // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2018. V. 66. P. 210–225. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.11.012>.
127. *Marmorino G., Evans T.* Interpreting Patterns of Concentric Rings within Small Buoyant River Plumes // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. Article 1361. <https://doi.org/10.3390/rs13071361>.
128. *Mendes R., da Silva J.C.B., Magalhaes J.M. et al.* On the generation of internal waves by river plumes in subcritical initial conditions // *scientific Reports*. 2021. V. 11. Article 1963. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81464-5>.
129. *Merten G.H., Capel P.D., Minella J.P.G.* Effects of suspended sediment concentration and grain size on three optical turbidity sensors // *J. Soils Sediments*. 2014. V. 14. P. 1235–1241. <http://doi.org/10.1007/s11368-013-0813-0>.
130. *Mobley C.D., Stramski D., Bissett W.P., Boss E.* Optical Modeling of Ocean Waters: Is the Case 1–Case 2 Classification Still Useful? // *Oceanography* 2004. V. 17. P. 60–67. <http://doi.org/10.5670/oceanog.2004.48>.
131. *Morel A., Prieur L.* Analysis of variations in ocean color // *Limnology and Oceanography*. 1977. V. 22. P. 709–722. <http://doi.org/10.4319/lo.1977.22.4.0709>.
132. *Nash J., Moum J.* River plumes as a source of large-amplitude internal waves in the coastal ocean // *Nature*. 2005. V. 437. P. 400–403. <https://doi.org/10.1038/nature03936>.

133. *Nazirova K., Lavrova O., Krayushkin E.* Features of monitoring near the mouth zones by contact and contactless methods // *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*. 2019. V. 11150. Article 111500H. DOI: 10.1117/12.253316.
134. *Nazirova K., Alferyeva Y., Lavrova O. et al.* Comparison of in situ and Remote-Sensing Methods to Determine Turbidity and Concentration of Suspended Matter in the Estuary Zone of the Mzymta River, Black Sea // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. Article 143. <https://doi.org/10.3390/rs13010143>.
135. *Nechad B., Ruddick K.G., Neukermans G.* Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of turbidity in coastal waters // *SPIE Remote Sensing: Proc. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions* 2009. Berlin, Germany, 31 Aug. – 3 Sept. 2009. V. 7473. Article 74730H. <http://doi.org/10.1117/12.830700>.
136. *Nechad B., Ruddick K.G., Park Y.* Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters // *Remote Sens. Environ.* 2010. V. 114. P. 854–866. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.022>.
137. *Nechad B., Ruddick K., Schroeder T. et al.* CoastColour Round Robin data sets: A database to evaluate the performance of algorithms for the retrieval of water quality parameters in coastal waters // *Earth System Science Data*. 2015. V. 7. P. 319–348. <http://doi.org/10.5194/essd-7-319-2015>.
138. *Neukermans G., Loisel H., Meriaux X. et al.* In situ variability of mass-specific beam attenuation and backscattering of marine particles with respect to particle size, density, and composition // *Limnology and Oceanography*. 2012. V. 57. P. 124–144. <http://doi.org/10.4319/lo.2012.57.1.0124>.
139. *Novoa S., Doxaran D., Ody A. et al.* Atmospheric corrections and multi-conditional algorithm for multi-sensor remote sensing of suspended particulate matter in low-to-high turbidity levels Coastal Waters // *Remote Sensing*. 2017. V. 9. Article 61. DOI: 10.3390/rs9010061.
140. *Osadchiev A., Barymova A., Sedakov R. et al.* Spatial Structure, Short-temporal Variability, and Dynamical Features of Small River Plumes as Observed by Aerial Drones: Case Study of the Kodor and Bzyp River Plumes // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. No. 18. Article 3079. <https://doi.org/10.3390/rs12183079>.
141. *Osadchiev A., Sedakov R., Gordey A., Barymova A.* Internal Waves as a Source of Concentric Rings within Small River Plumes // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. Article 4275. <https://doi.org/10.3390/rs13214275>.
142. *Ou S., Zhang H., Wang D.* Dynamics of the buoyant plume off the Pearl River estuary in summer // *Environ. Fluid Mech.* 2009. V. 9. P. 471–492. DOI: 10.1007/s10652-009-9146-3.
143. *Park K.* Columbia river plume identification by specific alkalinity // *Limnology and Oceanography*. 1966. V. 11. No. 1. P. 118–120. DOI: 10.4319/lo.1966.11.1.0118.

144. *Petus C., Chust G., Gohin F. et al.* Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery // *Continental Shelf Research*. 2010. V. 30. P. 379–392. DOI: 10.1016/j.csr.2009.12.007.
145. *Prange M., Wilke T., Wesselingh F.P.* The other side of sea level change // *Nature Communications Earth and Environment*. 2020. No. 1. Article 69. 4 p. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00075-6>.
146. *Pruszek Z.; van Ninh P., Szmytkiewicz M., Ostrowski R.* Hydrology and morphology of two river mouth regions (temperate Vistula Delta and subtropical Red River Delta) // *Oceanologia*. 2005. V. 47. P. 365–385.
147. *Renosh P.R., Doxaran D., Keukelaere L.D., Gossn J.I.* Evaluation of Atmospheric Correction Algorithms for Sentinel-2-MSI and Sentinel-3-OLCI in Highly Turbid Estuarine Waters // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. No. 8. Article 1285. <https://doi.org/10.3390/rs12081285>.
148. *Sadar M.* Turbidity Science. Technical Information Series. 1998, Booklet 11. URL: <https://www.hach.com/asset-get.download-en.jsa?code=61792> (access. 02.11.2020).
149. *Schroeder T., Schaale M., Fischer J.* Retrieval of atmospheric and oceanic properties from MERIS measurements: A new Case-2 water processor for BEAM // *Intern. J. Remote Sensing*. 2007. V. 28. P. 5627–5632. DOI: 10.1080/01431160701601774.
150. *Seena G., Muraleedharan K.R., Revichandran C. et al.* Seasonal spreading and transport of buoyant plumes in the shelf off Kochi, South west coast of India-A modeling approach // *Scientific Reports*. 2019. V. 9. Article 19956. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56103-9>.
151. *Tavora J., Boss E., Doxaran D., Hill P.* An Algorithm to Estimate Suspended Particulate Matter Concentrations and Associated Uncertainties from Remote Sensing Reflectance in Coastal Environments // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. Article 2172. DOI: 10.3390/rs12132172.
152. *Van de Hulst H.C.* Light Scattering by Small Particles. N.Y., USA: Dover Publications, 1981.
153. *Van Der Linde D.W.* Protocol for determination of total suspended matter in oceans and coastal zones: Technical Note No. I.98.182 / Joint Research Centre. Ispra. 1998.
154. *Vanhellemont Q.* Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives // *Remote Sens. Environ.* 2019. V. 225. P. 175–192. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.010>.
155. *Vanhellemont Q., Ruddick K.* Acolite for Sentinel-2: Aquatic applications of MSI imagery // *Proc. 2016 ESA Living Planet Symp. Prague, Czech Republic, 9–13 May 2016*. 2016. P. 9–13.
156. *Vantrepotte V., Loisel H., Mériaux X. et al.* Seasonal and inter-annual (2002–2010) variability of the suspended particulate matter as retrieved from satellite ocean color sensor over the French Guiana coastal waters // *J. Coastal Research*. 2011. V. 64. P. 1750–1754.

157. *Xiaoqin Du, James T. Liu, Jay Lee et al.* Influence of sediment sources, water mass, and physical processes on the dynamics of flocs at a location between the mouth of a river and the head of a submarine canyon // *Marine Geology*. 2022. V. 445. Article 106736. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2022.106736>.
158. *Xue K., Ma R., Shen M. et al.* Variations of suspended particulate concentration and composition in Chinese lakes observed from Sentinel-3A OLCI images // *Science Total Environment*. 2020. V. 721. Article 137774. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137774.
159. *Zavialov P.O.* Are periodic oscillations of sea surface height inherent to river plumes? // *Frontiers in Marine Science*. 2021. V. 8. Article 679323. DOI: 10.3389/fmars.2021.679323.
160. *Zavialov P.O., Barbanova E.S., Pelevin V.V.* Estimating the deposition of river-borne suspended matter from the joint analysis of suspension concentration and salinity // *Oceanology*. 2015. V. 55. P. 832–836. 2015. <https://doi.org/10.1134/S0001437015060211>.
161. *Zhi H., Wu H., Wu J. et al.* River Plume Rooted on the Sea-Floor: Seasonal and Spring-Neap Variability of the Pearl River Plume Front // *Frontiers in Marine Science*. 2022. V. 9. Article 791948. DOI: 10.3389/fmars.2022.791948.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 — Параметры спутниковой информации на период проведения экспедиционных работ в районе реки Мзымты в 2018 г.

Дата	Время (GMT)	Прибор	Спутник	Пространственное разрешение, м	Продукты	Измерения с судна
21.04.2018	08:17	MSI	Sentinel-2B	10	RGB, TSM, CHL	+
	07:59	ETM+	Landsat-7	30	RGB	
22.04.2018	08:01	OLI/TIRS	Landsat-8	30/60	Облачность	—
23.04.2018	08:17	MSI	Sentinel-2B	10	RGB, TSM, CHL	2
25.04.2018	07:26	OLCI	Sentinel-3B	250	TSM, CHL	+
26.04.2018	08:27	MSI	Sentinel- 2A	10	RGB, TSM, CHL	+
27.04.2018	15:10	SAR-C	Sentinel-1B	10	—	2
28.04.2018	08:17	MSI	Sentinel-2B	10	RGB, TSM, CHL	+
29.04.0218	08:07	OLI/TIRS	Landsat-8	30	RGB, SST	—

Таблица А.2 — Параметры спутниковой информации на период проведения экспедиционных работ в районе реки Мзымты в 2019 г.

Дата	Время (GMT)	Прибор	Спутник	Пространственное разрешение, м	Продукты	Измерения с судна
23.04.2019	08:17	MSI	Sentinel-2B	10	RGB, TSM	+
24.04.2019	07:59	ETM+	Landsat-7	30	RGB	+
25.04.2019	08:01	OLI/TIRS	Landsat-8	30/60	RGB, SST, TSM, CHL	+
	07:56	OLCI	Sentinel-3B	250	TSM	
26.04.2019	07:30	OLCI	Sentinel-3B	250	TSM	+
	08:27	MSI	Sentinel-2B	10	RGB, TSM	
	10:12	VIIRS	NPP	1000	SST, WLR, CHL	
28.04.2019	08:17	MSI	Sentinel-2A	10	RGB (облачность)	+
30.04.2019	07:26	OLCI	Sentinel-3B	250	TSM	—
01.05.2019	08:27	MSI	Sentinel-2A	10	RGB (облачность)	+
02.05.2019	08:07	OLI/TIRS	Landsat-8	30	RGB (облачность)	+
04.05.2019	08:02	OLCI	Sentinel-3A	250	TSM	Без измерений на станциях

Таблица А.3 — Параметры спутниковой информации на период проведения экспедиционных работ в районе реки Мзымты в 2021 г.

Дата	Время (GMT)	Прибор	Спутник	Пространственное разрешение, м	Продукты	Измерения с судна
21.04.2021	08:01	OLI/TIRS	Landsat-8	30/60	RGB, SST, TSM, CHL (облачность)	—
22.04.2021	08:17	MSI	Sentinel- 2B	10	RGB, TSM (облачность)	+
	15:19	SAR-C	Sentinel- 1A	10	—	
25.04.2021	08:17	MSI	Sentinel- 2B	10	RGB, TSM (облачность)	—
27.04.2021	08:17	MSI	Sentinel- 2A	10	RGB (облачность)	2
29.04.2021	07:59	ETM+	Landsat-7	30	RGB (облачность)	+
30.04.2021	08:01	OLI/TIRS	Landsat-8	30/60	RGB, SST, TSM, CHL (облачность)	+
	08:17	MSI	Sentinel- 2A	10	RGB, TSM	
02.05.2021	08:17	MSI	Sentinel- 2B	10	RGB, TSM, CHL	+

Таблица А.4 — Параметры спутниковой информации на момент проведения
подспутниковых судовых измерений в районе выноса из Калининградского залива
с 2018 по 2021 г.

Год	Дата	Время (GMT)	Прибор	Спутник	Пространственное разрешение, м	Продукты
2018	08.08.2018	11:15	MODIS	Aqua	250	RGB, SST, TSM, CHL
2019	01.08.2019	09:54	MSI	Sentinel- 2B	10	RGB, TSM (облачность)
	07.08.2019	—	—	—	—	—
2020	18.08.2020	10:04	MSI	Sentinel- 2B	10	RGB, TSM (облачность)
	21.08.2020	—	2	—	—	—
2021	16.07.2021	09:54	MSI	Sentinel- 2A	10	RGB, TSM, CHL

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

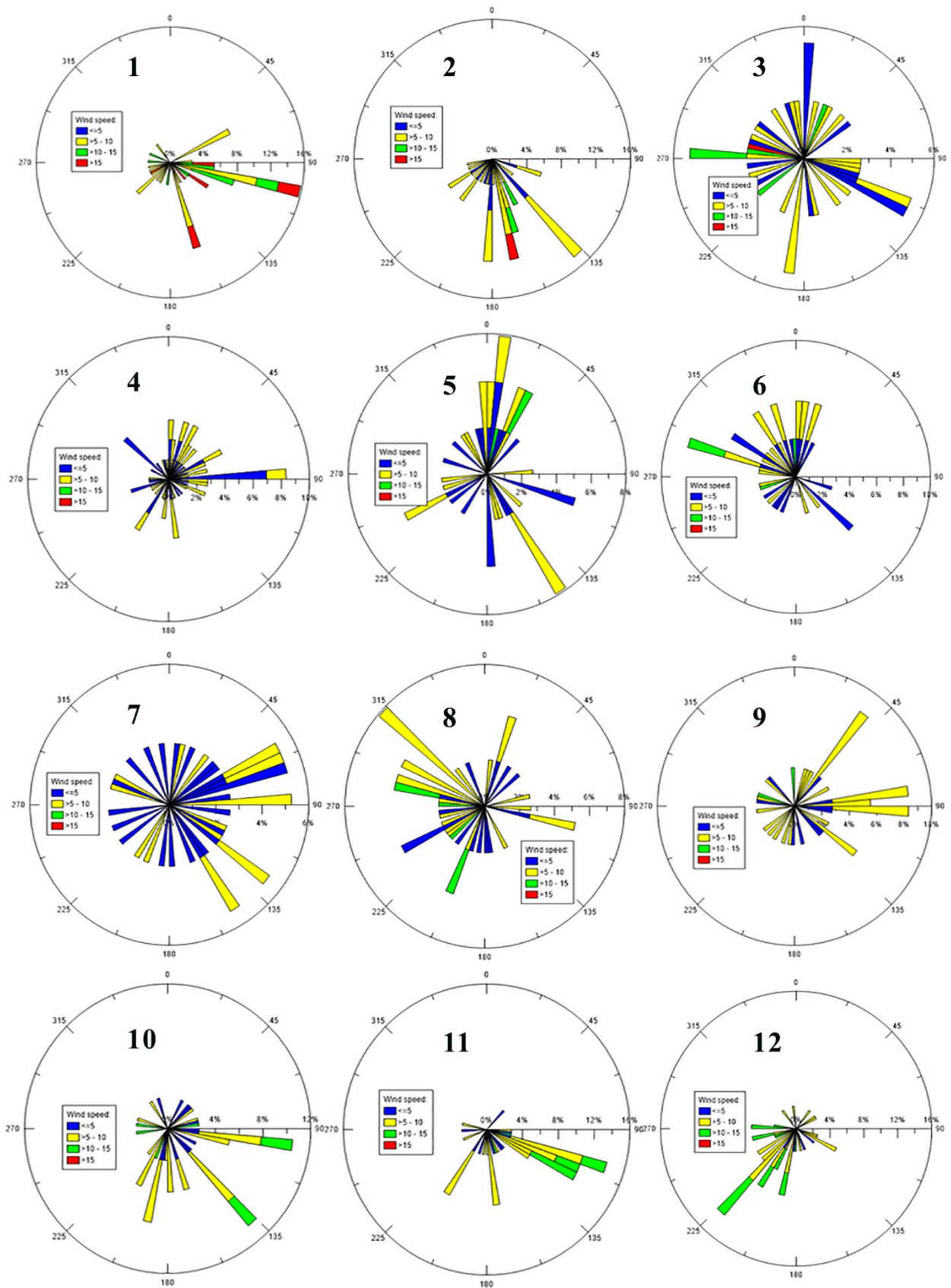


Рисунок Б.1 — Роза ветров для района исследования в юго-восточной части Балтийского моря за 2014 г. Цифрами обозначены месяца

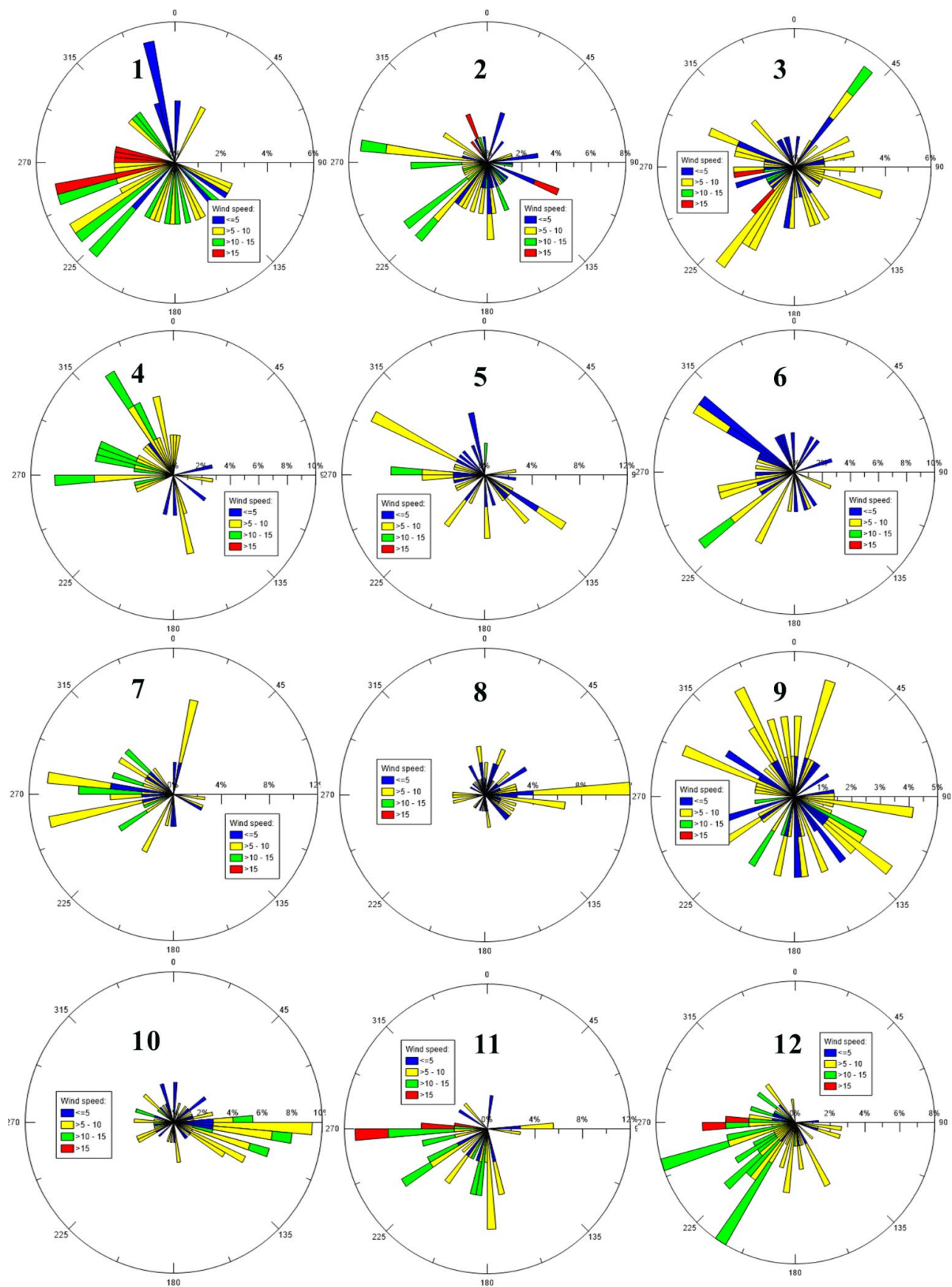


Рисунок Б.2 — Роза ветров для района исследования в юго-восточной части Балтийского моря за 2015 г. Цифрами обозначены месяца

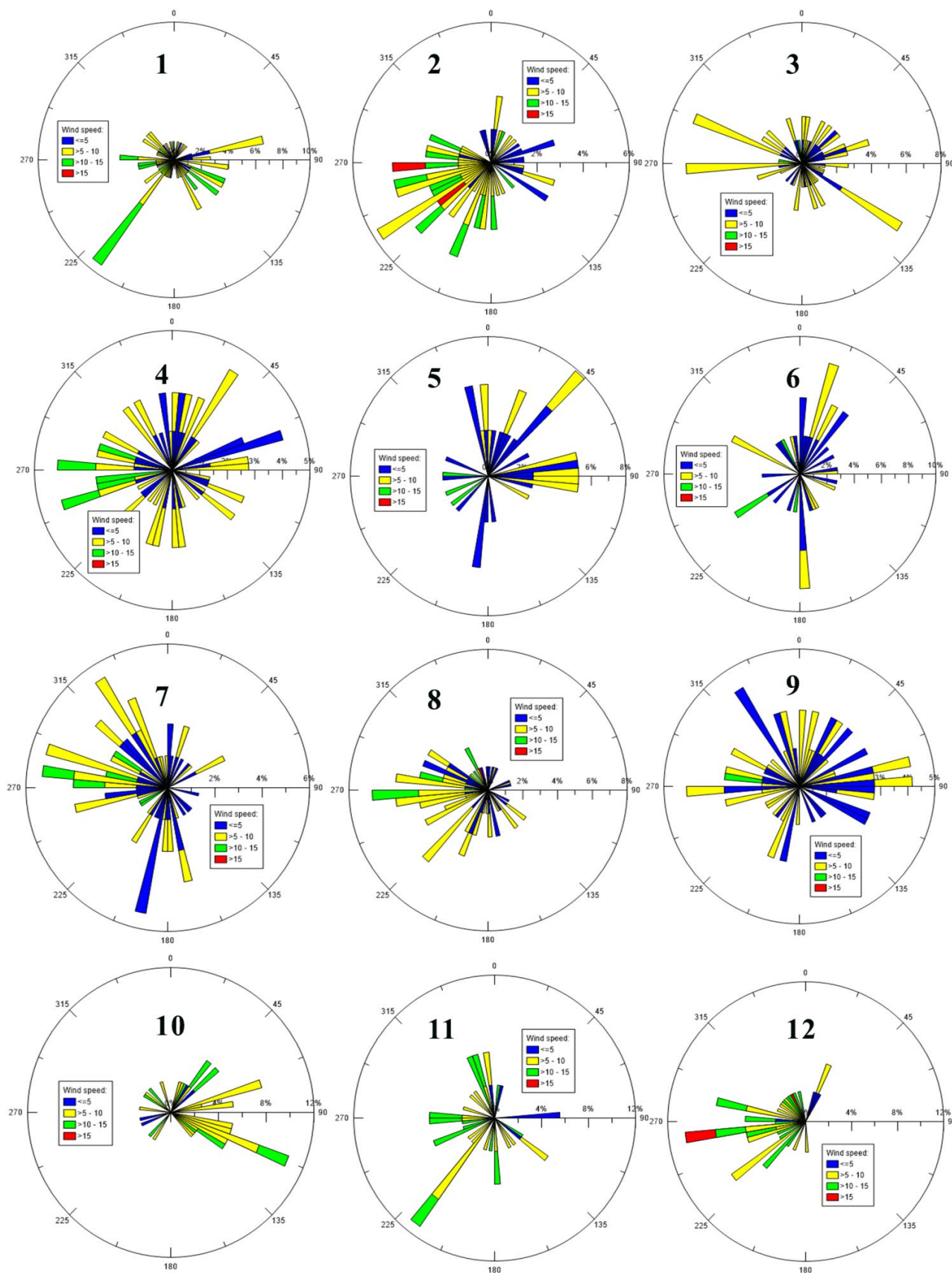


Рисунок Б.3 — Роза ветров для района исследования в юго-восточной части Балтийского моря за 2016 г. Цифрами обозначены месяца

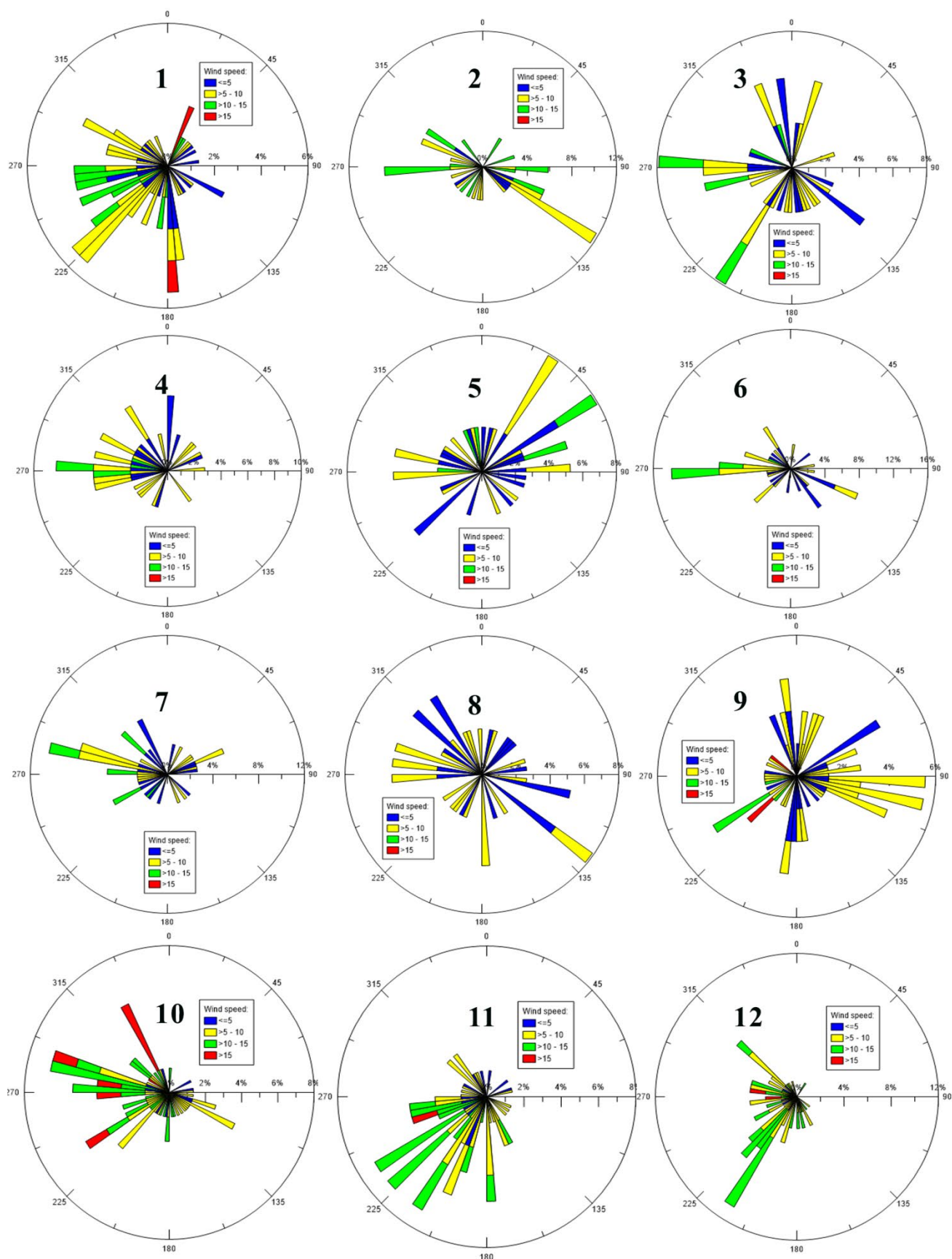


Рисунок Б.4 — Роза ветров для района исследования в юго-восточной части Балтийского моря за 2017 г. Цифрами обозначены месяца

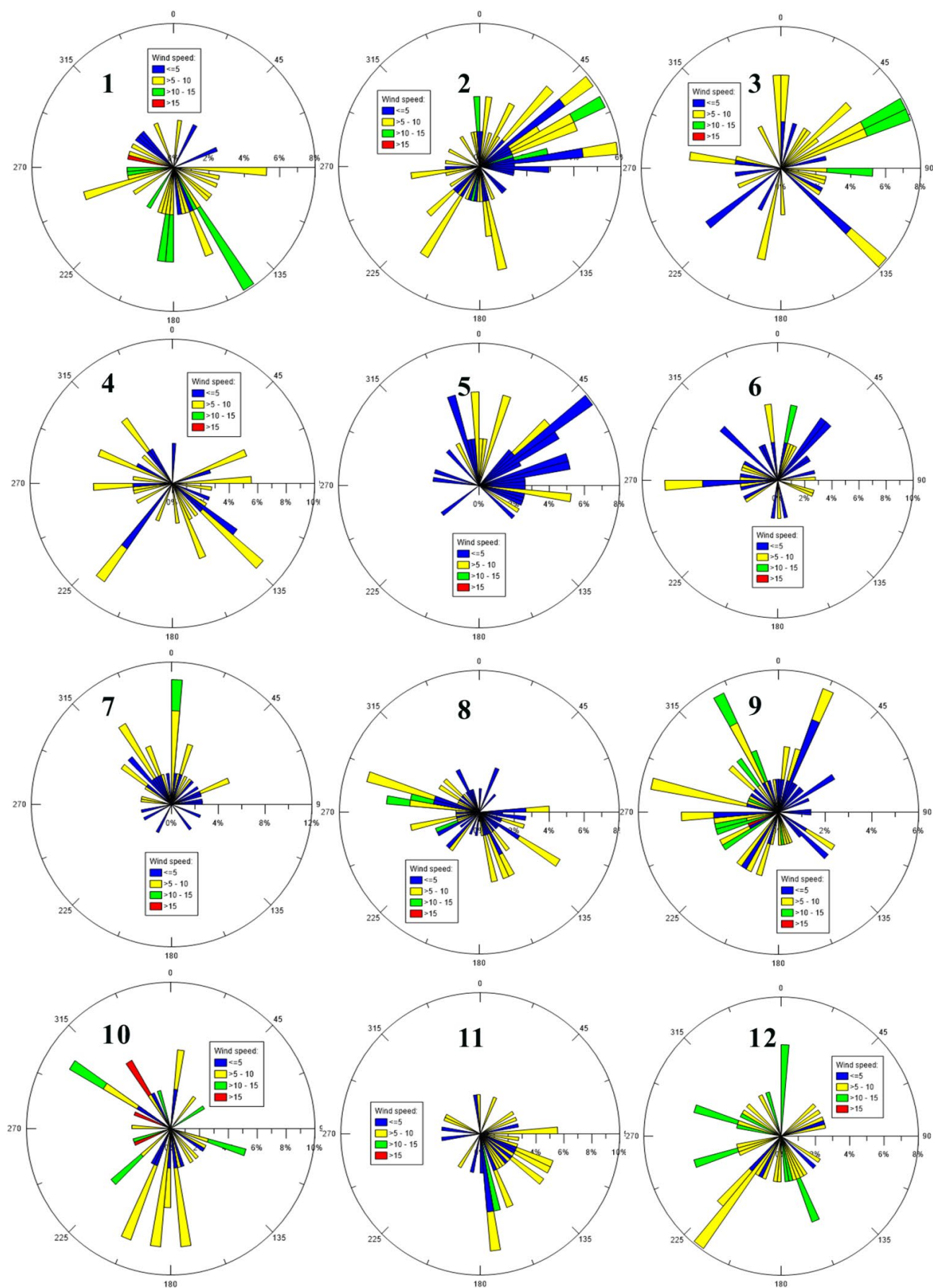


Рисунок Б.5 — Роза ветров за для района исследования в юго-восточной части Балтийского моря 2018 г. Цифрами обозначены месяца

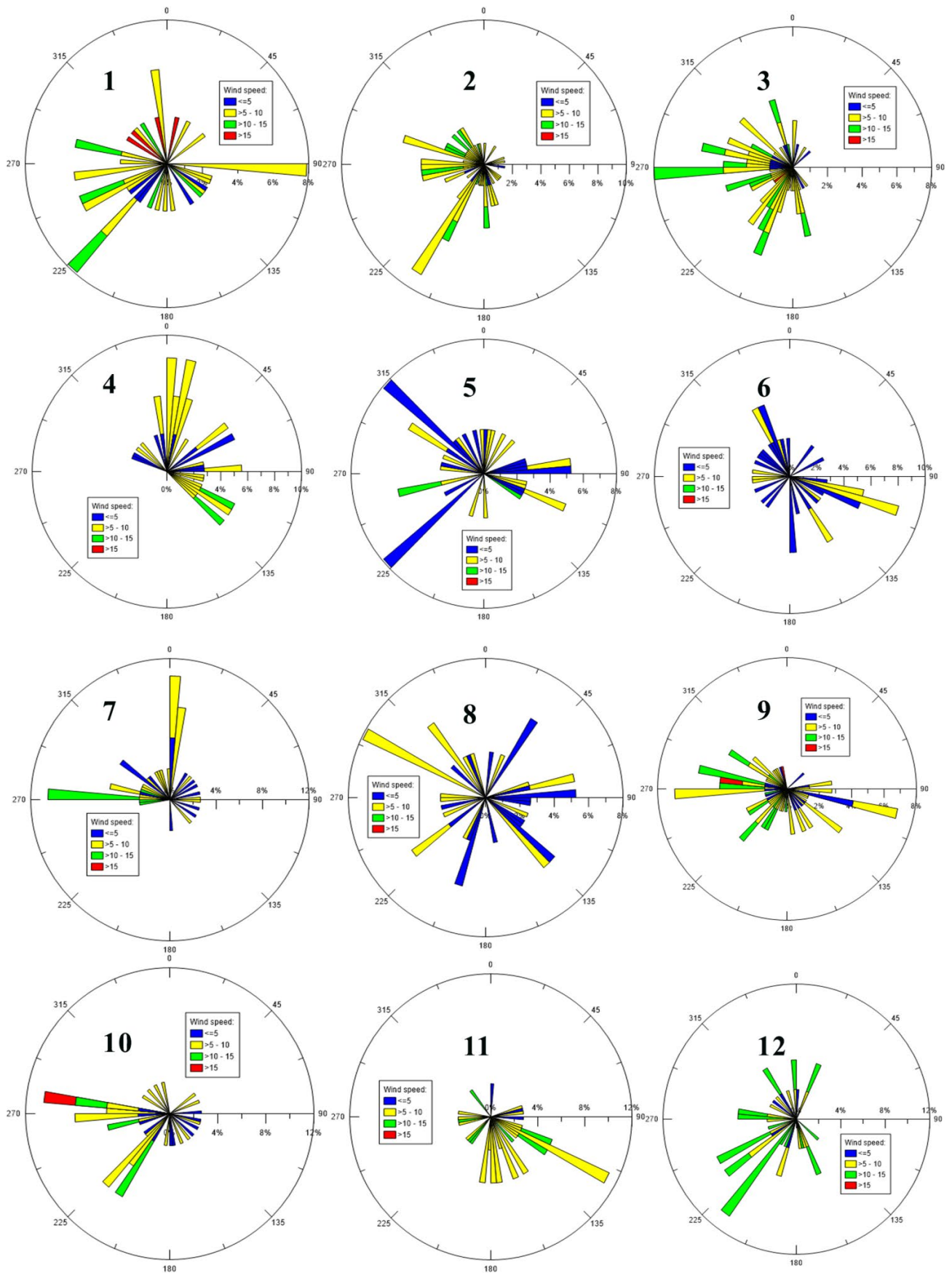


Рисунок Б.6 — Роза ветров для района исследования в юго-восточной части Балтийского моря за 2019 г. Цифрами обозначены месяца

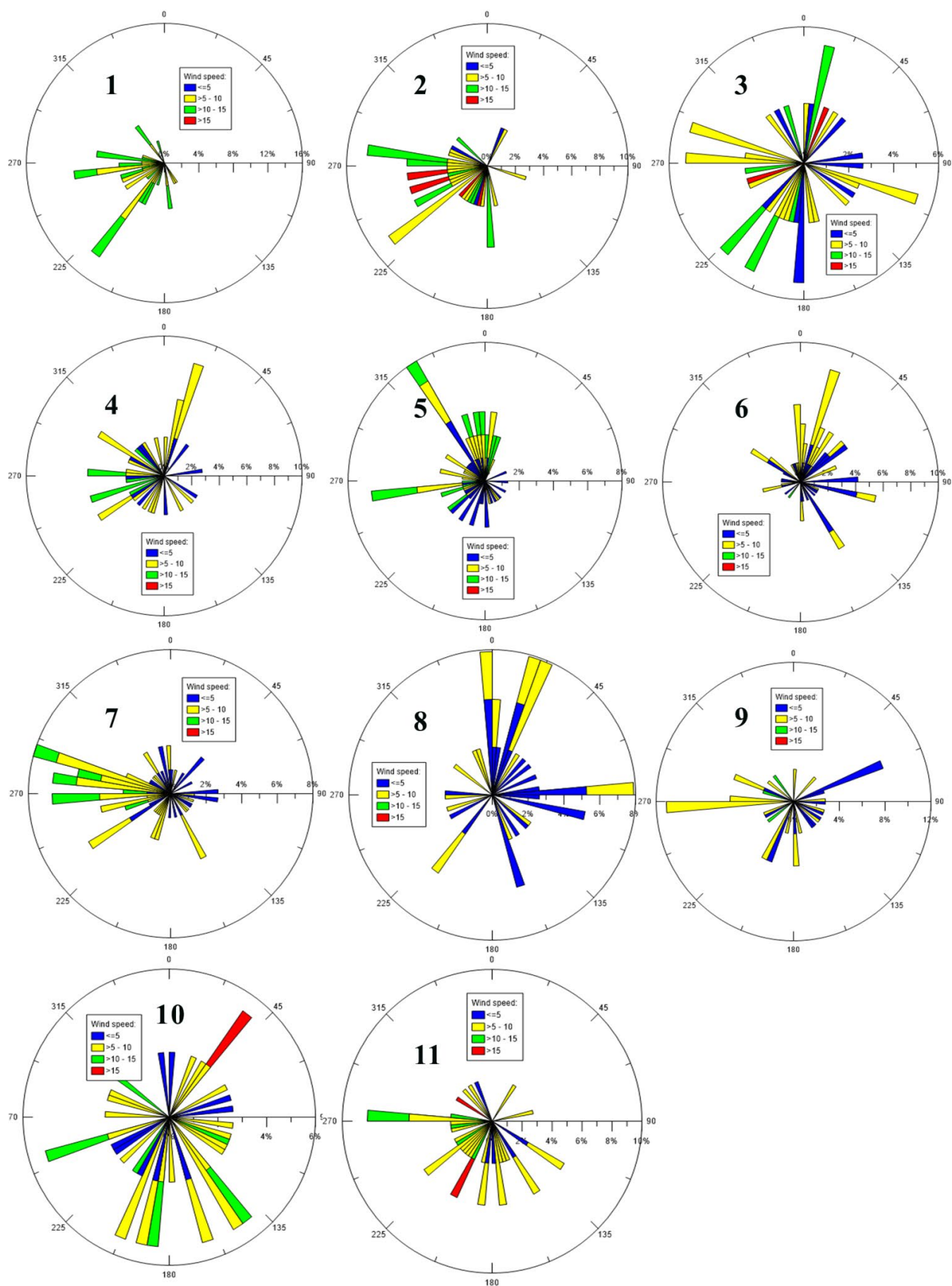


Рисунок Б.7 — Роза ветров для района исследования в юго-восточной части Балтийского моря за 2020 г. Цифрами обозначены месяца

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица В.1 — Значения площади распространения плюма лагунных вод, для каждого выявленного случая за весь период исследований с 2014 г. по декабрь 2020 г.

Месяц	Дата	Площадь плюма, км ²
Январь	02.01.2016	2,2
	07.01.2016	13,19
	11.01.2017	10,45
	28.01.2017	23,59
	03.01.2018	37,12
	06.01.2019	48,25
	23.01.2019	38,01
	23.01.2020	22,05
Февраль	13.02.2014	18,88
	16.02.2015	63,8
	02.02.2018	3,56
	07.02.2018	30,72
	20.02.2018	3,91
	24.02.2018	12,21
	10.02.2019	3,04
	27.02.2019	4,93
	07.02.2020	21,79
Март	07.03.2016	28,24
	27.03.2016	10,08
	05.03.2018	7,71
	21.03.2018	14,39
	01.03.2020	1,51
	13.03.2020	9,39
	23.03.2020	160,35
	26.03.2020	76,83
Апрель	21.04.2015	62,81
	26.04.2016	13,19
	11.04.2018	18,16
	13.04.2018	19,54
	03.04.2019	7,36

Месяц	Дата	Площадь плюма, км ²
	06.04.2019	13,89
	13.04.2019	55,34
	16.04.2019	58,08
	07.04.2020	13,89
	12.04.2020	25,87
	22.04.2020	19,56
Май	07.05.2015	70,44
	02.05.2016	28,66
	09.05.2016	66,32
	23.05.2016	82,65
	12.05.2017	23,04
	16.05.2018	18,4
	21.05.2018	39
	23.05.2018	43,8
	12.05.2020	16,34
	22.05.2020	52,84
	27.05.2020	23,34
Июнь	05.06.2014	6,3
	03.06.2016	130,99
	05.06.2016	10,61
	26.06.2016	15,68
	07.06.2018	39,1
	17.06.2018	17,14
	27.06.2018	27,62
	30.06.2018	5,87
	05.06.2019	4,43
	07.06.2019	2,38
	12.06.2019	22,78
	01.06.2020	59,95
	04.06.2020	161,66
	16.06.2020	28,75
	24.06.2020	0,94
	26.06.2020	34,58
	30.06.2020	8,03

Месяц	Дата	Площадь плюма, км ²
Июль	07.07.2014	40,1
	23.07.2014	38,69
	03.07.2015	42,6
	05.07.2016	16,74
	21.07.2016	88,55
	07.07.2017	43,02
	30.07.2017	42,92
	11.07.2018	8,18
	14.07.2019	8,94
	15.07.2019	43,81
	20.07.2019	8,55
	04.07.2020	5,83
Август	01.08.2014	98,4
	04.08.2015	10,32
	17.08.2015	33,51
	20.08.2015	130,3
	29.08.2017	39,92
	04.08.2018	16,18
	11.08.2019	4,81
	26.08.2019	160,65
	29.08.2019	31,94
	31.08.2019	42,83
	05.08.2020	9,6
	13.08.2020	219,78
	20.08.2020	5,17
	30.08.2020	20,83
Сентябрь	18.09.2014	36,52
	13.09.2016	5,94
	28.09.2017	19,69
	03.09.2019	23,28
	23.09.2019	7,05
	12.09.2020	49,5
	25.09.2020	7,74
	29.09.2020	48,12

Месяц	Дата	Площадь плюма, км ²
Октябрь	06.10.2015	4,58
	07.10.2015	44,19
	15.10.2018	14,71
Ноябрь	29.11.2018	8,47
	17.11.2019	11,62
	19.11.2019	2,41
Декабрь	25.12.2015	13,59
	27.12.2017	48,58

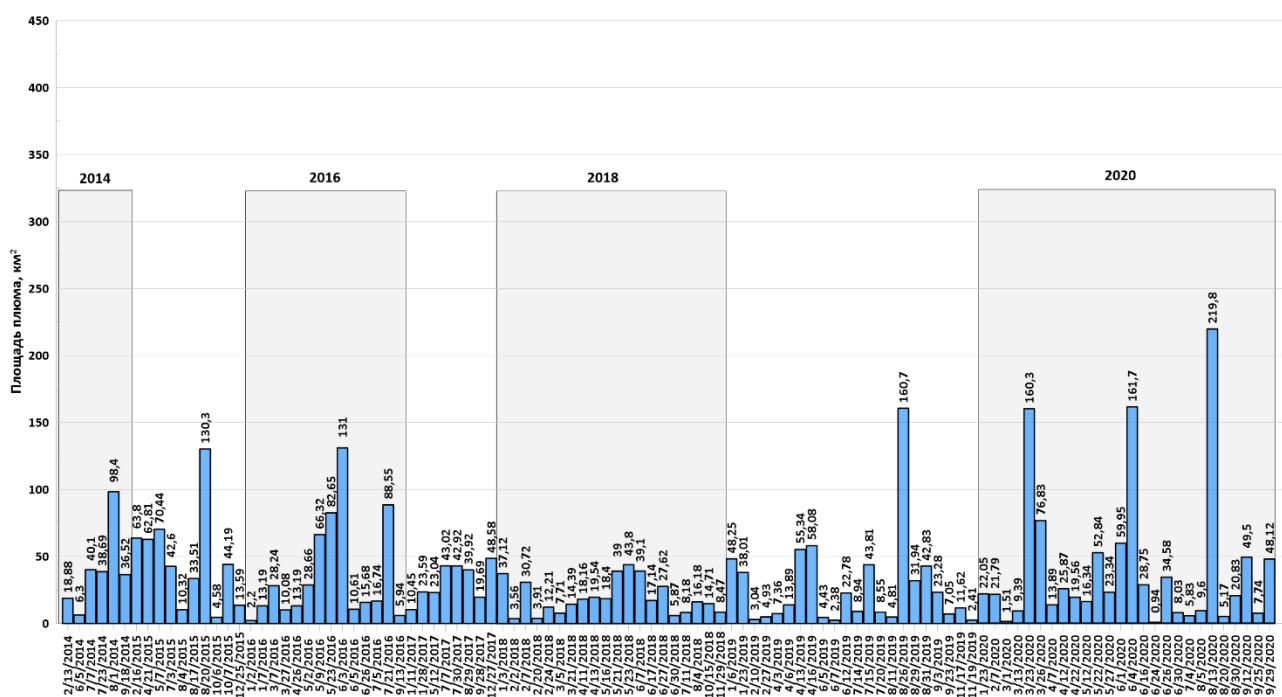


Рисунок В.1 — Площади выявленных плумов лагунных вод по спутниковым оптическим данным высокого пространственного разрешения за весь период исследования (с 2014 по 2020 г.)

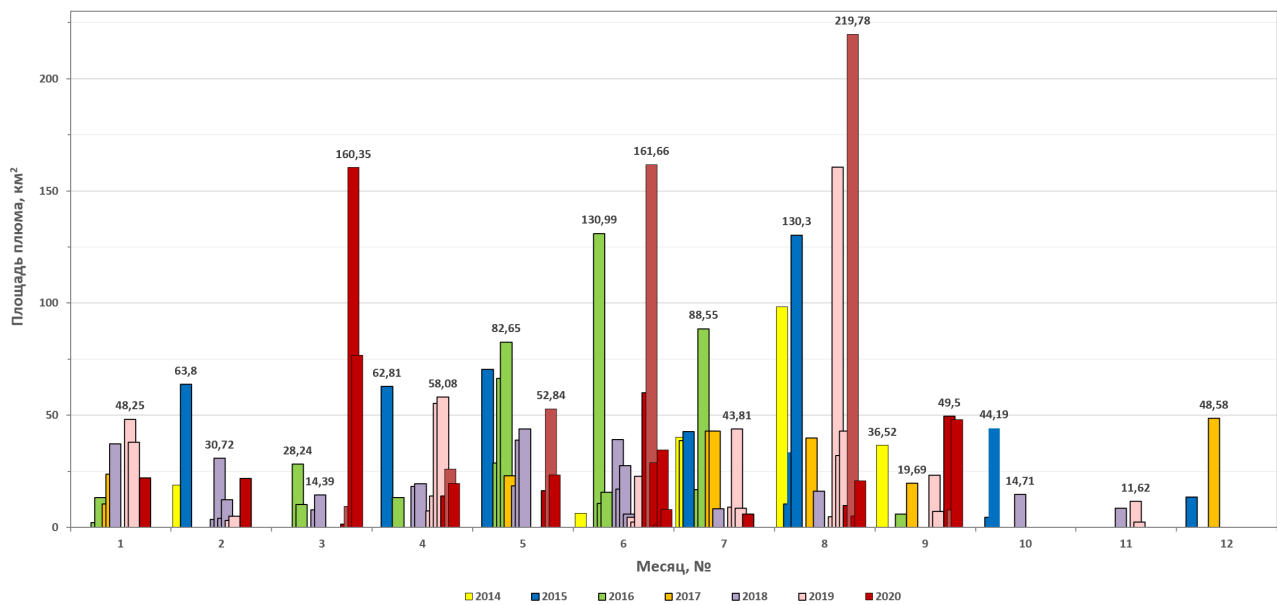


Рисунок В.2 — Сезонное распределение площадей плюма лагунных вод за весь период исследования

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г.1 — Значения температуры воды, солёности и хлорофилла *a* по данным измерений *in situ* в приповерхностном слое на станциях 8 августа 2018 г. в районе выноса из

Калининградского залива

№ станции	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	Температура, °С	Солёность, епс	Хлорофилл <i>a</i> , мг/л
I галс (2 км от береговой черты).					
1	54,68635	19,89678	24,33767	5,867497	14,1511
2	54,67997	19,88702	24,29477	5,918386	11,55398
3	54,67195	19,87597	23,96359	5,818103	8,851184
4	54,66393	19,86397	23,81332	5,65383	9,877059
5	54,65825	19,86058	23,74057	5,444329	7,764508
6	54,6518	19,85282	23,72272	5,178322	5,654659
7	54,64522	19,842	24,11327	6,103528	5,828801
8	54,63707	19,8312	24,14049	6,120046	10,82011
9	54,62792	19,82197	24,062	6,096889	10,43016
10	54,6205	19,81307	24,20367	6,086388	10,15565
II галс (3,23 км от береговой черты).					
11	54,62697	19,79528	24,23768	6,312527	8,152135
12	54,63422	19,80367	24,30504	6,403704	7,786191
13	54,64195	19,81258	24,15322	6,341824	2,361296
14	54,64953	19,82398	24,30311	6,081748	11,77193
15	54,65775	19,83162	24,16985	6,086389	11,50967
16	54,66652	19,84437	23,79813	5,579057	10,50278
17	54,67462	19,85227	23,84189	5,734534	10,39446
18	54,68293	19,8619	23,87188	5,87404	12,14052
19	54,69193	19,87287	23,97568	5,867822	12,92284
20	54,69992	19,88262	23,97735	5,997916	13,44769
III галс (5,3 км от береговой черты).					
21	54,70805	19,85985	24,31761	6,165197	13,55634
22	54,69373	19,84057	24,22596	6,241289	13,14366
23	54,68075	19,822	24,19998	6,67032	7,667671
24	54,6654	19,80933	24,34475	6,520246	7,408719
25	54,65185	19,79257	24,25994	6,412014	8,143141

№ станции	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	Температура, °С	Солёность, епс	Хлорофилл <i>a</i> , мг/л
26	54,63937	19,77327	24,07753	6,359589	10,32935
IV галс (7,46 от береговой черты).					
27	54,64927	19,75435	24,00689	6,412184	8,973848
28	54,66213	19,76747	24,02179	6,540336	7,779958
29	54,67592	19,78358	24,24257	6,663752	6,723683
30	54,68985	19,79937	24,34795	6,739534	5,334573
31	54,70198	19,81792	24,24486	6,733445	4,991475
32	54,71562	19,8444	23,94643	6,799771	5,446088

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

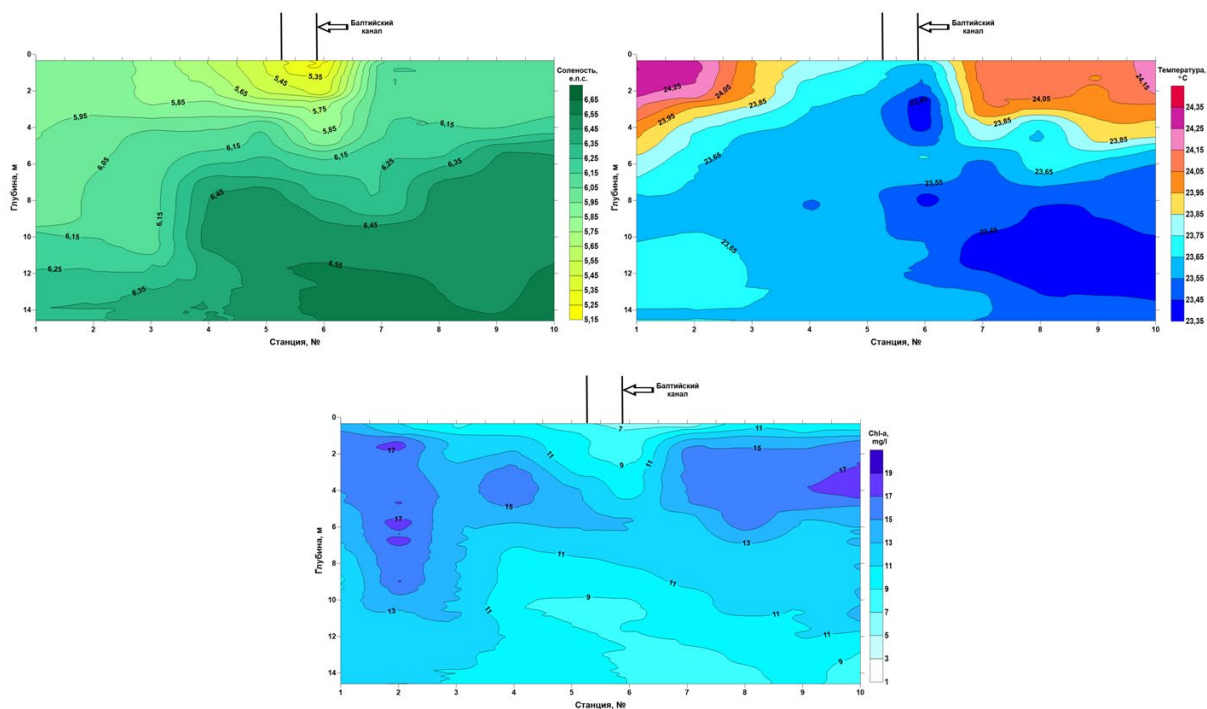


Рисунок Д.1 — Распределение температуры, солёности, хлорофилла а по глубине на станциях зондирования I галса 8 августа 2018 г. в районе выноса из Калининградского залива

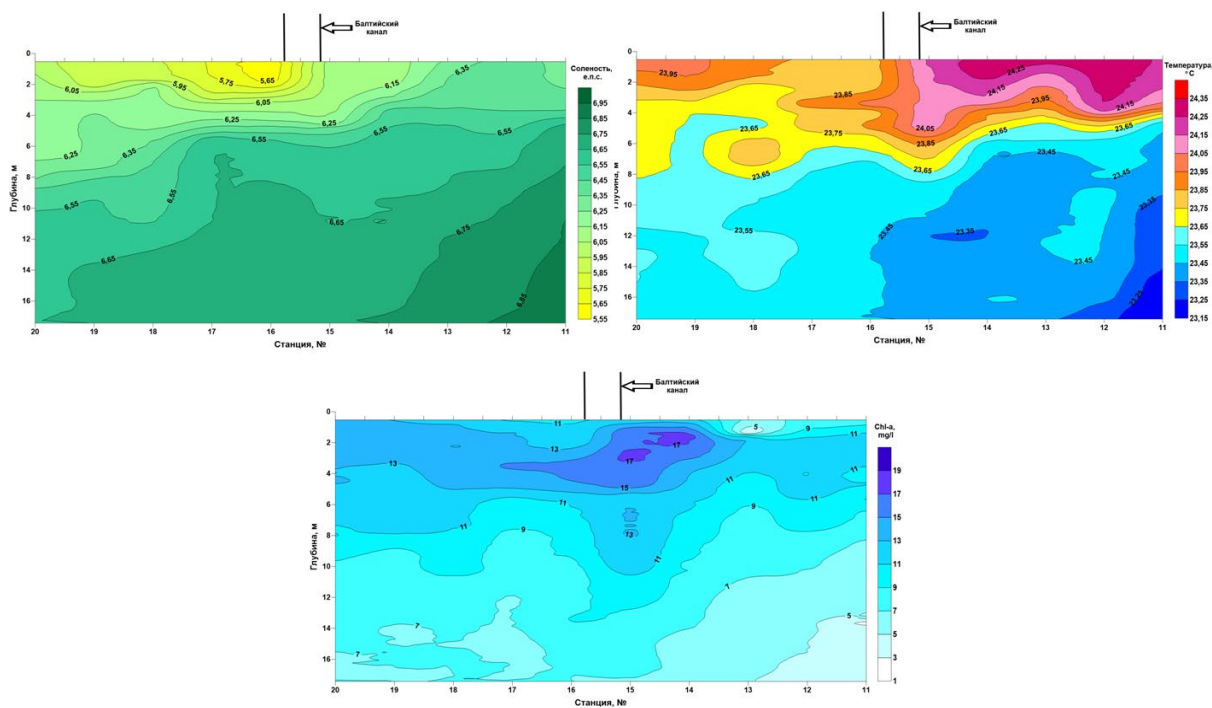


Рисунок Д.2 — Распределение температуры, солёности, хлорофилла а по глубине на станциях зондирования II галса 8 августа 2018 г. в районе выноса из Калининградского залива

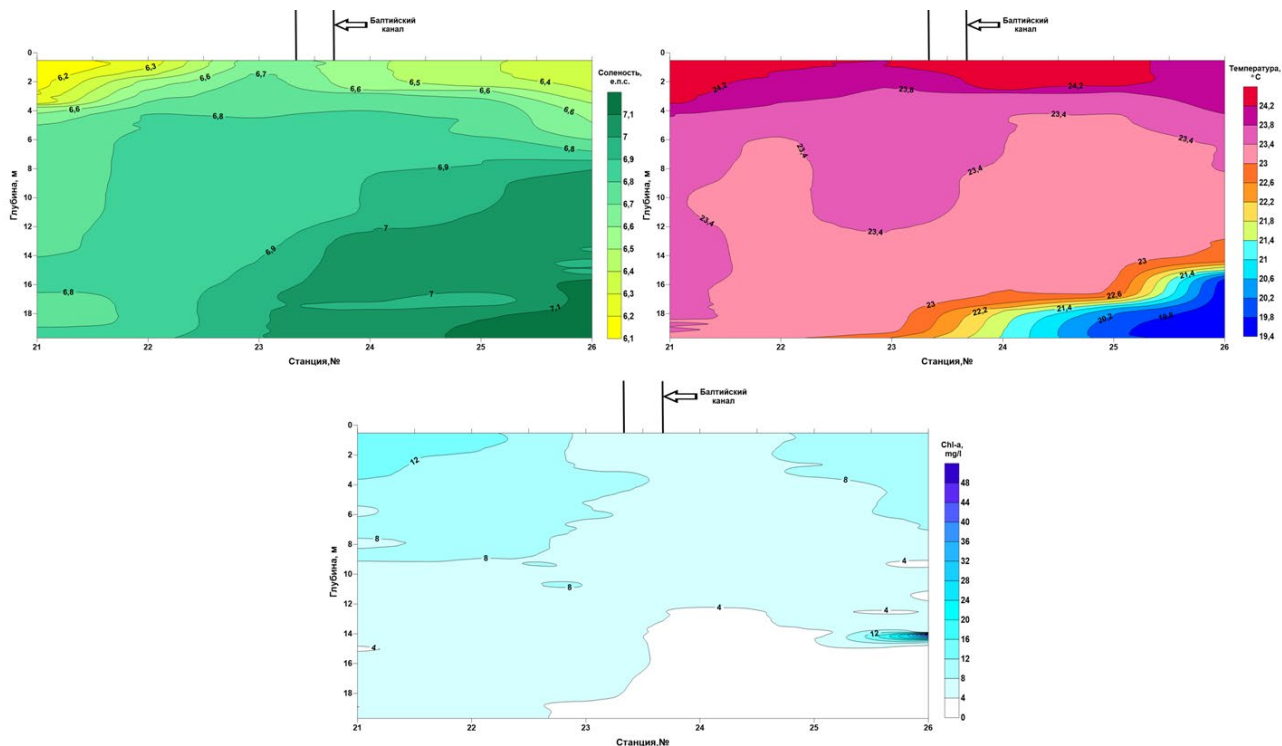


Рисунок Д.3 — Распределение температуры, солёности, хлорофилла а по глубине на станциях зондирования III галса 8 августа 2018 г. в районе выноса из Калининградского залива

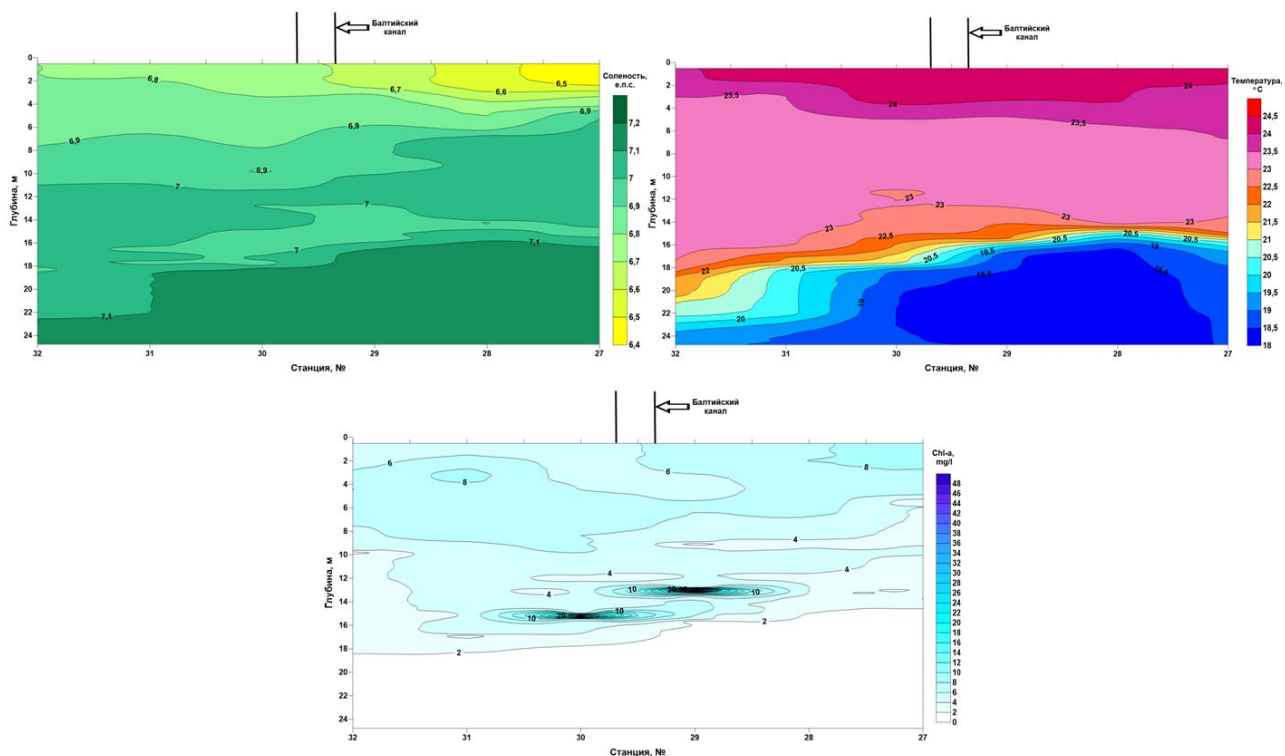


Рисунок Д.4 — Распределение температуры, солёности, хлорофилла а по глубине на станциях зондирования IV галса 8 августа 2018 г. в районе выноса из Калининградского залива

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Таблица Е.1 — Значения температуры воды, солёности и хлорофилла а по данным измерений in situ в приповерхностном слое на станциях 1 августа 2019 г. в районе выноса из Калининградского залива

№ станции	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	Температура, °С	Солёность, епс	Мутность, НТУ		Хлорофилл а, мг/л
					ПМ*	Зонд**	
I галс (2,43 км от береговой черты)							
1	54,7323 2	19,9111 8	16,3412	7,427055	1,54	0,02518 4	6,879805
2	54,7008 3	19,8834	16,46631	7,411079	0,34	0,18104 5	2,057847
3	54,6861 3	19,8712 3	16,41661	7,419167	0,35	0,08194	8,384478
4	54,673	19,8573 3	18,33807	6,309813	4,77	22,0069 8	3,483126
5	54,6586 8	19,8382 3	17,52215	6,576124	4,18	4,04067 9	4,172005
6	54,6440 3	19,8232 5	15,99439	7,113346	1,72	8,85794 6	0,276518
7	54,6299 7	19,8060 3	16,34596	7,081735	1,81	2,24554 7	4,280658
8	54,6000 5	19,7826	16,47947	7,430481	0,46	0,52704 9	7,34185
II галс (5,5 км от береговой черты)							
9	54,6193 3	19,7407 3	16,18032	7,249267	1,44	4,30140 6	16,14738
10	54,6448 3	19,7668 5	16,7696	6,966851	3,43	6,42151 1	11,34075
11	54,6567 7	19,7860 2	17,58191	6,791922	4,9	5,40251 3	11,82367
12	54,6712 8	19,8048 3	17,36236	7,212942	4,5	3,44835 1	6,22451

№ станции	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	Температура, °С	Солёность, епс	Мутность, НТУ		Хлорофилл а, мг/л
					ПМ*	Зонд**	
13	54,6868 3	19,8220 7	17,29829	7,397744	0,37	0,13322 1	8,091229
14	54,7004 2	19,8376 3	16,99014	7,405538	0,31	0,06695 9	8,593686
15	54,7151 8	19,8482 8	17,14738	7,374859	0,68	0,37896 7	7,587223
16	54,7438	19,8647 8	17,03717	7,379687	0,64	0,28706 5	4,794152
III галс (8,8 км от береговой черты)							
17	54,7589 3	19,8189 2	18,15231	7,283798	0,56	0,15943 8	2,164715
18	54,7387 7	19,8082 3	18,53676	7,263162	0,33	0,08654 9	1,936174
19	54,7087 5	19,7806 7	18,53933	7,279955	0,43	0,06638 2	2,25062
20	54,6943 8	19,7646 8	17,96054	7,330906	0,32	0,25681 4	7,602346
21	54,6652 3	19,7381 2	17,58825	7,375592	0,24	0	3,326596
22	54,6382 5	19,7036 7	17,28016	7,159402	19,32	2,78889 8	5,675011

* Измерения проводились портативным мутномером TN400 фирмы Apera Instruments.

** Измерения проводились датчиком мутности Seapoint Ltd., интегрированным в CTD-зонд.

Таблица Е.2 — Значения температуры воды, солёности и хлорофилла а по данным измерений in situ в приповерхностном слое на станциях 7 августа 2019 г. в районе выноса из Калининградского залива

№ станции и	Широт а, °с.ш.	Долгот а, °в.д.	Температур а, °С	Солёност ь, епс	Мутность НТУ		Хлорофилл а, мг/л
					ПМ*	Зонд**	
I галс (2,43 км от береговой черты)							
1	54,7307 2	19,9085 8	20,345983	7,209549 1	2,78	0	0,666909656
2	54,7187 3	19,8965 2	20,051726	7,304262 8	6,46	0,5181182	1,067105121
3	54,7029 2	19,8854 5	20,493357	6,820777 2	2,92	0	0,27997332
4	54,6876 5	19,8739	20,338739	6,975645 1	3,47	0,9087776	0,005977774
5	54,6723 7	19,8546 7	20,497037	6,989779 8	5,93	1,0343878	0
6	54,6591	19,8370 2	20,341295	7,168931 8	2,7	0	0,643606934
7	54,6446 7	19,8185 7	20,27691	7,258894 9	5,04	0	0
8	54,6298 2	19,8013 7	20,455481	7,104009 1	1,25	0	0
9	54,6014 8	19,7816	20,632624	7,126423 9	3,36	0	0
10	54,5750 8	19,7463 7	21,059546	6,742338 2	4,14	0	0
II галс (5,5 км от береговой черты)							
11	54,5932 2	19,6993 7	20,863705	7,2560389	3,03	0,3199076	0,341623062
12	54,6181 3	19,7406 2	20,90377	7,3577444	1,44	0,7376481	0
13	54,6472	19,7679	20,285435	7,333246	0,71	0,3147218	0
14	54,6723	19,7971 3	20,226366	7,3123607	2,52	0	0

№ станции	Широт а, °с.ш.	Долгот а, °в.д.	Температур а, °С	Солёност ь, епс	Мутность НТУ		Хлорофилл а, мг/л
					ПМ*	Зонд**	
15	54,6858 3	19,8209 2	20,959581	7,3327544	1,74	0	0,004350156
16	54,7019 5	19,8364 5	20,644533	7,3248847	1,16	0	0
17	54,7148	19,8484 8	20,6285	7,2669358	0,8	0	0
18	54,7463 2	19,8653 7	20,553868	7,3300569	0,49	0	0
III галс (8,8 км от береговой черты)							
19	54,7603 3	19,8139 3	20,845356	7,3187124	0,13	0,2254118	0
20	54,7248 2	19,7907 8	20,818281	7,3518361	0,32	0	0
21	54,7091	19,7815 2	20,677595	7,3531008	0,46	0	1,164206412
22	54,6959	19,7682 2	20,66667	7,3426542	0,45	0,3982699	0
23	54,682	19,7514	20,59326	7,3298705	0,34	0,0041534	0
24	54,6678 5	19,7355 2	20,621533	7,3119361	0,98	0	0
25	54,6392 2	19,7051 3	20,615338	7,3178565	2,28	0	2,274716822
26	54,6158	19,6649	20,72304	7,2947908	1,16	0,1263065	2,244547588

* Измерения проводились портативным мутномером TN400 фирмы Apera Instruments.

** Измерения проводились датчиком мутности Seapoint Ltd., интегрированным в CTD-зонд.

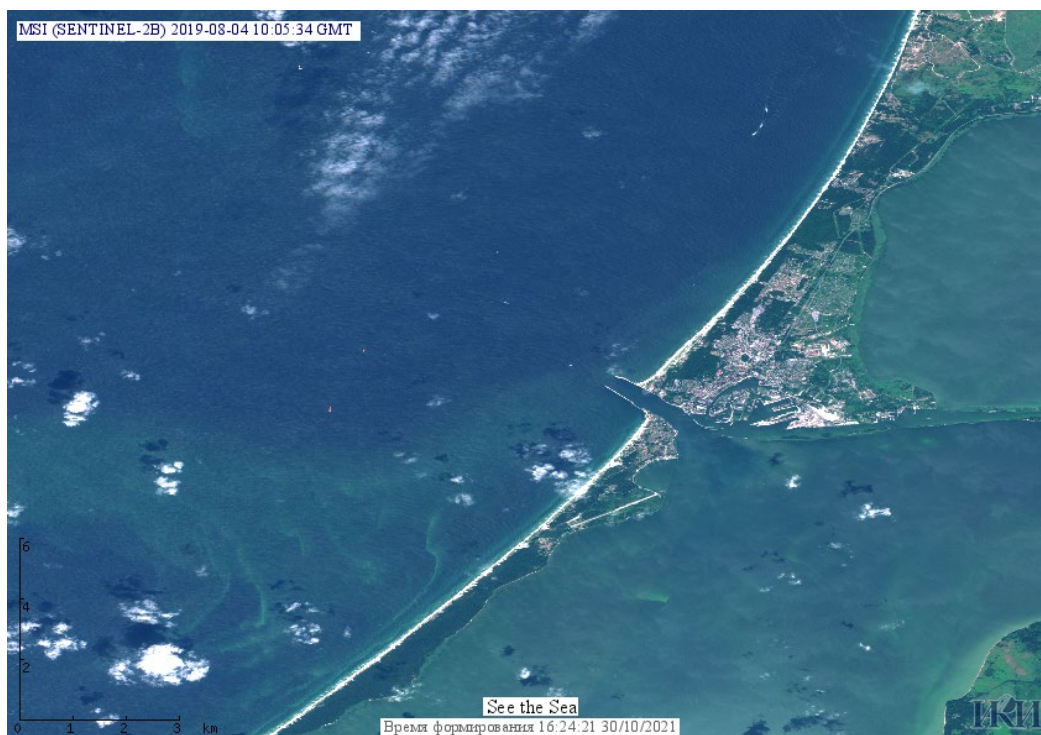


Рисунок Е.1 — Фрагмент спутникового изображения, полученного со спутника Sentinel-2B (MSI) за 4 августа 2019 г. в районе выноса из Калининградского залива

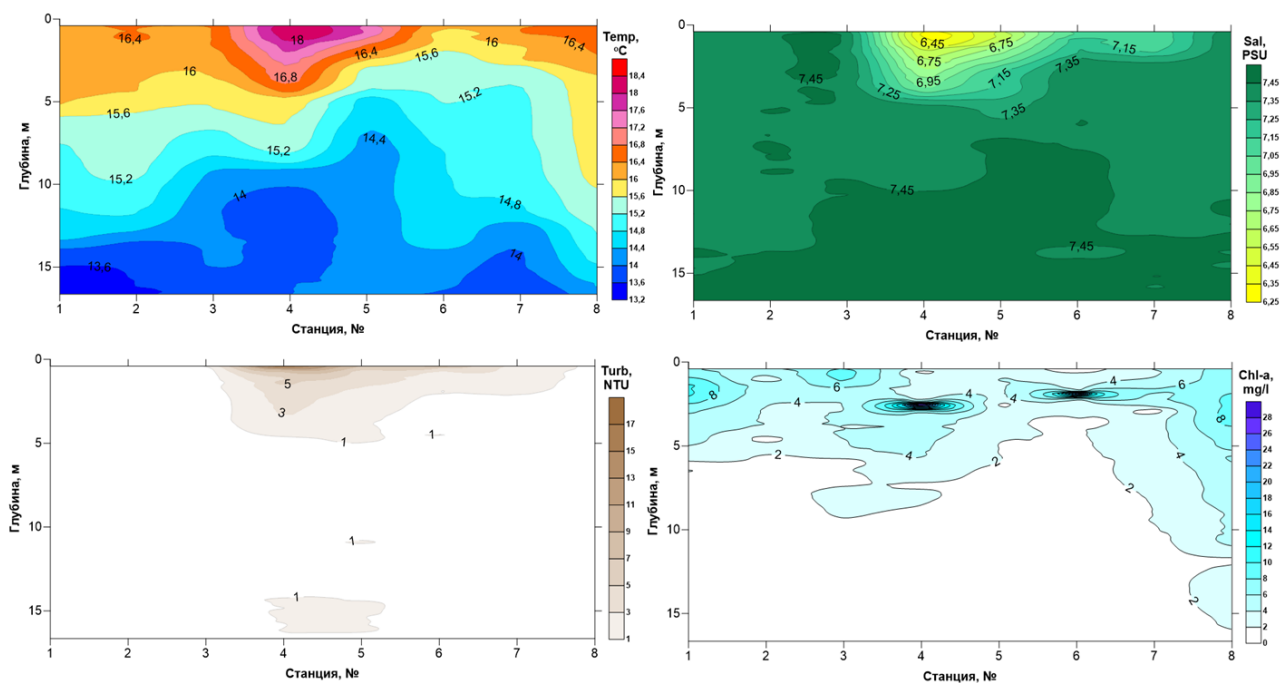


Рисунок Е.2 — Распределение температуры, солёности, хлорофилла а и мутности морской воды по глубине на станциях зондирования I галса 1 августа 2019 г. в районе выноса из Калининградского залива

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Таблица Ж.1 — Значения температуры воды, солёности и хлорофилла а по данным измерений in situ в приповерхностном слое на станциях 18 августа 2020 г. в районе выноса из Калининградского залива

№ станции	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	Температура, °С	Солёность, епс	Мутность, НТУ		Хлорофилл а, мг/л
					ПМ*	Зонд**	
I галс (1,5 км от береговой черты)							
15	54,6932	19,9003	18,26897749	7,409178	1,25	0,4515634	3,80003466
16	54,67963	19,88328	17,44250105	7,457152	0,99	0,2844672	1,892903388
17	54,6662	19,86672	18,90936777	6,867672	5,75	6,065707	6,240865747
18	54,65887	19,86075	19,13621272	6,762804	10,7	6,2763059	6,766665662
19	54,64902	19,85018	19,45662262	6,629273	17,41	8,7478889	6,427922689
20	54,6337	19,83187	18,14291146	7,384052	2,02	0,5184018	5,199627094
21	54,61962	19,81682	18,45329919	7,367832	3,94	0,616931	5,388549842
22	54,60788	19,79782	18,58442388	7,393761	5,02	0,2438455	4,649532008
II галс (2,79 км от береговой черты)							
1	54,69687	19,88788	17,98372344	7,424128	0,36	0,2115787	3,950132771
2	54,68262	19,86935	18,04921434	7,417688	0,79	0,3611009	4,385183074
3	54,6699	19,85147	18,27242535	7,108118	2,65	3,9703785	4,374226428
4	54,65578	19,83297	18,62592187	6,964438	7,24	6,684251	4,160174851
5	54,64077	19,81953	18,36881921	7,370276	1,08	0,4261973	4,863540786
6	54,62773	19,80267	18,56754152	7,389581	0,6	0,1772951	3,795072411
7	54,61418	19,78247	18,65314341	7,391719	0,8	0,1868023	3,759701499
III галс (4,62 км от береговой черты)							
8	54,62412	19,7601	19,17645292	7,391018	2,13	0,3343079	4,950760377
9	54,63968	19,77762	18,81946751	7,390014	1,56	0,3334436	5,915302508
10	54,65185	19,7968	18,73114172	7,384135	1,39	0,3322913	4,900899698
11	54,66362	19,81093	18,75082154	7,353743	1,71	0,7546413	4,974340985
12	54,67212	19,82142	18,83670846	7,360484	1,35	0,5699712	5,208281256
13	54,69317	19,84863	18,74633313	7,383496	1,6	0,5356876	5,105622247
14	54,70772	19,86148	19,03529439	7,3691	1,32	0,4270751	4,721425073

* Измерения проводились портативным мутномером TN400 фирмы Apera Instruments.

** Измерения проводились датчиком мутности Seapoint Ltd., интегрированным в CTD-зонд.

Таблица Ж.2 — Значения температуры воды, солёности и хлорофилла а по данным измерений *in situ* в приповерхностном слое на станциях 21 августа 2020 г. в районе выноса из Калининградского залива

№ станции	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	Температура, °С	Солёность, епс	Мутность, НТУ		Хлорофилл а, мг/л
					ПМ*	Зонд**	
I галс (1,5 км от береговой черты)							
1	54,69447	19,89975	19,926224	7,3687331	1,32	0	0,9068052
2	54,6801	19,88108	19,884935	7,3612018	0,59	0,2058167	0,8199063
3	54,66685	19,86575	20,050978	7,3687125	0,66	0,054854	0,8510693
4	54,65975	19,85808	20,201733	6,6181799	6,25	6,8957141	3,8419954
5	54,65188	19,84912	20,219545	6,5086181	7,42	5,5163063	3,8926104
6	54,64867	19,84632	19,087584	7,2149727	2,04	1,5333671	1,609817
7	54,63685	19,83537	19,078507	7,1920257	3,3	1,877931	3,3759807
8	54,62157	19,8125	20,30082	6,7799062	4,61	3,9046924	3,4088903
9	54,60845	19,79887	19,933182	7,0755042	3,06	3,5918192	1,873372
II галс (2,79 км от береговой черты)							
10	54,61462	19,78263	20,486579	6,8629969	3,98	4,6286799	3,6350101
11	54,6277	19,8031	20,460077	6,8035889	4,04	4,2161251	3,6875305
12	54,6415	19,81938	16,97144	7,2866298	2,72	2,1063918	2,0380392
13	54,65607	19,83415	19,928394	7,1063889	1,5	2,2311377	2,1433977
14	54,66752	19,84683	20,277978	6,9238476	7,01	3,6759435	3,0605404
15	54,67302	19,85598	20,485263	6,8785757	6,97	5,0469965	2,8682434
16	54,67873	19,86308	20,615333	7,2916298	2,83	8,2653266	1,2185536
17	54,69178	19,88457	19,779654	7,3767315	0,17	0,1159305	1,2393156
18	54,69862	19,88955	19,864524	7,3853267	0	0	1,1538062
III галс (4,62 км от береговой черты)							
19	54,70353	19,87815	20,103167	7,3785106	0,1	0,0182657	1,1199835
20	54,68935	19,8631	20,48345	7,3656612	0,49	0,2522003	1,4026729
21	54,67615	19,84722	20,352531	7,0122865	3,22	3,5540785	2,923106
22	54,6651	19,83167	20,107598	7,1339923	3,43	2,1182037	2,4547491
23	54,64987	19,81242	18,858196	7,2005232	2	2,9925777	2,179642
24	54,63288	19,79108	21,064321	6,8201754	3,05	6,7361085	3,7687129
25	54,61933	19,77277	20,286702	6,9734954	2,92	3,3135177	4,4178545

* Измерения проводились портативным мутномером TN400 фирмы Apera Instruments.

** Измерения проводились датчиком мутности Seapoint Ltd., интегрированным в CTD-зонд.

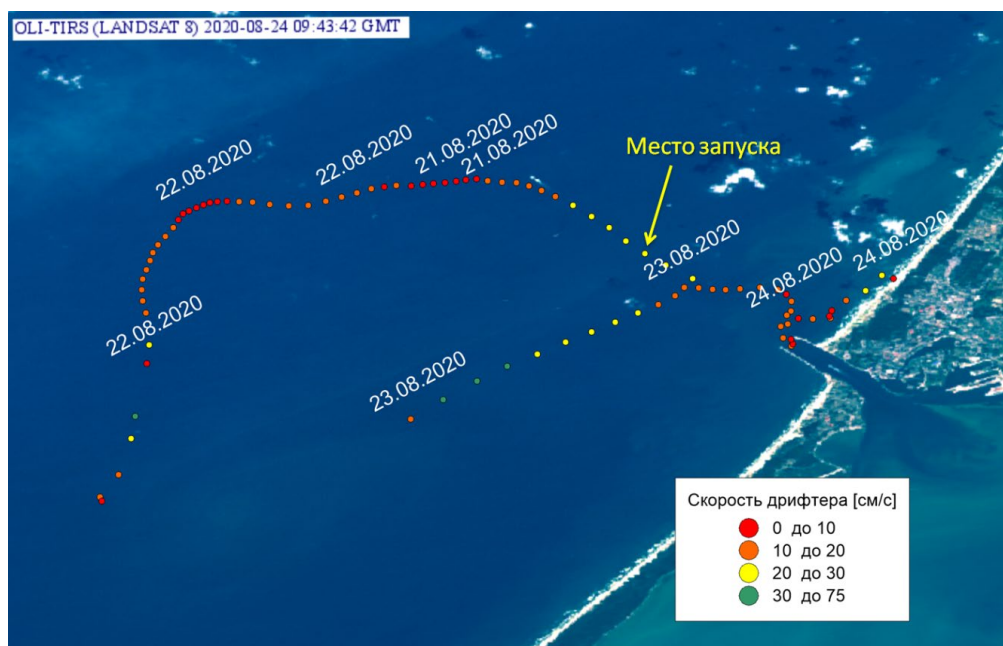


Рисунок Ж.1 — Фрагмент спутникового изображения, полученного со спутника Landsat-8 (OLI-TIRS) за 24 августа 2020 г. в районе выноса из Калининградского залива
Разноцветными метками нанесена траектория движения поверхностного дрейфера, запущенного 21 августа 2020 г.

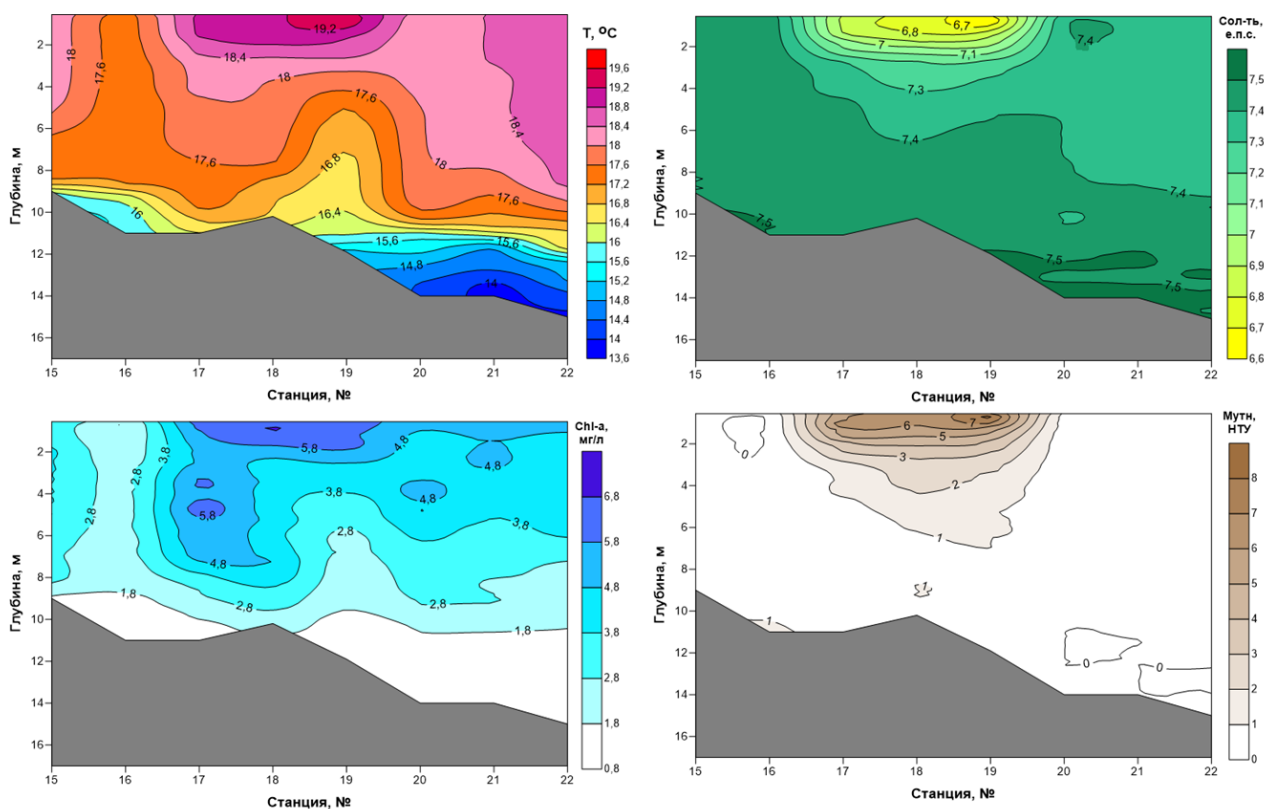


Рисунок Ж.2 — Распределение температуры, солёности, мутности и концентрации Chl-a по глубине на станциях зондирования I галса 18 августа 2020 г. в плюме выноса из Калининградского залива

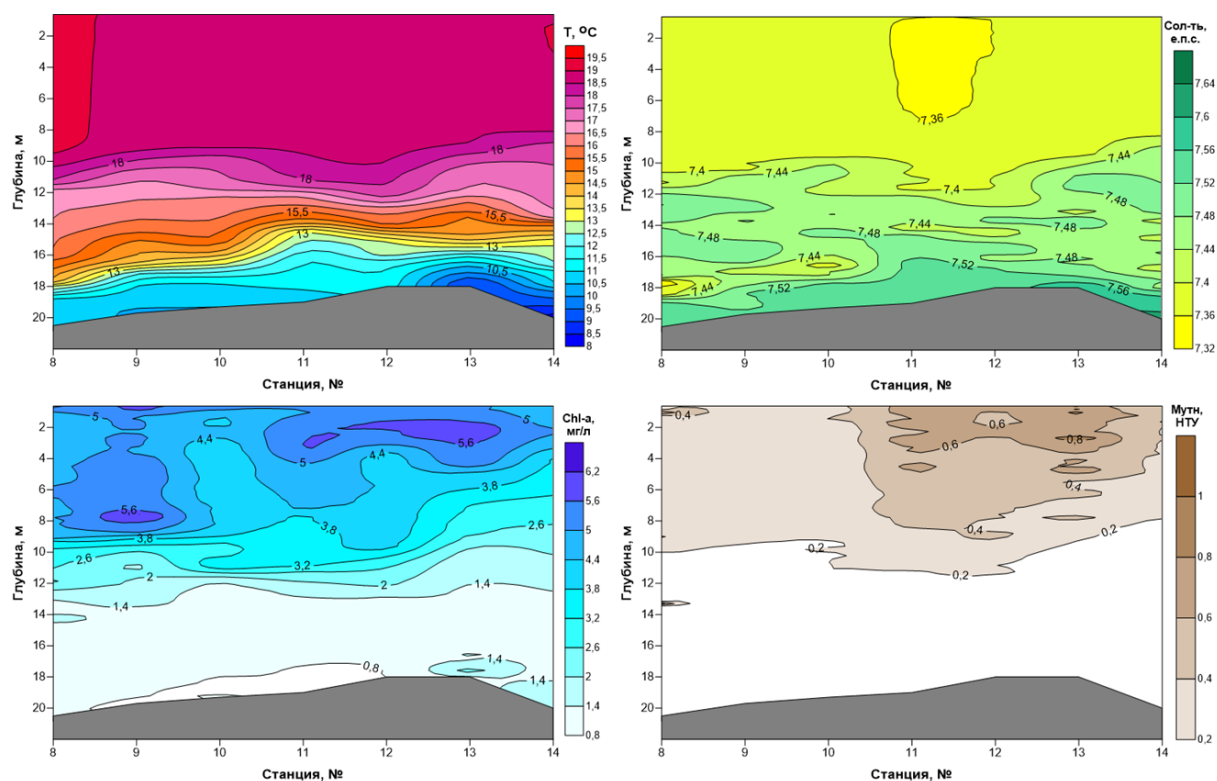


Рисунок Ж.3 — Распределение температуры, солёности, мутности и концентрации Chl-a по глубине на станциях зондирования III галса 18 августа 2020 г. в плюме выноса из Калининградского залива

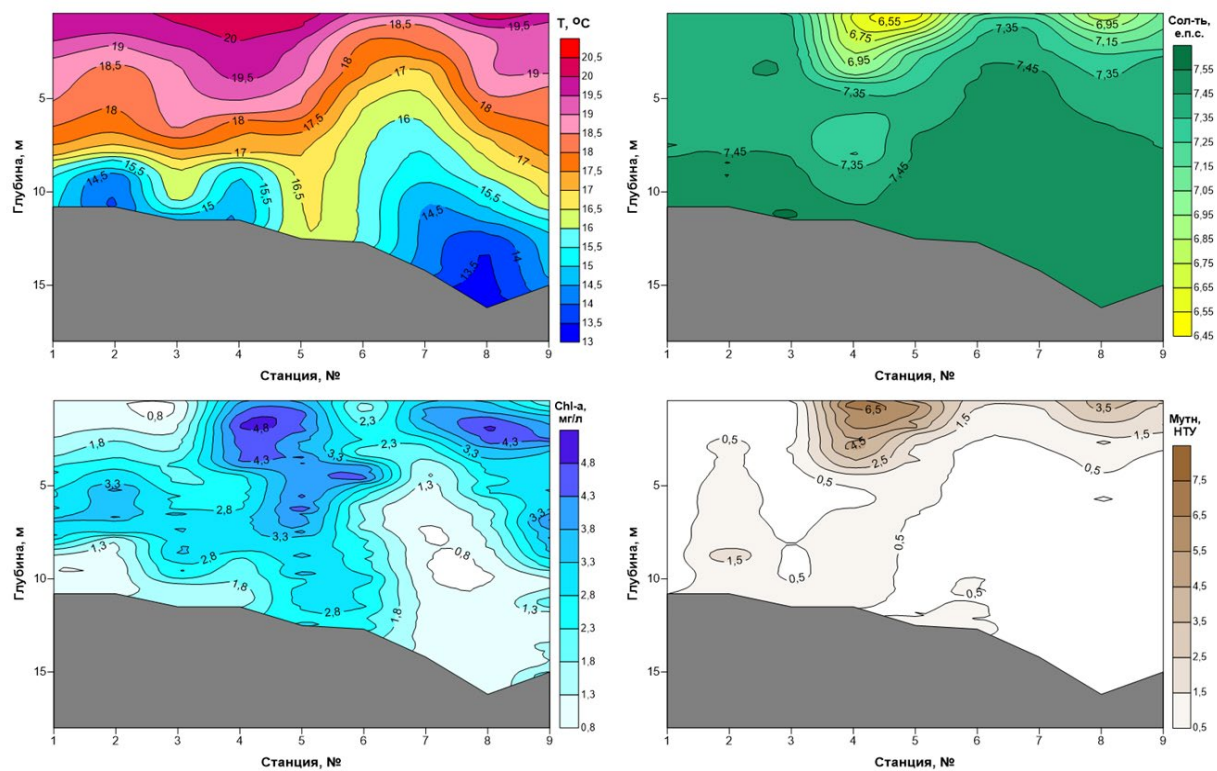


Рисунок Ж.4 — Распределение температуры, солёности, мутности и концентрации Chl-a по глубине на станциях зондирования I галса 21 августа 2020 г. в плюме выноса из Калининградского залива

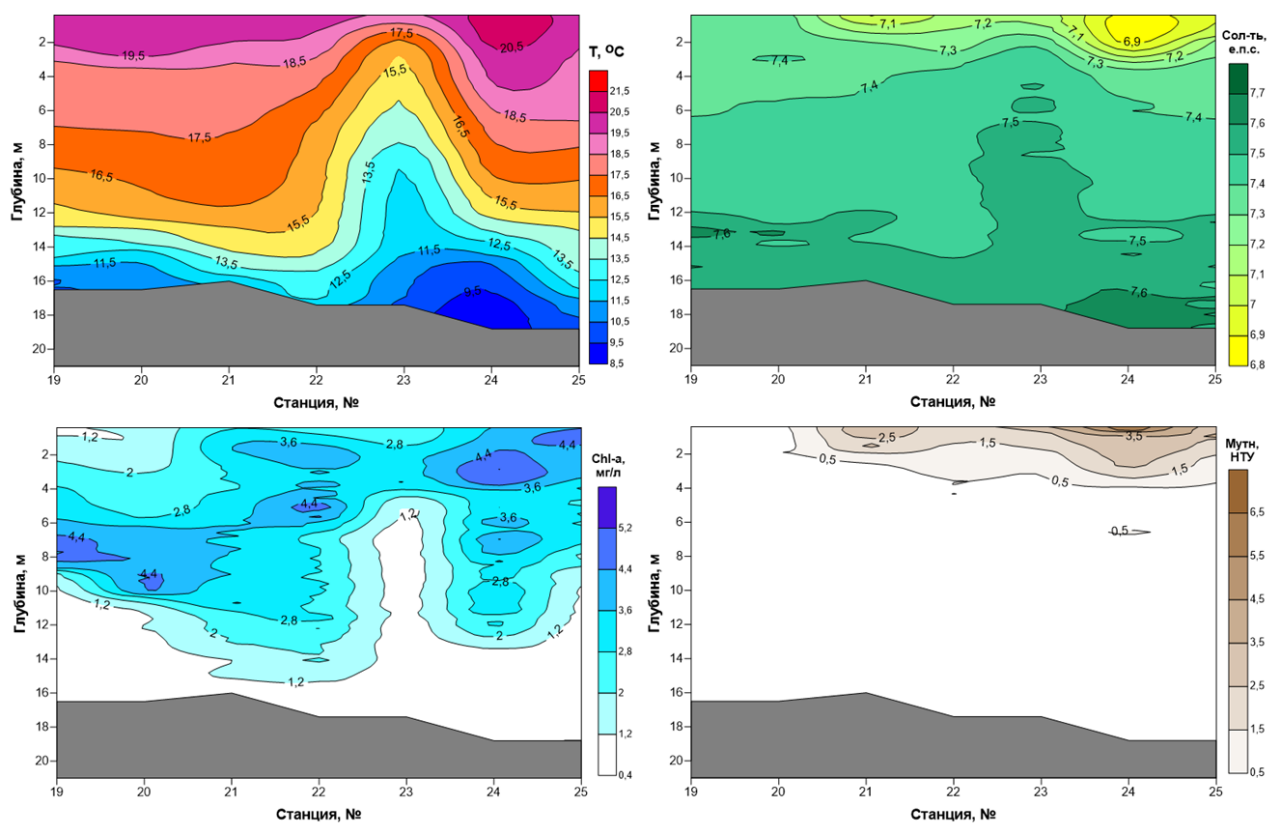


Рисунок Ж.5 — Распределение температуры, солёности, мутности и концентрации Chl-a по глубине на станциях зондирования III галса 21 августа 2020 г. в плюме выноса из Калининградского залива

ПРИЛОЖЕНИЕ И

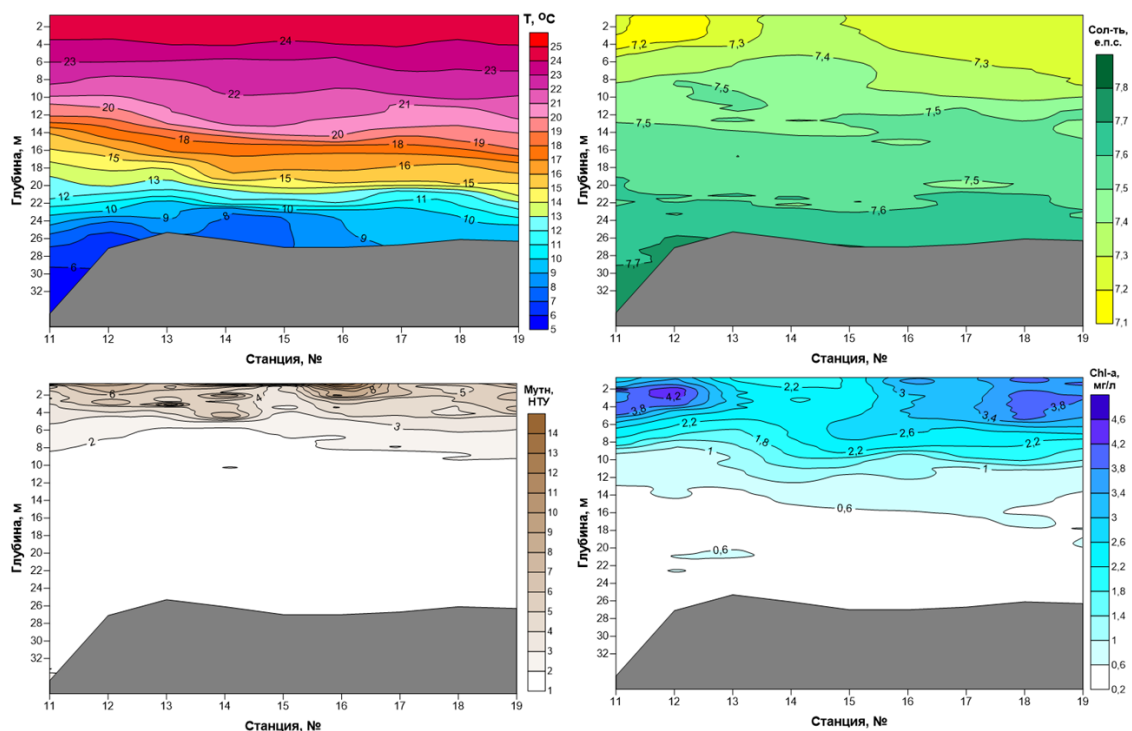


Рисунок И.1 — Распределение температуры, солёности, мутности и концентрации Chl-a по глубине на станциях зондирования II галса 16 июля 2021 г. в плюме выноса из Калининградского залива

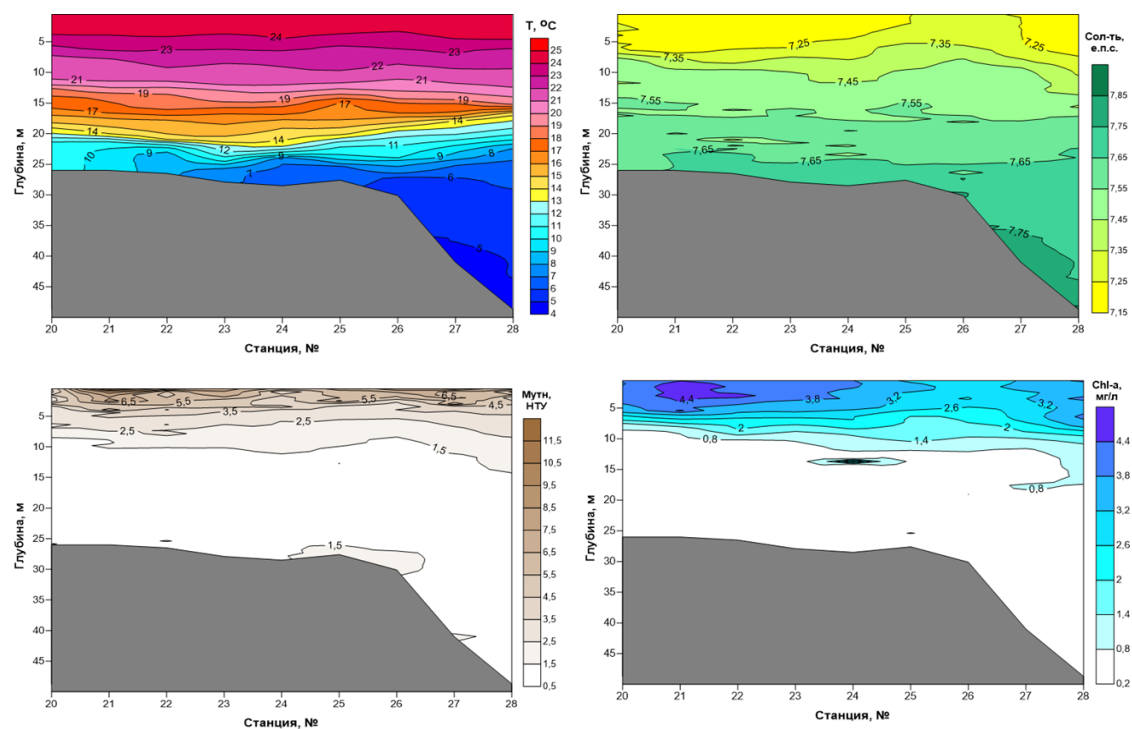


Рисунок И.2 — Распределение температуры, солёности, мутности и концентрации Chl-a по глубине на станциях зондирования III галса 16 июля 2021 г. в плюме выноса из Калининградского залива

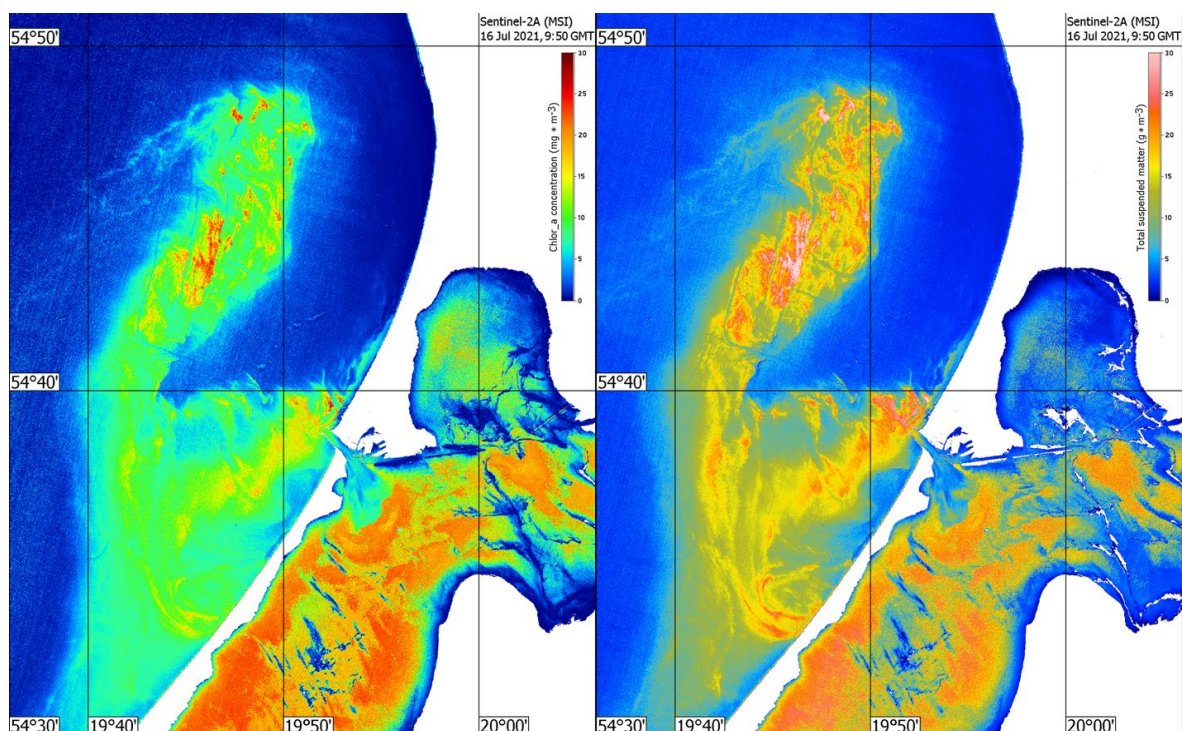


Рисунок И.3 — Карты поверхностного распределения концентрации Chl-a и концентрации взвешенного вещества, построенные на основе спутниковых данных Sentinel-2A (MSI) с использованием алгоритма C2RCC, во время судовых измерений 16 июля 2021 г. в районе выноса из Калининградского залива

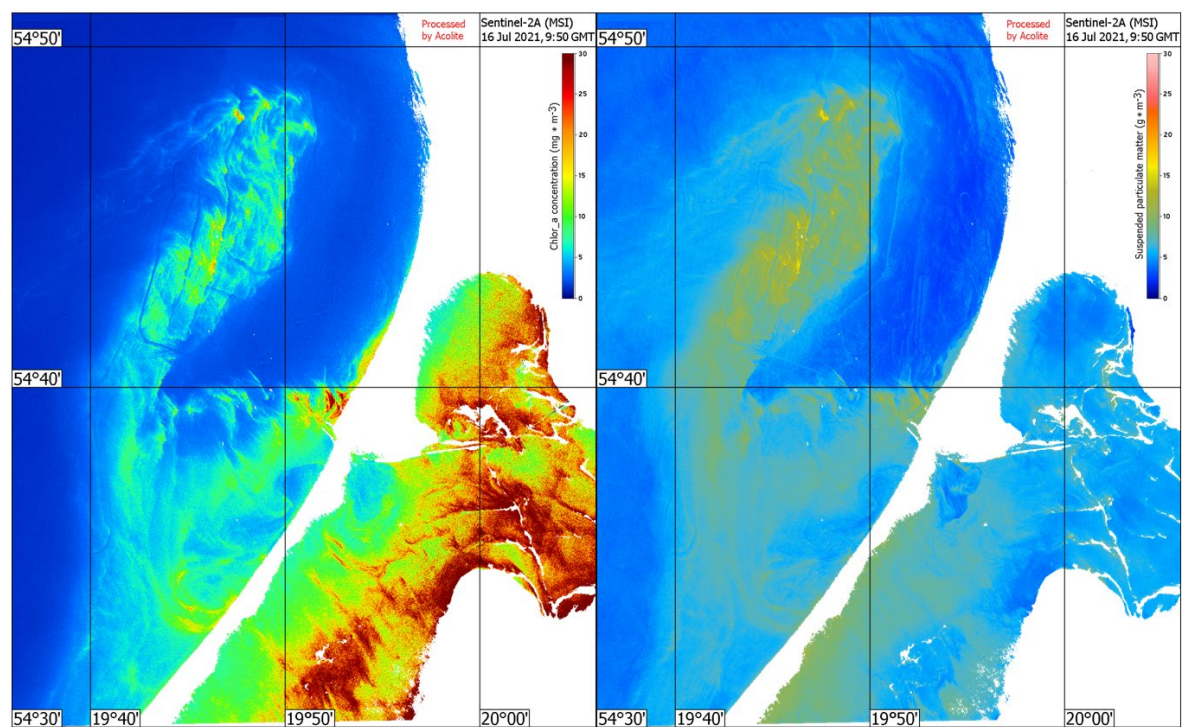


Рисунок И.4 — Карты поверхностного распределения концентрации Chl-a и концентрации взвешенного вещества, построенные на основе спутниковых данных Sentinel-2A (MSI) с использованием алгоритма ACOLITE, во время судовых измерений 16 июля 2021 г. в районе выноса из Калининградского залива

ПРИЛОЖЕНИЕ К

Таблица К.1 — Результаты спутникового мониторинга распространения плюма реки Сулак
за весь период исследований с 2014 по 2022 г.

Год	Общее количество снимков	Количество облачных сцен	Количество безоблачных сцен	Доля безоблачных сцен, %	Количество сцен с плюмом	Доля выявленных сцен с плюмом, %
2014	40	22	18	45	13	72
2015	55	31	20	36	17	85
2016	85	53	32	38	24	75
2017	119	65	54	45	32	59
2018	176	91	85	48	49	58
2019	178	99	79	44	49	62
2020	170	93	77	45	40	52
2021	180	109	71	39	45	63
2022	207	118	89	43	38	43
Всего	1210	681	525	43	307	58

Таблица К.2 — Результаты спутникового мониторинга распространения плюма реки Терек
за весь период исследований с 2014 по 2022 г.

Год	Общее количество снимков	Количество облачных сцен	Количество безоблачных сцен	Доля безоблачных сцен, %	Количество сцен с плюмом	Доля выявленных сцен с плюмом, %
2014	41	18	19	46	15	79
2015	49	28	21	43	18	86
2016	82	50	32	39	28	88
2017	111	72	39	35	32	82
2018	159	95	64	40	59	78
2019	175	93	82	47	62	76
2020	174	89	76	44	54	71
2021	179	106	73	41	62	85
2022	193	100	93	48	69	74
Всего	1163	651	499	43	390	78

ПРИЛОЖЕНИЕ Л

Таблица Л.1 — Результаты in situ измерений в плюмах рек Сулак и Терек 6 и 9 июня 2022 г.

Время	Номер станции	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	Мутность воды, NTU	Концентрация взвеси, г/м ³	Район измерений
6 июня 2022 г.						
11:18	1	43,58448	47,5969	50,9	38,7	Приустьевая зона реки Терек
11:20	2	43,58501	47,59708	25,2	23,1	
11:26	3	43,57858	47,59528	608,5	786,3	
11:36	4	43,57225	47,59239	377,5	413,6	
11:41	5	43,56986	47,58963	42,8	29,6	
11:50	6	43,5732	47,61118	63,6	45,1	
11:54	7	43,57055	47,62677	31,7	27,1	
11:59	8	43,5681	47,64625	14,3	8,4	
12:05	9	43,56577	47,66943	4,9	3,6	
12:49	10	43,33991	47,5395	15,0	10,8	Бухта реки Сулак
12:54	11	43,33823	47,54109	118,0	115,6	
13:07	12	43,25939	47,55192	14,2	9,1	Приустьевая зона реки Сулак
13:11	13	43,2584	47,55233	80,1	53,3	
13:18	14	43,25011	47,56622	17,0	28,0	
13:22	15	43,25104	47,55922	21,8	11,0	
13:26	16	43,25242	47,55528	50,5	37,9	
13:30	17	43,25416	47,55035	119,0	103,2	
13:35	18	43,25649	47,54775	133,5	107,7	
14:18	19	43,25839	47,53567	114,5	107,4	В реке Сулак
9 июня 2022 г.						
10:22	1	43,25566	47,54758	137,0	128,2	Приустьевая зона реки Сулак
10:27	2	43,25372	47,55058	130,0	117,6	
10:31	3	43,25397	47,55501	82,3	61,2	
10:34	4	43,2533	47,55755	38,3	23,0	
10:38	5	43,25314	47,56214	20,5	10,7	
10:43	6	43,2537	47,56899	18,8	8,6	
10:48	7	43,25461	47,57697	12,0	10,8	
10:56	8	43,25822	47,59407	7,8	5,1	

Время	Номер станции	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	Мутность воды, NTU	Концентрация взвеси, г/м³	Район измерений
11:06	9	43,26461	47,61996	6,3	4,3	
11:16	10	43,27798	47,64831	5,0	3,2	
11:33	11	43,28698	47,55991	16,6	10,8	
11:39	12	43,27731	47,55798	17,4	8,8	
11:45	13	43,26286	47,55409	16,6	7,7	
11:49	14	43,25646	47,55202	101,0	86,8	
11:53	15	43,25028	47,54913	119,5	81,1	
11:57	16	43,23946	47,5414	47,2	20,7	
12:02	17	43,22365	47,533	22,5	9,3	
12:09	18	43,20107	47,52025	11,6	6,3	
12:16	19	43,17827	47,50396	12,1	7,0	
12:44	20	43,25745	47,53656	139,5	120,1	В реке Сулак

ПРИЛОЖЕНИЕ М

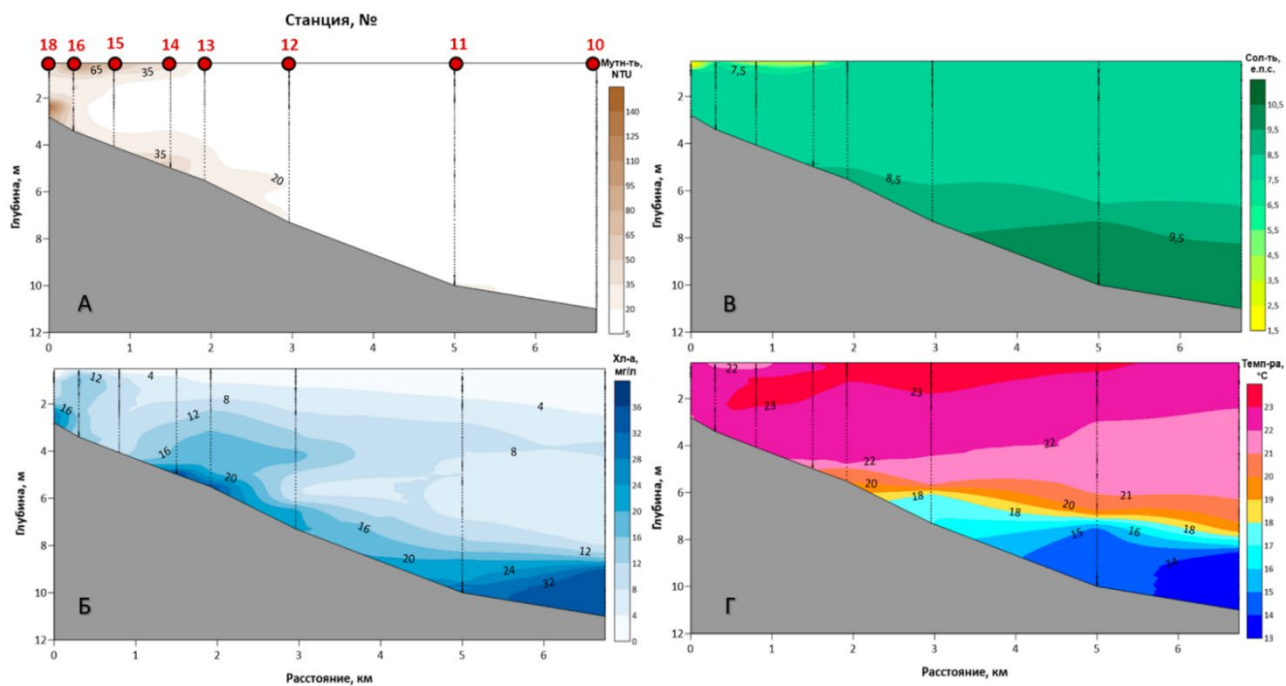


Рисунок М.1 — Распределение мутности (а), концентрации Chl-a (б), солёности (в) и температуры (г) по глубине на станциях зондирования разреза № 2 от 4 июня 2023 г. в районе выноса р. Сулак

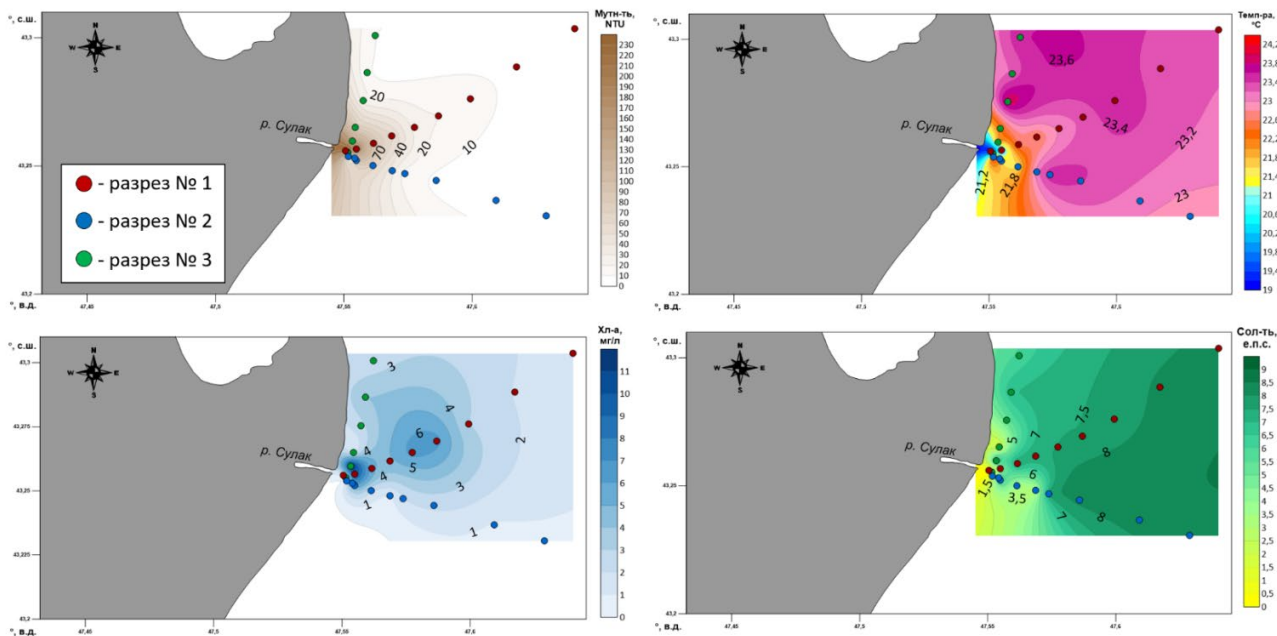


Рисунок М.2 — Карты поверхностного распределения температуры, солёности, мутности морской воды и концентрации Chl-a за 4 июня 2023 г. в районе выноса р. Сулак

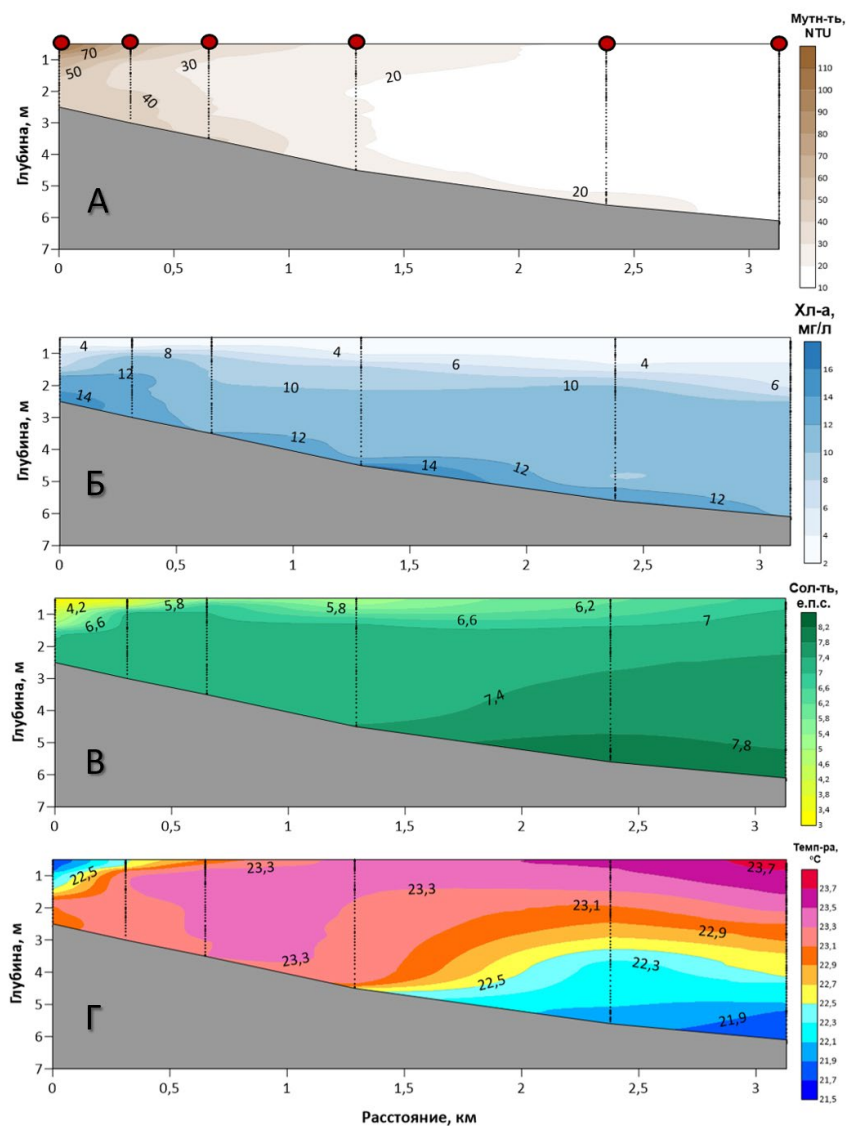


Рисунок М.3 — Распределение мутности (а), концентрации Chl-a (б), солёности (в) и температуры (г) по глубине на станциях зондирования разреза № 3 от 5 июня 2023 г. в районе выноса р. Сулак