

НАЗИРОВА Ксения Равильевна

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

Специальность:
1.6.17 — Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата географических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

Научный руководитель: **Лаврова Ольга Юрьевна**
кандидат физико-математических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории
аэрокосмической радиолокации отдела исследования
Земли из космоса Федерального бюджетного учреждения
науки Институт космических исследований Российской
академии наук, Москва

Официальные оппоненты: **Завьялов Петр Олегович**
член-корреспондент РАН, доктор географических
наук, и. о. заместителя директора Федерального
бюджетного учреждения науки Институт океанологии
им. П. П. Ширшова Российской академии наук по научно-
организационной работе, руководитель лаборатории
взаимодействия океана с водами суши и антропогенных
процессов, Москва

Лебедев Сергей Анатольевич
доктор физико-математических наук, главный научный
сотрудник лаборатории геоинформатики и геомагнитных
исследований Федерального бюджетного учреждения
науки Геофизический центр Российской академии наук,
Москва

Ведущая организация: Федеральное бюджетное учреждение науки Институт
водных проблем Российской академии наук, Москва

Защита диссертации состоится **18 сентября 2025 г. в 15 ч 00 мин** на
заседании диссертационного совета 24.2.365.03 по адресу 195196,
г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, д. 98

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте
<https://rshu.ru/university/dissertations/> ФГБОУ ВО «Российский
государственный гидрометеорологический университет»

Автореферат разослан _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.365.03
доктор физико-математических наук



Е. В. Заболотских

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её 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 определённую 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.

Речные плюмы — это прилежащие к устью мезомасштабные структуры, выделяющиеся пониженной солёностью и отличной от окружающей морской воды температурой, а также, как правило, повышенной мутностью, высоким содержанием взвеси и растворённой органики (Завьялов и др., 2014). Под плумом 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 плумов, таких как их пространственные характеристики, направление распространения в зависимости от гидродинамических процессов в прибрежной зоне и гидрометеорологической ситуации, определение их пространственно-временной изменчивости, мутности и концентрации взвешенного вещества на основе спутниковых данных. Для района речного плума 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 трём районам: приустьевая зона р. Мзымты (Чёрное 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 траекториями, 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 всём 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 Чёрного моря, где в течение ряда лет проводились *in situ* измерения сотрудниками Института океанологии РАН им. П. П. Ширшова (ИО РАН) под руководством профессора П. О. Завьялова (Короткина и др., 2011; Осадчиев, 2021). 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 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.

Для районов выноса лагунных вод из Калининградского залива регулярного спутникового мониторинга не проводилось. Оценка биооптических характеристик вод юго-восточной Балтики с использованием разработанного 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 плюма (Буканова и др., 2011; Гоголев и др., 2020; Копелевич и др., 2008, 2016).

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

Всем вышесказанным 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 плюмов на основе совместного анализа данных дистанционного зондирования Земли 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 р. Мзымты в северо-восточной части Чёрного моря; третий — выносы рек Терек и Сулак в северо-западной части Каспийского моря. Выбор объектов исследования определяется большим набором спутниковой информации и данных натурных измерений, полученных синхронно со спутниковой съёмкой.

Методология и методы научного исследования. Диссертационное исследование основано на использовании методического подхода, заключающегося в комплексном анализе контактных и дистанционных данных: квазисинхронных подспутниковых натуральных 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 натуральных 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 плулов 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 период с января 2014 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.

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 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 р. Мзымты на спутниковых изображениях достаточно тонкого (менее 1 м) подповерхностного слоя с небольшой мутностью. 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 р. Сулак после схода селевых потоков в горах Дагестана в 2023 г.

6. Для плулов 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*) плулов 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 плулов 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 результатов диссертационного исследования 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 вопросы, 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 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 публикации и доклады по теме работы.

Все опубликованные работы автора основаны на натурных данных, собранных лично автором диссертационной работы. Личный вклад автора в исследованиях (Назирова, Краюшкин, 2019, 2021; Назирова и др., 2023, 2024; Nazirova et al., 2021) состоит в выполнении всех этапов работы над научной статьёй: сбор, обработка, интерпретация, анализ данных и полное написание текста. Личный вклад автора в работах (Жаданова, назирова, 2023; Краюшкин и др., 2018; Лаврова и др., 2019, 2022, 2023; Lavrova et al., 2019) заключался в подготовке, обработке и анализе натурных данных, и частичном написании текстов статей (введения, описания данных, методов и района исследования и раздела посвящённого 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 (ИКИ РАН) 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», № РНФ 23-27-00124 (2023–2024), руководитель проекта;
- проект РНФ «Оценка изменчивости экологического состояния Каспийского моря в текущем столетии по данным спутникового дистанционного зондирования», № РНФ 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 п. 4.3. «Развитие методов количественной оценки параметров гидродинамических процессов в верхнем слое океана и в приподном слое атмосферы на основе многолетних данных дистанционного зондирования из космоса», Государственное задание Института космических исследований РАН, госрегистрация № 122042500031-8 (2021–2023), исполнитель.

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

Основные результаты диссертации докладывались на российских и международных конференциях, включая: ежегодные Международные конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, ИКИ РАН, 2017–2024 гг.); Международная конференция по дистанционному зондированию Общества оптики и фотоники (*англ.* Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers — SPIE) в Страсбурге, Франция (2019) и в формате on-line в 2018 и в 2021 гг.; Международный симпозиум по геонаукам и дистанционному зондированию (*англ.* International Geoscience and Remote Sensing Symposium — IGARSS) в Валенсии, Испания (2019); 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); Первая Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Россия в Десятилетия ООН наук об океане» в Москве, Россия (2022); VII Всероссийская научная конференция молодых учёных «Комплексные исследования Мирового океана» (КИМО) в Санкт-Петербурге, Россия (2023).

За результаты, вошедшие в диссертацию, соискатель была награждена премией ИКИ РАН в номинации «Лучшая работа, выполненная молодыми учёными» в 2019, 2020 и 2024 гг., а также была отмечена 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.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** дано обоснование актуальности темы, определена основная цель исследования, перечислены поставленные задачи, основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов, их научная и практическая значимость. Представлены личный вклад автора, апробация результатов исследования и список публикаций по теме диссертации.

Глава 1 посвящена обзору современного состояния изученности проблемы распространения речных и лагунных вод в море. В **разделе 1.1** приводятся общие сведения о предмете исследования. В **разделе 1.2** представлен обзор основных результатов предыдущих исследований по восстановлению количественных характеристик концентрации взвешенного вещества в приустьевых районах Мирового океана на основе спутниковых данных. **Разделы 1.3, 1.4 и 1.5** посвящены обзору современного состояния изученности районов исследования в Чёрном, Балтийском и Каспийском морях.

В **Главе 2** дано описание материалов и методов, применявшихся при выполнении диссертационной работы. В **разделе 2.1** представлена общая информация об экспедиционных исследованиях: период и объём экспедиционных исследований, карты-схемы судовых натурных измерений. В **разделе 2.2** приведены технические характеристики использованной приборной базы. **Раздел 2.3** посвящён использованным в диссертационной работе метеорологическим данным: представлены технические характеристики судовой метеостанции, краткий обзор модельных данных архива метеорологических параметров Meteoblue (www.meteoblue.com), данных реанализа NCEP Climate Forecast System (www.noaa.gov) и данных прибрежных метеостанций (www.rp5.ru). В **разделе 2.4** изложена методика оценки концентрации взвешенного вещества с помощью пробоотбора и последующего лабораторного анализа с целью получения информации о минеральном составе взвеси в морских пробах воды. В **разделе 2.5** представлен обзор использованных данных дистанционного зондирования; применяемых алгоритмов восстановления оптических параметров; методики обработки спутниковых данных. **Раздел 2.6** посвящён методике восстановления поля мутности морской воды на основе натурных и дистанционных методов исследования. Освещены основные особенности и физические различия каждого метода исследования.

Глава 3 посвящена результатам исследования распространения вод Калининградского залива в юго-восточной части Балтийского моря. В **разделе 3.1** приведено краткое описание основных физико-географических особенностей района исследования. В **разделе 3.2** представлены результаты спутникового мониторинга выноса лагунных вод из Калининградского залива за период с января 2014 по декабрь 2020 г.

Ярко прослеживаются сезонные различия в проявлении плумов на спутниковых изображениях. Максимальное количество случаев наблюдается в летние месяцы (июнь—август): от 12 до 17, 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 по ноябрь 2020 г.). Для этого использовался архив метеорологических данных Meteoblue. В качестве дополнительных источников брались данные реанализа NCEP и данные прибрежных метеостанций. Было получено, что в весенне-летний период (с мая по август) преобладают слабые ветра (≤ 5 м/с) разнонаправленного характера. Максимальная скорость ветра чаще всего встречается северо-восточных/восточных румбов от 5 до 10 м/с. В осенне-зимний период скорость ветра значительно выше, увеличивается количество случаев, когда она превышает 15 м/с. Господствующее направление ветра для данного периода это румбы юго-западной/западной и юго-восточной/восточной направленности.

Каждый вынос из Калининградского залива в период с 2014 по 2020 г. был картирован в информационной системе See the Sea, разработанной в ИКИ РАН. Кроме этого, были рассчитаны суммарные площади распространения плумов и площадь каждого плума в отдельности.

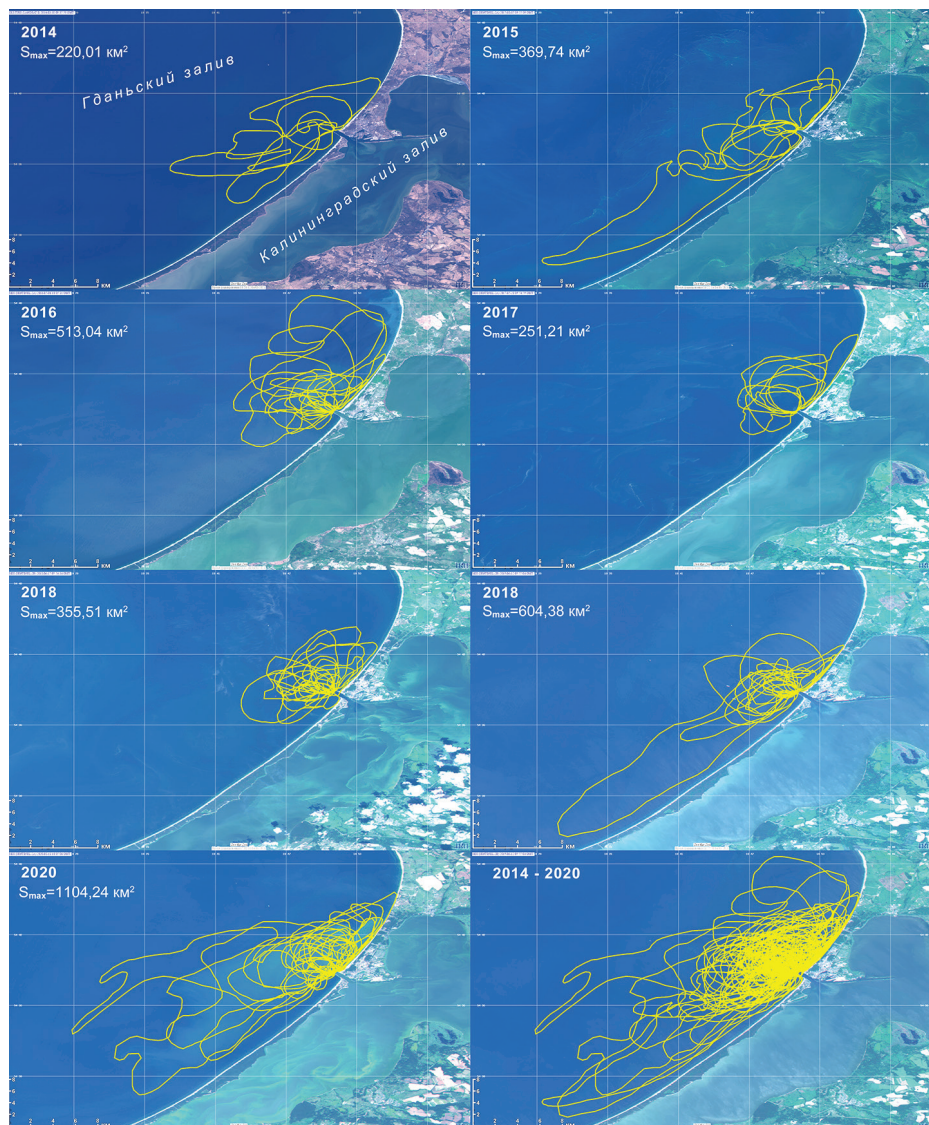


Рисунок 1 — Сводные карты поверхностных проявлений выноса из Калининградского залива в акваторию Гданьского залива, составленные на основе спутниковых данных за каждый год для периода исследования с 2014 по 2020 г.

Наибольшую суммарную площадь распространения вынос имел в 2020 г.: 1104,24 км², а наименьшую — в 2014 и 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 плумов свойственна для случаев при $S = 15\text{--}25$ км².

В целом для большого числа случаев характерны площади плюмов, не превышающие 25 км^2 . 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 8 км на юго-запад и северо-восток от створа Балтийского пролива (Рисунок 1). Было отмечено, что вынос из залива фиксируется на спутниковых изображениях на протяжении всего года, площадь плюмов в любое время года в течение нескольких дней может изменяться существенно (например, 03.06.2016 составлять $130,99 \text{ км}^2$, а 05.06.2016 — $10,6 \text{ км}^2$). В среднем в летний период вынос из канала проявляется наиболее ярко за счёт наличия трассеров, связанных с интенсивным «цветением» цианобактерий, и имеет большие площади распространения по сравнению с другими сезонами.



Рисунок 2 — Примеры разных типов выноса из Калининградского залива на фрагментах спутниковых изображений. Жёлтыми стрелками указано направление ветра

Была установлена связь формы и характера распространения плюма в зависимости от ветрового режима. Было получено, что максимальные площади выноса зафиксированы в летние месяцы при преобладании слабых северных/северо-восточных ветров. При западных/юго-юго-западных ветрах Калининградские воды из залива распространяются в северо-восточном направлении (Рисунок 2а), вовлекаясь в систему прибрежных течений. Взвешенные частицы при таких условиях могут распространяться на большие расстояния вплоть до Самбийского п-ва и дальше за м. Таран. При восточных/северо-восточных/восточно-северо-восточных ветрах вынос распространяется в юго-западном направлении (Рисунок 2б). При резких сменах характера ветрового режима на западной периферии выноса могут образовываться вихревые или грибовидные структуры (Рисунок 2в). Для затоков вод Гданьского залива в Калининградский залив, обнаруженных по данным дистанционного зондирования, характерны сильные устойчивые западные/северо-западные ветры со средней скоростью 8–10 м/с (Рисунок 2г). Преимущественно

данное явление встречается в весенне-зимний период. Наибольшее количество случаев затока морских вод в Калининградский залив отмечалось в марте.

Комплексный анализ спутниковых данных и гидрометеорологической информации 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. 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.

В разделе 3.3 представлены результаты исследования трёхмерной структуры плюма на основе данных натурных измерений (Рисунки 3 и 4). Было получено, что в приповерхностном слое плюм характеризуется пониженной солёностью, в среднем на 1–2 единицы меньше, чем морские воды (от 5,20 до 7,5 епс) (единицы практической солёности, *англ.* Practical Salinity Units), и наоборот, повышенными значениями мутности морской воды, в среднем от 8 до 17 НТУ (нефелометрические единицы мутности, от *англ.* NTU, Nephelometric Turbidity Unit). Исследование вертикальной структуры плюма показали, что в основном воды Калининградского залива теплее вод Гданьского залива на несколько градусов Цельсия (в летний период) и отличаются повышенной концентрацией 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 (от *англ.* C — Conductivity (электропроводность), пересчёт в солёность, T — Temperature (температура), D — Depth (глубина), измеряется давление), так и полученные при ADCP-профилировании (*англ.* Acoustic Doppler Current Profiler, акустический доплеровский измеритель течения) данные обратного рассеивания.

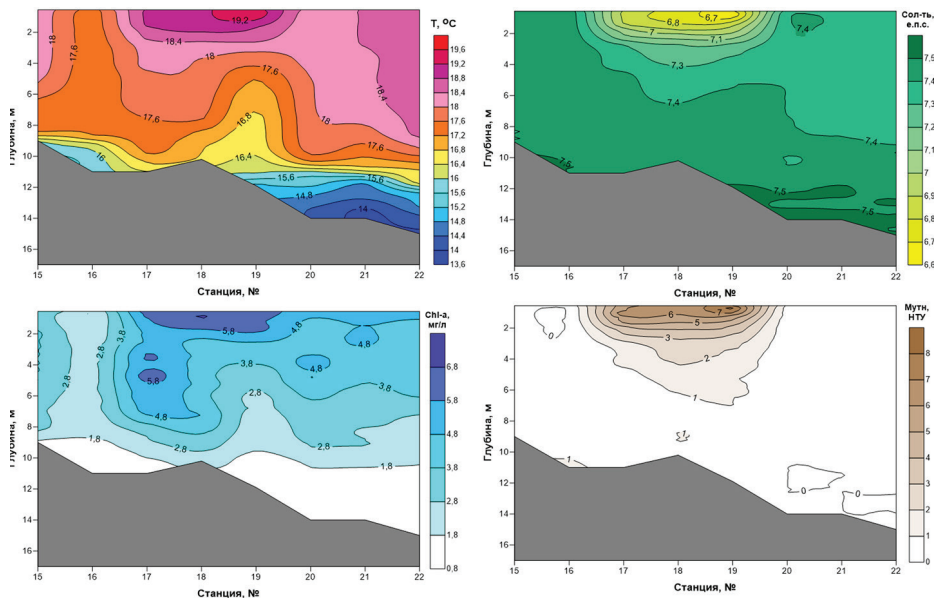


Рисунок 3 — Распределение температуры, солёности, мутности и концентрации хлорофилла *a* по глубине на станциях зондирования 18 августа 2020 г. в районе выноса из Калининградского залива

Глава 4 посвящена результатам исследования плюма р. Мзымты на основе спутниковых данных и натурных измерений. В **разделе 4.1** приведено краткое описание основных физико-географических особенностей района исследования в северо-восточной части Чёрного моря. **Раздел 4.2** посвящён исследованию влияния материкового стока на гидрологическую структуру прибрежных вод. В результате серии подспутниковых экспедиционных измерений был предложен алгоритм для «кластеризации» области, находящейся под большим влиянием речных вод в конкретный момент съёмки. Как правило, подветренная сторона плюма выражена наиболее яркой фронтальной границей. Мутность морской воды даже в нескольких метрах от границы плюма практически нулевая. Получив пороговое значение на соседних станциях яркого фронтального раздела можно очертить границы всего плюма.

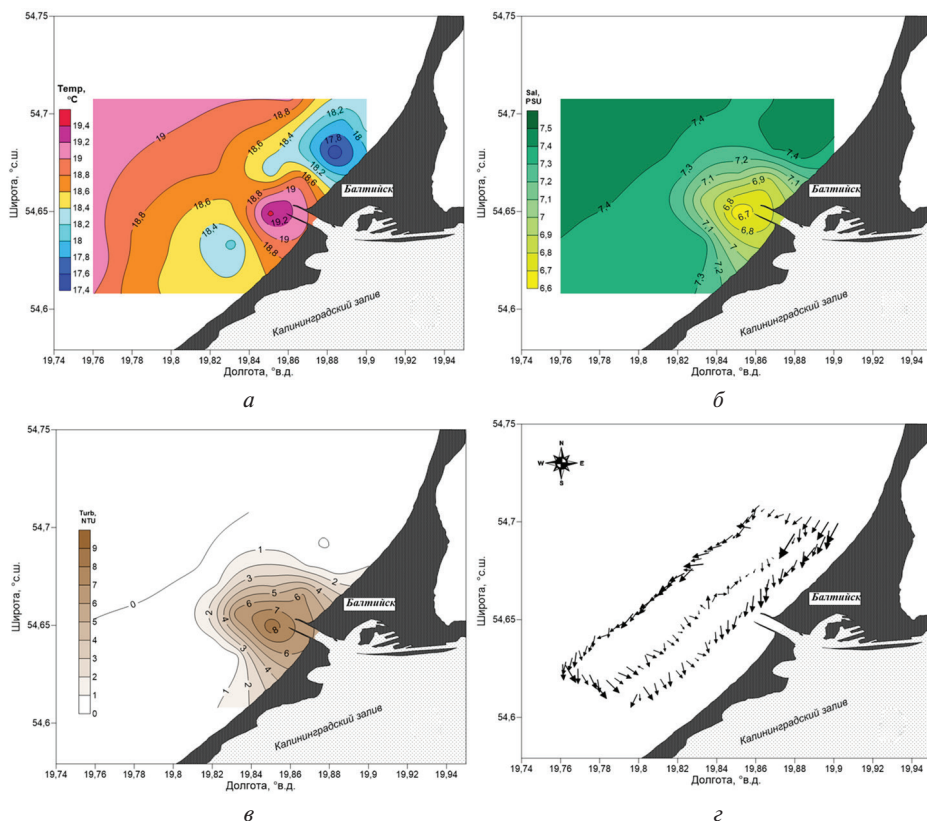


Рисунок 4 — Карты поверхностного распределения температуры (а), солёности (б), мутности морской воды (в) и поверхностных течений (г) за 18 августа 2020 г. в районе выноса из Калининградского залива

В ходе анализа пространственного распределения основных гидрологических параметров (температура, солёность, мутность морской воды) в плюме по данным измерений *in situ* была продемонстрирована высокая изменчивость оптических свойств речных вод вследствие изменения состава взвешенных веществ и увеличения интенсивности стока реки. На примере судовых измерений 28 апреля 2018 г. были получены особенности пространственного распределения основных гидрологических параметров на перпендикулярном к берегу разрезе до кромки плюма (Рисунок 5).

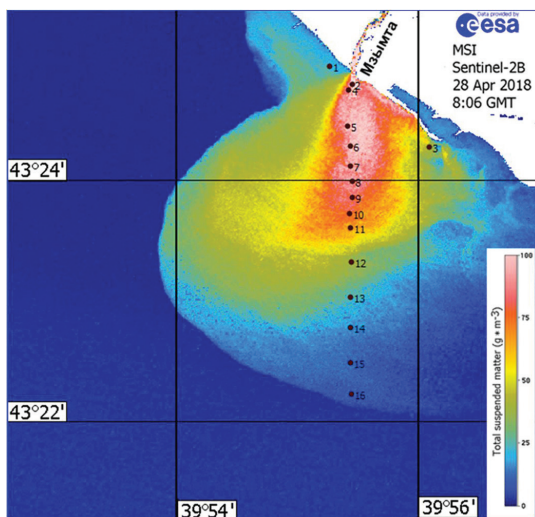


Рисунок 5 — Схема расположения станций зондирования на разрезе 28 апреля 2018 г. в плюме р. Мзымты

Анализ результатов измерений показал следующее: границы распространения речных вод идентифицируются по натурным измерениям не так однозначно, как по спутниковым данным. Выделена область (в 2018 г. это станция № 4), за пределами которой уменьшение/увеличение исследуемых характеристик происходит постепенно и незначительно между соседними точками. Как показали результаты натурных измерений, хорошо идентифицируется только граница маргинального фильтра (принято считать, что в этой зоне откладывается 93–95 % от взвешенных и 20–40 % от растворённых веществ речного стока, включая загрязнения), после которой значения мутности уменьшаются сразу практически в 10 раз — с 105,5 до 11,8 НТУ. Резкие изменения на станции № 4 наблюдаются также в температуре воды (с 11,4 до 14,7 °C) и солёности (с 3,77 до 16,79 епс).

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 заточкам морских вод через фронтальную зону плюма. Вследствие этого в приустьевой зоне Мзымты образуются локальные области увеличения/уменьшения мутности и солёности. Это также справедливо и для выноса из Калининградского залива.

В результате анализа серии натурных измерений было 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 температуры и солёности — это тонкая линза, способная распространяться до 8 км от береговой зоны (Рисунок 6). В приустьевой зоне в приповерхностном слое значения температуры, солёности и мутности морской воды могут различаться в несколько раз (для мутности в десятки раз) по сравнению со значениями на глубине пять метров или на станциях в 200 м от берега.

В результате установлено, что наиболее характерный параметр для идентификации плюма р. Мзымты — мутность морской воды, и только после этого солёность и в меньшей степени температура.

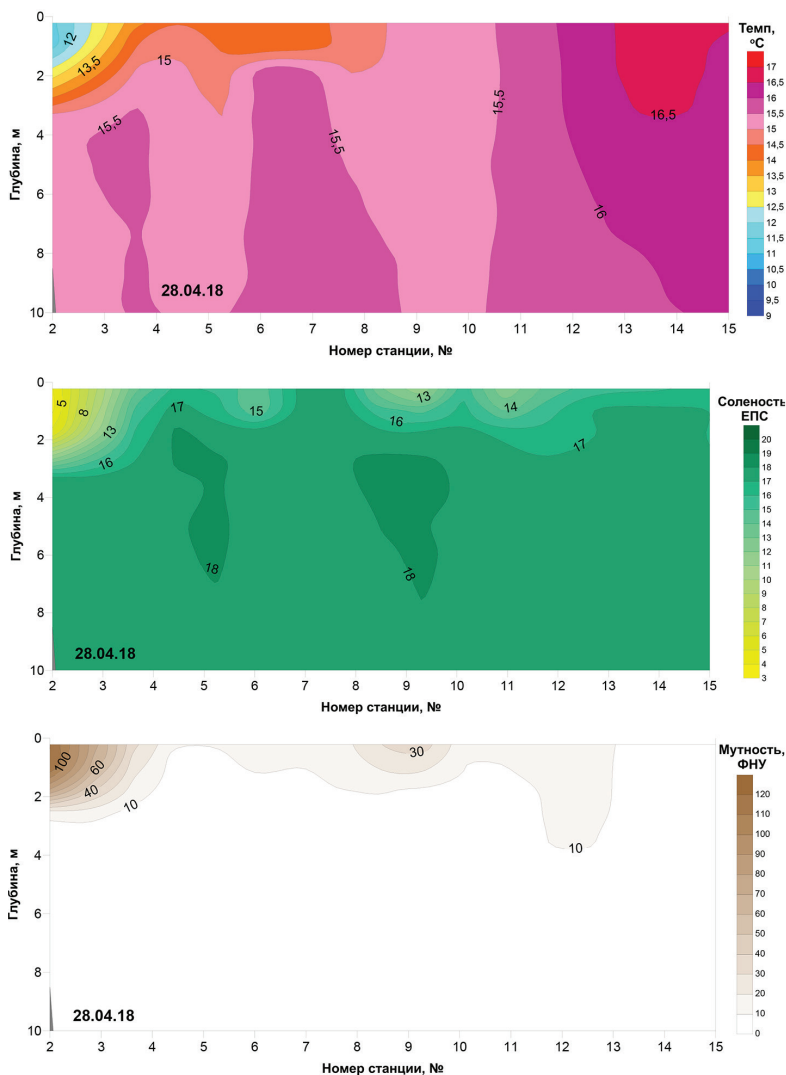


Рисунок 6 — Распределение температуры, солёности, мутности по глубине на станциях зондирования 28 апреля 2018 г. в плюме р. Мзымты

Раздел 4.3 посвящён исследованию влияния динамических процессов (ветрового режима и прибрежных течений) на распространение речного плюма. В первом подразделе представлена классификация речных плумов в районе исследования. Полученные закономерности для периода подспутниковых измерений 2018–2021 гг. полностью согласуются с более ранними работами (Завьялов и др. 2014). Далее описывается исследование мелкомасштабной динамики сдвига границы речного плюма. После проведения серии экспериментов в 2019 г. были впервые оценены мелкомасштабная скорость смещения границы речного плюма р. Мзымты и её связь с направлением ветра (Рисунок 7).

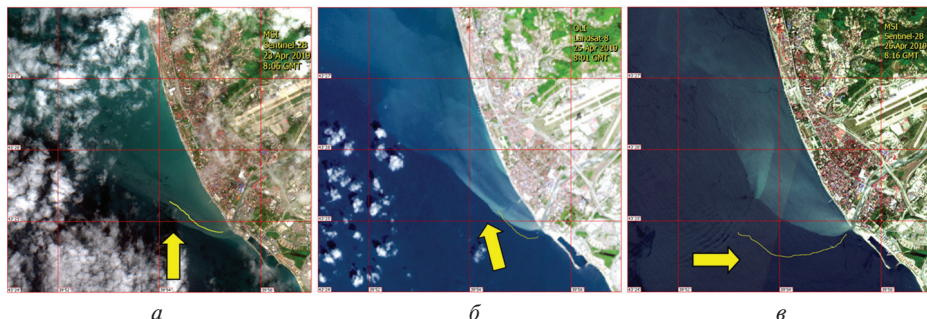


Рисунок 7 — Иллюстрация быстрого смещения границы речного плюма на фрагментах спутниковых изображений за 23 апреля (а), 25 апреля (б) и за 26 апреля (в) 2019 г. На изображениях True Color (истинный цвет) жёлтой линией нанесён GPS-трек вдоль границы речного плюма спустя 3 ч после пролёта спутников. Жёлтой стрелкой указано преобладающее направление ветра в течение этого времени (Nazirova et al., 2019)

Было получено, что при слабых ветрах южных, юго-восточных румбов смещение границы минимально: за 3 ч 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 ветрах западных румбов (26 апреля): за 3 ч 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 данных на конкретных станциях, полученных дистанционными и натурными измерениями, так как в течение нескольких часов конфигурация плюма способна изменяться.

Раздел 4.4 посвящён проблемам восстановления поля мутности и концентрации взвешенного вещества в приустьевой зоне натурными и дистанционными методами. В разделе представлены результаты попарного корреляционного анализа разных типов данных, результаты рентгенофазового анализа морских проб, описана связь минерального состава и оптической величины мутности, 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 (Nazirova et al., 2021).

Представлены результаты сравнительного анализа мутности морской воды и концентрации взвешенного вещества, полученные весовым методом. Анализ показал, что концентрация m (в г/м^3) взвешенного вещества в пробах прямо пропорциональна мутности Turb (в НТУ) поверхностного слоя воды, определённой с помощью портативного мутномера. Полученные значения хорошо аппроксимируются прямой, проходящей через начало координат: $m = 0,84\text{Turb}$. Величина достоверности аппроксимации: $R^2 = 0,98$. Эта зависимость проявлялась во всех без исключения пробах морской воды и не зависела от дня эксперимента и погодных условий в период весеннего паводка.

Учитывая высокую корреляцию между данными портативного мутномера и концентрацией взвеси можно сделать вывод, что в данном районе можно выполнять преобразования и проводить пересчёт одних единиц в другие (НТУ в г/м^3), используя приведённую выше формулу. Главным преимуществом является возможность не проводить трудоёмких работ по определению весовой мутности, а использовать только оптические датчики мутности.

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.

Поскольку речной плум является высокодинамичной субмезомасштабной структурой, его форма и границы могут смещаться/видоизменяться в течение нескольких часов. В качестве примера на Рисунке 8 приведено изменение положения восточной границы плюма 26 апреля 2019 г. с течением времени. Было получено, что скорость смещения границы плюма менялась в пределах от 0,05 до 0,13 м/с, что очень важно учитывать при сравнении данных контактных и спутниковых измерений.



Рисунок 8 — Положение 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), наложенное на изображение MSI Sentinel-2B, полученное в тот же день в 08:27 UTC

Подводя общие итоги сравнения полученных количественных данных натурных измерений с данными дистанционного зондирования можно сделать вывод, что для значений, снятых на станциях по времени квазисинхронно с пролётом космического аппарата и заведомо находящихся внутри речного плюма (исключая влияние быстро-динамического сдвига границы плюма), была получена высокая корреляционная связь ($R^2 = 0,98$). Тем самым была подтверждена возможность использования стандартного алгоритма C2RCC (*англ.* Case-2 Regional CoastColour) для восстановления поля мутности в районе р. Мзымты при условии небольшой концентрации взвешенного вещества (от 10 до 50 г/м³).

В разделе 4.4 представлены результаты корреляционного анализа концентрации взвешенного вещества и мутности морской воды по данным контактных натурных измерений и данным дистанционного зондирования с использованием различных спутниковых алгоритмов: C2RCC (Doerffer, Schiller, 2007), Nechad 2009, Nechad 2015 (Nechad et al., 2015), Dogliotti (Dogliotti et al., 2015).

На основе анализа данных 2019 г. было получено, что результаты C2RCC лучше всего согласуются с данными натурных измерений концентрации взвешенного вещества (в г/м³). Прямая линия аппроксимации для C2RCC проходит через начало координат, коэффициент детерминации $R^2 = 0,98$ (Рисунок 9а). Для двух других алгоритмов, Nechad 2009 и Nechad 2015, коэффициенты детерминации составляют 0,94.

При сравнении данных мутности морской воды было выявлено, что для небольших значений мутности применимы алгоритмы Nechad 2009 и Nechad 2015. Коэффициент

детерминации $R^2 = 0,96$ в обоих случаях. А для более мутных вод (при НТУ ≥ 100), результаты анализа данных показали, что целесообразнее использовать алгоритм Dogliotti.

В следующих подразделах представлены результаты исследования массы и минерального состава взвешенного вещества в приустьевой области, находящейся под влиянием стока р. Мзымты; приведены результаты рентгенофазового анализа минерального состава взвеси. Концентрация взвешенного вещества в пробах воды, отобранных за весь период исследования в 2019 г., изменялась от 2 до 106 г/м³. Минимальные значения содержания взвеси в пределах плюма (на его границах) за всё время исследований составили примерно 2–3 г/м³.

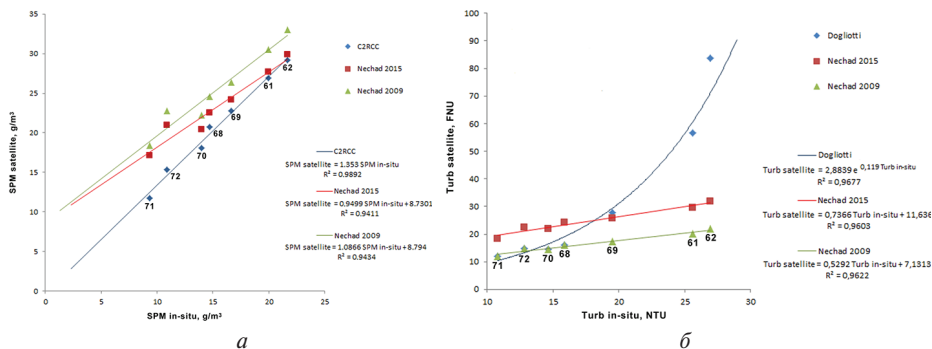


Рисунок 9 — Сравнительный анализ применимости различных спутниковых алгоритмов с результатами натурных измерений, полученных в 2019 г.: *а* — концентрация взвешенного вещества (*англ.* suspended particulate matter — SPM), рассчитанная по спутниковым данным и измеренная *in situ*; *б* — значения мутности морской воды, полученные дистанционным зондированием (Turb satellite) и мутность морской воды, измеренная портативным мутномером *in situ* (Turb in-situ). Номера станций указаны рядом с точками (Nazirova et al., 2021)

Исследование изменения минерального состава взвешенного вещества в зависимости от мутности воды в плюме показало, что пробы с большими значениями мутности, свойственные в основном приустьевым зонам, характеризуются большим количеством кварца и полевых шпатов. Например, в пробах из приустьевой зоны от 1 мая 2019 г. отмечается относительно высокая мутность (до 68 НТУ) и преобладание кварца и полевых шпатов над суммарным количеством глинистых минералов (Рисунок 10). При удалении от устья реки уменьшается количество взвеси в воде и меняется её относительный минеральный состав. Происходит увеличение количества глинистых минералов и уменьшение содержания кварца и полевых шпатов. 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. Глинистые минералы имеют низкую твёрдость и низкую плотность, проще поддаются механическому выветриванию и формируют более мелкообломочный материал, способный переноситься на большие расстояния. Для кварца и полевых шпатов характерна более высокая твёрдость и плотность, поэтому при механическом разрушении из них образуется преимущественно более грубообломочный материал, который в большей степени откладывается в непосредственной близости к устью.

Получена корреляционная зависимость между массой взвешенного вещества и её мутностью, характерная для данного региона и применимая для периода весеннего половодья: $НТУ = 1,197C$, где C — концентрация взвеси в пробах (в г/м³); НТУ — мутность воды в пробе.

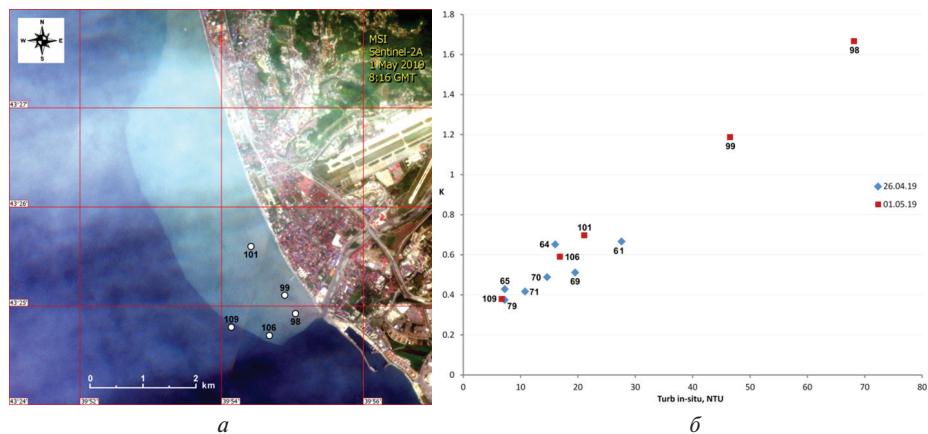


Рисунок 10 — Фрагмент спутникового изображения Sentinel-2A MSI от 1 мая 2019 г. (а). Метки указывают расположение станций, где были взяты пробы для рентгенофазового анализа. Отношение процентного содержания кварца в сухом веществе суспензии к процентному содержанию глинистых минералов (K) в зависимости от мутности, измеренной портативным мутномером (Turb in-situ, NTU) (б). Номера станций указаны рядом с метками. Расположение станций 26 апреля (синие метки) показано на Рисунке 8

Глава 5 посвящена результатам исследования плюмов рек Терек и Сулак на основе спутниковых данных и натурных измерений. В **разделе 5.1** приведено краткое описание основных физико-географических особенностей районов исследования в северо-западной части Каспийского моря. В **раздел 5.2** представлены результаты спутникового мониторинга приустьевых зон рек Терек и Сулак в период с 2014 по 2022 г. Всего было обработано и проанализировано 2373 спутниковых изображения высокого пространственного разрешения в оптическом диапазоне (MSI (*англ.* Multispectral Instrument) Sentinel-2A, -2B, OLI (*англ.* Operational Land Imager) Landsat-8 и OLI-2 Landsat-9). На основе анализа сводной карты границ плюмов (Рисунок 11) было определено, что 73 км береговой черты потенциально подвержены загрязнению, попадающему в море с водами рек Терек и Сулак. Максимальное удаление в границы плюма р. Терек (перпендикулярно берегу) составляет 12 км, для р. Сулак — 14 км.

Анализ индивидуальной площади плюмов показал, что средняя площадь плюма р. Терек составляла 12 км², максимальная площадь была выявлена 20 июня 2022 г., она составила 155 км². Для р. Сулак средняя площадь плюма составляла 9 км², максимальная площадь была выявлена 23 марта 2014 г., она составила 212 км². 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 плюмов, а именно юго-восточное.

Раздел 5.3 посвящён результатам натурных измерений в районе выносов рек Терек и Сулак. В разделе представлены графики вертикального распределения температуры, солёности, мутности и концентрации хлорофилла *a* на перпендикулярных и продольных разрезах, пересекающих плюмы рек Терек и Сулак, выполненные квазисинхронно со спутниковой съёмкой в 2023 г. (Рисунок 12). 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. 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 районов исследования при отсутствии натурных данных.

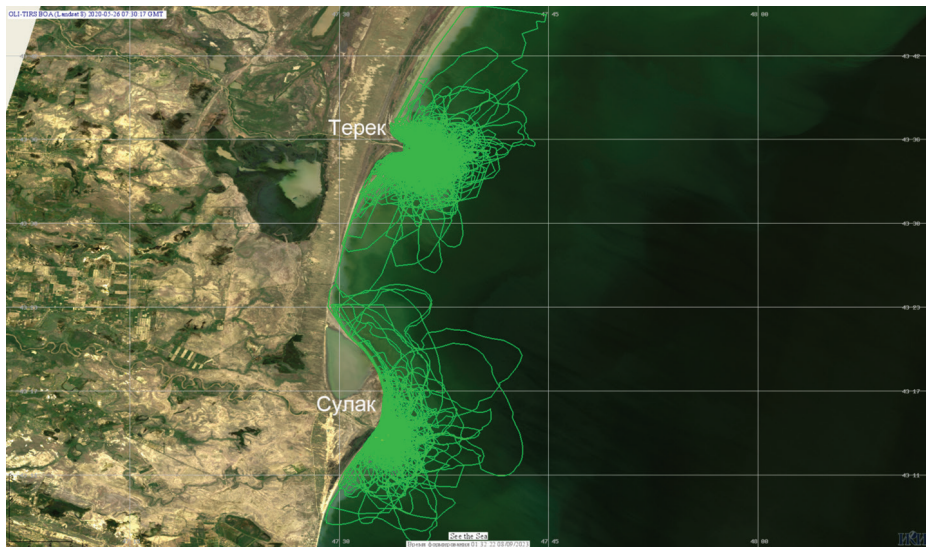


Рисунок 11 — Сводная карта границ плумов рек Терек и Сулак, выявленных по спутниковым данным видимого диапазона за 2014–2022 гг.

Раздел 5.4 посвящён определению полей мутности и концентрации взвешенного вещества в приустьевых зонах рек Терек и Сулак по спутниковым данным и измерениям *in situ*. В данном разделе продемонстрированы зависимости между мутностью морской воды и концентрацией взвеси, определённых по данным натурных измерений. Была получена линейная зависимость $y = 0,83x$; величина достоверности аппроксимации в этом случае $R^2 = 0,9$. Данное соотношение практически совпадает (расхождение в одной сотой доли) с таким же соотношением для р. Мзымты.

По аналогии с работой, которая была проведена для р. Мзымты (Чёрное море), в **подразделе 5.4.2** представлено сравнение измерений мутности воды по данным спутникового зондирования и подспутниковых измерений с целью верификации стандартных спутниковых алгоритмов. В **разделе 4.4** нами было показано, что выбор алгоритма напрямую зависит от мутности реки. Задача стояла подтвердить или опровергнуть эту теорию применительно к другим географическим объектам. В результате сравнительного анализа данных *in situ* и спутниковых данных для тестовых районов в Каспийском море была подтверждена возможность применимости алгоритма Dogliotti для восстановления мутности морской воды в приустьевых районах в диапазоне от 100 до 300 НТУ. При повторных численных экспериментах была подтверждена возможность применимости алгоритма Nechad при небольших максимальных значениях мутности 40–60 НТУ. В **разделе 5.4.3** представлены результаты рентгенофазового анализа отобранных проб воды на станциях зондирования в плумах рек Терек и Сулак. Приведена и описана классификация минеральных фаз отобранных образцов. Выделены три преобладающие группы: безводные силикаты и алюмосиликаты, глинистые минералы и карбонатные минералы.

Изменение минерального состава взвеси сопровождается значительным изменением мутности речных плумов. 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. Установлена связь между мутностью морской воды в плюме и минеральным составом взвеси. Предложено использование эмпирического коэффициента K , равного отношению массы безводных алюмосиликатных минералов к массе глинистых минералов. Установлено, что в выносе Терека среднее значение коэффициента $K = 0,72$. Ближе к устью оно увеличивается до 1,1. 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.

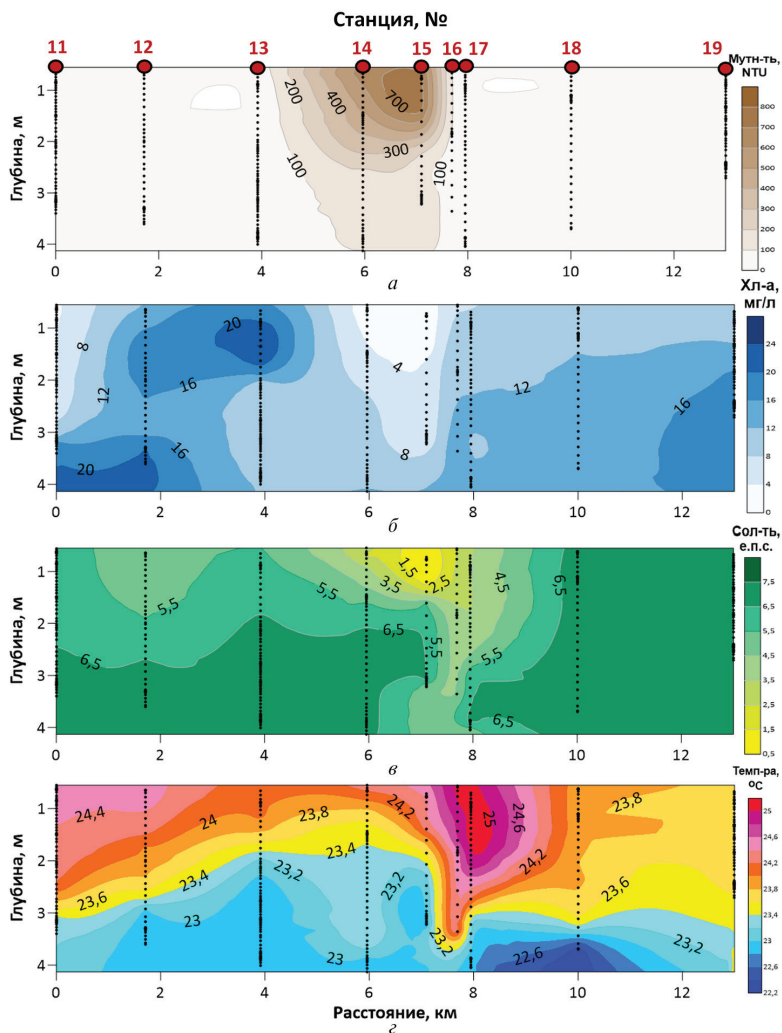


Рисунок 12 — Распределение мутности (а), концентрации хлорофилла *a* (б), солёности (в) и температуры (г) на станциях CTD-зондирования продольного разреза № 2 от 2 июня 2023 г. Устье р. Терек расположено напротив станции № 15

В Заключение приведены основные результаты диссертационной работы:

1. В результате многолетнего спутникового мониторинга выноса вод из Калининградского залива в Гданьский залив в период с января 2014 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 (13.08.2020). 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 ветры со средней скоростью 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 единицы 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 р. Мзымты на спутниковых изображениях достаточно тонкого (менее 1 м) подповерхностного слоя с небольшой мутностью (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. 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 исследуемом районе результаты применения алгоритма C2RCC и Nechad 2015 и лучше всего согласуются с данными натурных измерений. Для больших значений мутности вод плюма реки Мзымты (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 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 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 гидрослюдов и кальцита. Минеральный состав взвеси реки Мзымты преимущественно состоит из различных глинистых минералов (каолинит, монтмориллонит, хлорит, гидрослюды), кварца и полевых шпат. Установлена связь между мутностью 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 некоторое сходство между исследованным речным и лагунным плюмом, 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:

- 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.
- 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.
- 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 // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 5. С. 36–49. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019536-49>.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Назирова К. Р.**, Лаврова О. Ю., Алферьева Я. О., Князев Н. А. Пространственно-временная изменчивость плюмов 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.
- 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.
- 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>.
- Nazirova K.**, Alferyeva Y., Lavrova O., Shur Y., Soloviev D., Bocharova T., Storchkov 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). Article 143. <https://doi.org/10.3390/rs13010143>.

Статьи в рецензируемых сборниках научных трудов:

- 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>.

- 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.
- Lavrova O. Y., Krayushkin E. V., Nazirova K. R., Storchkov A. Y.* Vortex structures in the South-eastern 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.
- 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.
- Lavrova O. Yu., Nazirova K. R., Soloviev D. M., Alferyeva Y. O., Storchkov A. Ya., Bocharova T. Yu.* 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.
- 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.

По теме диссертации опубликовано также 10 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях.

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук
Назировой Ксении Равильевны