Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт водных проблем Российской академии наук

На правах рукописи



Прокопьева Кристина Николаевна

Трансформация стока воды и взвешенных наносов в дельте р. Лены в условиях изменяющегося климата

Специальность 1.6.16.

Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте водных проблем Российской академии наук.

Научный руководитель:	**Михайлова Мария Вадимовна** *кандидат географических наук*, ведущий научный сотрудник лаборатории динамики русловых потоков и ледотермики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Российской академии наук
Официальные оппоненты:	**Семилетов Игорь Петрович** *член-корреспондент РАН, доктор географических наук*, заведующий лабораторией арктических исследований, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук **Лебедева Людмила Сергеевна** *кандидат географических наук,* ведущий научный сотрудник лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова»

Защита диссертации состоится **12 ноября 2026 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета 24.1.040.01 (Д 002.040.01) при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте водных проблем Российской академии наук по адресу: 119333, Москва, улица Губкина, д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института водных проблем РАН и на официальном сайте: https://www.iwp.ru/about/dissertation-council/council-news/

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3, Институт водных проблем РАН, ученому секретарю диссертационного совета 24.1.040.01 (Д 002.040.01) и в электронном виде, email: dissertation_wpi@iwp.ru

Автореферат разослан 14 сентября 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук О.О. Рыбак

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Изменение климата в Арктике происходит с беспрецедентной скоростью и масштабом: за последние 40 лет темпы роста температуры воздуха в этом регионе в три раза превысили глобальные тренды [Rantanen et al., 2022; AMAP…, 2024]. Особенно чувствительны к климатическим изменениям устьевые области арктических рек [Overeem, Nienhuis, Piliouras, 2022] – переходные зоны между сушей и океаном. Повышение температуры воздуха, сокращение продолжительности ледяного покрова [Shabanov et al., 2024], изменение объемов речного стока и его внутригодового распределения [Магрицкий, Фролова, Василенко, 2025; Фролова и др., 2022], а также деградация многолетнемерзлых пород (ММП) [Streletskiy et al., 2025] оказывают существенное воздействие на гидрологические [Wang et al., 2021], морфологические [Piliouras, Lauzon, Rowland, 2021] и биогеохимические [McClelland et al., 2016] процессы в устьевых областях.

Дельта р. Лены – крупнейшая в России и Арктике – представляет собой уникальный объект, отличающийся особым геолого-геоморфологическим строением, историей формирования [Большиянов и др., 2013; Коротаев, 1991] и сложной русловой сетью, включающей более двух тысяч рукавов и проток. Ее образуют мощные аллювиальные отложения, а также многолетнемерзлые породы, включая крупные материковые обнажения Ледового комплекса, играющие важную роль в региональных углеродных циклах [Fuchs et al., 2020; Strauss et al., 2017]. Сегодня дельта Лены выполняет важную логистическую функцию, соединяя грузовые перевозки по Северному морскому пути и северный завоз по арктическим рекам Дальнего Востока; бóльшая ее часть объявлена особо охраняемой территорией с одним из самых больших заповедников в стране; здесь один из основных рыбопромысловых районов Республики Саха (Якутия).

Дельта Лены представляет собой зону трансформации потоков вещества и энергии, поступающих из речного бассейна в море Лаптевых и далее в Северный Ледовитый океан, что определяет ее значимость для изучения глобальных и региональных природных процессов и их реакции на климатические изменения. Река выносит значительные объемы пресной воды и взвешенных наносов, оказывая комплексное и не до конца изученное влияние на морские гидрометеорологические процессы. Изменения характеристик речного стока оказывают воздействие на формирование и таяние морского льда [Bareiss et al., 1999], циркуляцию водных масс в Северном Ледовитом океане [Peterson et al., 2002] и продуктивность [Holmes et al., 2012; Tank et al., 2012] арктических морей. Органическое вещество, поступающее из речного стока, участвует в глобальных биогеохимических циклах [Frey, McClelland, 2009; Tank et al., 2016]. Отсутствие полноценного понимания и математического описания процессов трансформации речного стока в устьях рек ограничивает комплексную оценку физических, химических и биологических процессов в арктических морях [Osadchiev et al., 2020].

Существующие глобальные оценки речного стока в Северный Ледовитый океан не всегда учитывают роль дельтовых рукавов в трансформации потоков вещества по пространству дельты,

особенно большой и сложной по своему строению: расчеты обычно осуществляют по данным замыкающих створов, часто расположенных выше на сотни километров от устьевого створа (место впадения рукавов и проток в море). Роль дельтовых областей как зон трансформации этих потоков комплексно в расчетах не рассматривалась. Кроме того, в последние десятилетия наземная сеть наблюдений в устьевых зонах Российской Арктики сократилась, как и программа работ на оставшихся постах (Кюсюр и полярная станция имени Ю.А. Хабарова), и не позволяет осуществлять регулярный мониторинг, а огромная площадь дельты Лены (>30 тыс. км²) делает проведение регулярных натурных наблюдений, особенно в фазы половодья, логистически и финансово затруднительными, что определяет необходимость применения дистанционных и модельных методов мониторинга.

В условиях отсутствия систематических количественных оценок трансформации стока воды и взвешенных наносов в многочисленных дельтовых рукавах и протоках дельты Лены применение данных дистанционного зондирования Земли открывает новые возможности для восполнения этого пробела, что и определяет необходимость настоящего исследования.

Степень разработанности темы. Комплексные исследования, посвященные изучению распределения стока воды и взвешенных наносов, охватывают большинство крупнейших дельт России и СНГ. В России они были начаты И.В. Самойловым, С.С. Байдиным, М.М. Роговым, В.Н. Михайловым, В.Ф. Полонским и др. Менее изученными остаются дельты арктических рек, исследования стока в которых основаны лишь на эпизодических и разовых измерениях или результатах моделирования, и то не во всех дельтах.

Существующие оценки материкового стока в Северный Ледовитый океан получены по измерениям в замыкающих створах рек [Магрицкий, 2010, 2000; Dittmar, Kattner, 2003; Gordeev, 2006], а не в устьевых створах непосредственного впадения дельтовых рукавов в море, или по результатам моделирования стока с водосбора [Feng et al., 2021; Shiklomanov et al., 2021]. Сведения о распределении речных вод по рукавам арктических дельт ограничены разовыми экспедиционными данными [Алабян и др., 1991; Бабич и др., 1983; Иванов, 1980; Иванов, Гиляров, 1972; Рудых, 2004] и результатами моделирования [Алабян и др., 1991; Пискун, 2002], главным образом для основных узлов разветвления [Магрицкий и др., 2020]. Сток взвешенных наносов в арктических дельтах исследовался на основе натурных измерений [Magritsky, 2015, 2020; Бабич и др., 1983; Кравцова, Инюшин, 2019; Лисицын, 1994; Разумихина, 1984; Шамов, 1949; Эстуарно-дельтовые системы.., 2007; Геоэкологическое состояние Арктического.., 2007; Атлас: морфодинамика устьевых.., 2017; Gordeev, 2000; Holmes et al., 2002; Ogneva et al., 2022; Syvitski, 2002; Syvitski, Kettner, 2011; Walker, 1998], моделирования [Dunn et al., 2019; Fassnacht, 1997; Hines, Piliouras, 2024; Ivanov, Piskun, 1999] и дистанционного зондирования [Doxaran et al., 2012; Hou et al., 2024; Tang et al., 2013], однако выводы носят противоречивый характер из-за эпизодичности данных.

Дельта р. Лены, с одной стороны, одна из наиболее изученных среди арктических дельт России. Здесь с середины XX в. проводились комплексные экспедиции [Коротаев и др., 1990;

Магрицкий и др., 2023; Большиянов и др., 2013; Тасаков, 1965; Антонов, 1967; Лопатин, Федоров, 1947; Boike et al., 2019a; Expedition to the Lena River in July/August 1994, 1995; Fedorova et al., 2015b; Ogneva et al., 2022; Rachold et al., 1996], а Тиксинской ЦГМС в 1977–2007 гг. выполнялись измерения расходов воды в истоках четырех главных рукавов и в Главном русле. С другой стороны, после 2007 г. режимные наблюдения прекращены, и около 97% водотоков в дельте как раньше, так и сейчас остаются не охваченными гидрологическими измерениями. Предпринятые попытки моделирования распределения стока между дельтовыми рукавами [Крылова, Антипова, 2018; Кузин, Лаптева, 2014] давали расхождения с натурными данными до двукратных значений.

По стоку взвешенных наносов доступны материалы экспедиционных исследований Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ), Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ), Тиксинской центральной гидрометеорологической станции (ЦГМС), Государственного гидрологического института (ГГИ) и Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ), а также комплексных работ в рамках российско-германских экспедиций [Большиянов и др., 2013; Гуков, 2001; Иванов, Пискун, Корабель, 1983; Коротаев и др., 1990; Лопатин, Федоров, 1947; Магрицкий и др., 2023; Тасаков, 1965; Федорова и др., 2009; Федорова и др., 2017; Чаркин и др., 2009; Alabyan et al., 1995; Ogneva et al., 2022; Rachold et al., 1996]. Многолетние мониторинговые измерения стока взвешенных наносов, проведенные лишь для Главного русла и истоков основных рукавов, прекращены в 2007 г. На основе всех имеющихся данных накоплено свыше 20 оценок годового стока наносов с диапазоном от 11,7 [Лопатин, Федоров, 1947] до 27,4 млн тонн в год [Водные пути бассейна.., 1995]; по данным г/п Кюсюр среднегодовой сток взвешенных наносов составляет 22,5 млн тонн (измерения прекращены в 2010 г.) [Magritsky et al., 2018]. Таким образом, изменение только между замыкающим створом и дельтой может достигать десятков процентов. Режим продольной трансформации стока взвешенных наносов в дельте в настоящее время охарактеризован на основе эпизодических измерений [Большиянов и др., 2013; Коротаев и др., 1990; Коротаев, 1991; Alabyan и др., 1995; Peregovich, Hoops, Rachold, 1999; Rachold et al., 2000; Widhalm et al., 2014] и по результатам одномерного моделирования [Hines, Piliouras, 2024].

В условиях увеличения среднегодовой температуры воздуха, деградации ММП [Boike et al., 2019a; Brown, Romanovsky, 2008; Romanovsky et al., 2010] и ослабления связности грунтов [Walvoord, Kurylyk, 2016] фиксируется интенсификация русловых деформаций в пределах русловой сети арктической зоны [Costard et al., 2007; Overeem, Nienhuis, Piliouras, 2022; Vesakoski et al., 2017], что было показано в том числе на локальных участках в дельте Лены [Fuchs et al., 2020]. Разрушение дельтовых берегов выступает дополнительным источником взвеси и органического углерода [Walvoord, Kurylyk, 2016]. По оценкам [Hou et al., 2024; Syvitski, 2002], сток наносов будет увеличиваться в среднем на 22% при увеличении температуры воздуха на каждые 2 °C. Однако количественная оценка таких изменений для участка «замыкающий створ – морской край дельты» не проводилась.

Цель работы – оценка пространственно-временной изменчивости стока воды и взвешенных наносов в дельте Лены в XXI в. в условиях современных гидроклиматических изменений на основе интеграции данных дистанционного зондирования Земли и экспедиционных результатов.

Для достижения поставленной цели в диссертационном исследовании решаются следующие **задачи:**

1) разработка и адаптация комплекса методов и алгоритмов определения характеристик речного стока и интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов в условиях дельтовой многорукавности на основе данных натурных измерений, эмпирических моделей, их интеграции со спутниковыми данными;

2) определение основных закономерностей пространственно-временного распределения стока воды по дельтовым рукавам, их количественное и математическое описание;

3) количественная оценка основных характеристик стока взвешенных наносов в условиях его трансформации в дельтовых рукавах; расчет суммарного выноса взвешенных наносов в море Лаптевых;

4) оценка вклада климатических изменений и местных (гидрометеорологических и криолитологических) факторов в трансформацию потоков вещества от вершины к морскому краю дельты;

5) выявление вклада плановых переформирований в массу поступающих в дельту наносов и определение роли дельты в развитии эрозионно-аккумулятивных процессов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанные методы дешифрирования спутниковых снимков обеспечивают приемлемую точность оценок распределения стока воды и взвешенных наносов в русловой сети дельты Лены в период открытой воды.

2. Функционирование русловой сети дельты Лены определяется двумя режимами: в половодье поперечные гидравлические связи обеспечивают перераспределение стока воды между секторами дельты, в меженный период их ослабление приводит к концентрации стока воды в восточной части дельты.

3. Сток взвешенных наносов в дельте Лены в современных условиях характеризуется положительным приростом от вершины к морскому краю дельты.

4. Разрушение дельтовых берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами, является основным источником поступления взвешенных наносов внутри дельты Лены.

Научная новизна исследования:

- Разработан комплекс новых региональных алгоритмов и зависимостей для дистанционной оценки распределения стока воды и концентрации взвешенных наносов в условиях многорукавной арктической дельты, реализованный в Google Earth Engine и создающий методическую основу для мониторинга арктических дельт в условиях сокращающейся наблюдательной сети.

- Впервые для всей русловой сети дельты р. Лены получены количественные оценки распределения стока воды и взвешенных наносов по более чем 2 000 водотоков при разных величинах водности реки.
- Впервые в пределах дельты р. Лены установлено систематическое продольное увеличение концентрации взвешенных наносов (0,5–2,0 млн т в год), обусловленное термическим разрушением берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами.
- Впервые на основе 60-летнего периода спутникового мониторинга количественно оценена интенсификация плановых переформирований дельтовых берегов и ее связь с деградацией многолетнемерзлых пород, а также определяющая роль русловых деформаций в пространственной трансформации стока взвешенных наносов и эрозионно-аккумулятивной функции дельты.
- Интеграция разработанных методов и алгоритмов позволила впервые получить инструментально обоснованную оценку суммарного стока взвешенных наносов р. Лены в море Лаптевых (16,1–17,7 млн т в год), существенно уточняющую все предшествующие расчеты, основанные на данных замыкающего створа г/п Кюсюр.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные оценки годового стока взвешенных наносов в море Лаптевых как ключевого элемента глобального гидрологического цикла и прогнозных климатических моделей Арктики существенно уточняют все существующие расчеты, основанные на данных замыкающего створа г/п Кюсюр, и могут быть использованы при изучении глобальных биогеохимических циклов углерода. Результаты диссертационного исследования позволяют повысить точность прогноза развития дельты, трансформации дельтовых экосистем в условиях изменения климата и будут иметь прикладное значение как для оценки устойчивости арктических берегов, так и для управления природными ресурсами и реализации международных экологических программ.

Анализ эрозионно-аккумулятивных процессов в дельтовых рукавах служит основой для поддержания условий речного судоходства и обеспечения устойчивости функционирования Северного морского пути. Определение морфодинамически активных зон и опасных участков отступания берегов необходимо для оценки угроз сокращения площади экологически значимых угодий на территории Усть-Ленского государственного природного заповедника и для традиционного природопользования коренных народов Севера. Полученные оценки трансформации речного стока и концентрации взвешенных наносов востребованы при анализе воздействия на водно-биологические ресурсы прибрежных и шельфовых экосистем моря Лаптевых. Разработанные дистанционные методы применимы к другим арктическим дельтам России, для большинства которых систематические наблюдения отсутствуют.

Данные и методы исследования. В исследовании применен широкий комплекс современных методологических подходов, включающий в себя полевые, лабораторные, статистические, геоинформационные, дистанционные и расчетные методы. Для применения перечисленных подходов использовались данные, собранные автором диссертации в рамках

экспедиций в дельту Лены в 2022 и 2024 гг., организованных кафедрами гидрологии суши и геохимии и географии почв, научно-исследовательской лабораторией эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ (в том числе измерения расходов воды акустическими доплеровскими профилографами течений ADCP, отбор проб воды, фильтрация проб воды для определения концентрации взвешенных наносов); данные об измерениях расходов воды и взвешенных наносов на постах Росгидромета и ArcticGRO (1934–2024 гг.) и на гидрометрических створах в дельте р. Лены, проводившихся Тиксинской ЦГМС (1977–2007 гг.); результаты мониторинга температуры ММП в скважине на о. Самойловский (2006–2021 гг.); базы данных спутниковых снимков Landsat 4-5, 7, 8, 9 (130 сцен, 2000–2024 гг.) и Sentinel-2 (150 сцен, 2017–2024 гг.), снимки KeyHole за 1964 г.; цифровая модель рельефа ArcticDEM и данные реанализа ERA5-Land.

Распределение стока воды рассчитано на основе графо-теоретического подхода (открытая библиотека языка Python – rivgraph). Региональные спутниковые модели определения концентрации взвешенных наносов разработаны после проведения атмосферной коррекции SIAC в Google Earth Engine (на языке программирования Java Script), где также проведена обработка всей базы данных спутниковых снимков. Оценка плановых переформирований выполнена методом ручной оцифровки (~23 600 км береговой линии) и обучаемой классификации в ArcGIS 10.8.

Статистический анализ проведен с применением критериев Спирмена, Манна – Уитни и Петтитта. Выполнялись систематизация и обобщение полученных результатов, получившие выражение в подготовке научных публикаций с изложением результатов исследования.

Степень достоверности. Адаптация дистанционных алгоритмов проводилась с учетом калибровки и верификации по натурным экспедиционным данным, в том числе собранным в дельте Лены в 2022 и 2024 гг. с помощью высокоточного современного оборудования, широко применяемого в мировой практике. Достоверность определялась путем сравнения с литературными данными, результатами российско-германских экспедиций и мониторинга Росгидромета, с учетом источников возможных ошибок.

Апробация результатов. Результаты работы были представлены в виде тезисов докладов и прошли апробацию на 12 российских и международных конференциях, соответствующих профилю исследований: 4th and 5th International Conference on the Status and Future of the World’s Large Rivers (Москва, 2021; Вена, 2023), 28th IUGG General Assembly (Берлин, 2023), Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен (Санкт-Петербург, 2023), 2nd International Mega-Delta Meeting (Шанхай, 2023), International Commission on Continental Erosion (ICCE) Symposium 2024 (Айхштетт, 2024), WASWAC 4th International Youth Forum on Soil and Water Conservation (Шеньян, 2024), VIII Всероссийский объединенный метеорологический и гидрологический съезд (Санкт-Петербург, 2024), Двадцать вторая и двадцать третья международные конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2024, 2025), XIV международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование

(MARESEDU-2025)» (Москва, 2025), XII Всероссийская конференция «Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России» (Санкт-Петербург, 2025).

Результаты работы представлены на научных семинарах НИЛ эрозии почв и русловых процессов МГУ (2023), Центра наук о Земле МФТИ (2025), на открытом семинаре ИВП РАН «Река vs Море #3» (2025), а также в рамках онлайн-воркшопа по применению дистанционного зондирования в исследованиях речных наносов школы молодых ученых, проводимой Международной гидрологической ассоциацией (IAHS) (2025).

Исследования, составившие содержание данной работы, получили финансовую поддержку в рамках проектов РНФ № 25-27-00599 «Закономерности трансформации стока воды, наносов и органического углерода в дельте реки Лена в условиях изменения климата» под руководством соискателя; а также № 21-17-00181 «Интегральная оценка баланса наносов речной системы р. Лена» и № 23-17-00065 «Русловые процессы на реках России: ретроспективный анализ, морфодинамика русла и прогнозные оценки их трансформации при гидроклиматических изменениях и антропогенных воздействиях», РГО № 02/2024-И «Современные гидрогеохимические потоки в дельте Лены: влияние климатических изменений и деградации вечной мерзлоты» и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2024-614 «Потоки потенциально токсичных элементов и соединений в речных бассейнах: технологии изучения, количественная оценка и прогноз».

Личный вклад автора. Автор принимала активное участие в сборе полевых данных, участвовала в организации и проведении экспедиций в дельту Лены в 2022 и 2024 гг. Автором выполнены разработка и адаптация подходов и алгоритмов, обработка натурных данных и баз спутниковых снимков, статистический анализ и интерпретация результатов. По каждому из крупных блоков используемых методик и обработки данных автором в коллективе соавторов опубликованы научные статьи в ведущих международных высокорейтинговых журналах, в том числе две статьи – в качестве первого автора. Результаты исследований представлены автором на российских и зарубежных конференциях.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 статей в рецензируемых научных изданиях, а также 18 тезисов докладов на международных и российских научных конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 170 страницах текста, содержит 66 рисунков и 32 таблицы. Список литературы насчитывает 214 наименований, из которых 140 – на иностранных языках.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность научному руководителю, в.н.с. Лаборатории динамики русловых потоков и ледотермики ИВП РАН, к.г.н. Марии Вадимовне Михайловой и доценту кафедры гидрологии суши МГУ, к.г.н. Дмитрию Владимировичу Магрицкому за всестороннюю помощь, поддержку, вдохновение и становление научных взглядов. Особая благодарность профессору кафедры гидрологии суши МГУ, д.г.н. С.Р. Чалову за привитый интерес к объекту исследования и предоставленную возможность сбора данных в экспедициях в дельту Лены. Автор также выражает благодарность за ценные консультации, помощь и содействие

в обработке данных к.г.н. О.Н. Ериной, д.ф.-м.н. А.А. Осадчиеву, д.г.н. Р.С. Чалову, Д.И. Школьному, к.г.н. А.М. Тарбеевой, к.г.н. А.А. Алабяну, к.г.н. В.О. Полянину и У.А. Коневой; а также сотрудникам, аспирантам, студентам и выпускникам кафедры гидрологии суши, сотрудникам НИЛ эрозии почв и русловых процессов МГУ и Центра наук о Земле МФТИ, а также всем участникам полевых исследований за вклад в работу и плодотворное сотрудничество. Автор благодарит коллектив Института водных проблем РАН за предоставленную возможность проведения диссертационного исследования в рамках обучения в аспирантуре и создание благоприятной научной атмосферы, поддержку и помощь на протяжении всего периода работы. Автор глубоко признательна своей семье и друзьям за всестороннюю поддержку и внимание.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика диссертационной работы, приведено обоснование актуальности темы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, описана методика решения поставленных задач, приведены основные положения, выносимые на защиту, обсуждена их научная новизна, достоверность, а также обоснована научная и практическая значимость диссертационной работы. Также во введении обозначен личный вклад автора в работу и приведен список работ автора, в которых опубликованы результаты исследования.

Глава 1. Географо-гидрологическая характеристика устьевой области р. Лены

В главе 1 описаны структура, природные особенности и гидрологический режим устьевой области р. Лены. На основе обобщения литературных, экспедиционных и мониторинговых данных охарактеризованы сток воды и его распределение по рукавам дельты, сток взвешенных наносов в замыкающем створе г/п Кюсюр и в истоках главных рукавов. Рассмотрены этапы формирования дельты в голоцене и ее геоморфологические характеристики. По данным реанализа ERA5-Land установлено, что дельта Лены является одним из наиболее быстро теплеющих регионов Арктики: скорость потепления за период открытой воды с 2000 по 2024 г. составила +1,62 °C/10 лет ($\rho = 0{,}72$, p-value $< 0{,}05$), что почти в четыре раза превышает глобальные темпы. Анализ данных термометрической скважины на о. Самойловский показал статистически значимый рост температуры ММП на всех горизонтах до глубины 26,75 м со скоростью 1,0–4,2 °C/10 лет за 2007–2020 гг.

Глава 2. Методы расчета распределения стока воды, стока взвешенных наносов и интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов по спутниковым снимкам

Глава посвящена разработке и адаптации комплекса алгоритмов обработки спутниковых снимков, объединяющего граф-теоретический подход к расчету распределения стока воды, дистанционные алгоритмы оценки концентрации взвешенных наносов и анализа плановых береговых переформирований на основе спутниковых данных.

В **разделе 2.1** разработан и адаптирован граф-теоретический подход RivGraph для расчета распределения стока воды по рукавам дельты Лены. Метод основан на представлении русловой сети в виде ориентированного ациклического графа, когда рукава дельты схематизируются как ребра, а узлы разветвления и слияния – как вершины. Входными данными служат бинарные маски водной поверхности, определенные по снимкам Landsat 8–9 для условий повышенных ($Q_{ВД}$ ~70 000 м³/с) и меженных расходов воды ($Q_{ВД}$ ~20 000 м³/с). Выбор этих гидрологических фаз обусловлен тем, что ~70 000 м^3/с – это среднемноголетний расход воды в июне (основном месяце прохождения половодья), рассчитанный за 1950–2007 гг. в створе «4.7 км выше о. Столб», а ~20 000 м^3/с – среднемноголетний меженный расход воды за август–октябрь. При помощи библиотеки Python RivGraph [Schwenk, Hariharan, 2021; Schwenk, Piliouras, Rowland, 2020] для каждого водотока автоматически рассчитывались его основные морфометрические характеристики: длина, ширина, извилистость, угол отделения. Узловое соотношение, определяющее распределение стока по водотокам, принималось пропорциональным отношению осредненных (по длине водотока) значений ширины смежных водотоков в степени 1,7, которая была уточнена по отношению к предлагаемой в [Руководство по расчету…, 1973] на основе 311 измерений расходов воды в ходе экспедиций 1981–2016 гг. Граничный расход на входе в дельту задавался по данным мониторинга на г/п Кюсюр (ArcticGRO) с учетом времени добегания до вершины дельты, оцениваемого примерно в два дня.

Верификация выполнена на независимом массиве данных, полученных в экспедициях 2022 и 2024 гг. при участии автора Разработанная модель показала высокую степень соответствия натурным данным: R^2 = 0,96, NSE = 0,95, MAPE = 25,8%, PBIAS = –12%. Для Трофимовской протоки выявлено систематическое занижение расчетных расходов, для остальных рукавов – систематическое завышение. Это обусловлено тем, что Трофимовская протока – морфологическое продолжение Главного русла Лены, и при выходе из «Ленской трубы» сток распределяется в этот рукав, тогда как пропорциональная схема узлового соотношения этого не учитывает. Следствием этого занижения является систематическое завышение расходов в остальных рукавах. Полученные показатели точности соответствуют мировым аналогам для многорукавных дельт (R^2 = 0,88–0,98 по [Dong et al., 2020]). Принципиальная новизна подхода состоит в том, что для дельты Лены впервые получены расходы воды в каждом из более чем 2000 водотоков дельты, тогда как данные мониторинговых и экспедиционных результатов охватывали лишь истоки четырех главных рукавов и небольшое количество узлов разветвления, то есть менее 3% русловой сети.

Установлено, что область применимости созданной RivGraph модели ограничена периодом открытой воды, верхними и средними участками рукавов, находящимися вне зоны подпора со стороны моря, сильного влияния приливов и нагонов. Модель также не учитывает рассредоточение стока по дельтовой пойме во время разливов в половодье, регулирующее влияние пойменных массивов и озер; предполагает пропорциональную связь площади поперечного сечения с шириной русла, что в условиях большой и сложной дельты Лены не всегда может сохраняться.

Раздел 2.2 описывает разработку региональных спутниковых алгоритмов оценки концентрации взвешенных наносов (*SSC*) в рукавах дельты Лены. Физической основой метода служит устойчивая связь между спектральной отражательной способностью водной поверхности в красном канале и концентрацией взвешенных веществ, которая для низких и средних концентраций (до 100–150 мг/л) близка к линейной. Для калибровки алгоритмов использованы данные отбора приповерхностных (глубина до 0,5 м) проб воды в ходе экспедиции 2022 г. в сочетании со снимками Sentinel-2 и Landsat-9 от 16 августа 2022 г. Предварительная обработка снимков включала радиометрическую калибровку и атмосферную коррекцию методом SIAC с переходом от значений отражения на верхней границе атмосферы к значениям на поверхности Земли.

Получены следующие зависимости для красного канала (ρ_{red}) снимков Sentinel-2 (1) и Landsat (2):

$$SSC = 1031{,}5\ \rho_{red} - 15{,}7 \text{ (Sentinel-2)} \quad (1)$$

$$SSC = 1512{,}0\ \rho_{red} - 25{,}0 \text{ (Landsat)} \quad (2)$$

Верификация на данных 2024 г. показала удовлетворительную точность модели на основе Landsat (R^2 = 0,70, MAPE = 34,5%, PBIAS = +10,8%) и несколько сниженную для Sentinel-2 (R^2 = 0,80, MAPE = 58%, PBIAS = +47,6%). Основной источник погрешности – временной лаг между отбором проб и датой спутниковой съемки на фоне роста расходов воды. Синхронные подспутниковые наблюдения дали минимальные ошибки: MAPE = 6,1% (Sentinel-2) и 2,8% (Landsat). Для расчета продольного (вдольруслового) изменения концентрации взвешенных наносов (ΔSSC, %) использована формула (3) относительного изменения концентрации между вершиной дельты ($SSC_{ВД}$, мг/л) и участками четырех магистральных рукавов ($SSC_{МР}$, мг/л):

$$\Delta SSC = {(SSC_{МР} - SSC_{ВД})}/{SSC_{ВД}} \quad (3)$$

Переход от поверхностной концентрации к средней по вертикали выполнялся по эмпирической зависимости [Иванов, 2022], основанной на 76 измерениях на семи крупных реках России. За период 2000–2024 гг. обработано 130 снимков Landsat и 150 снимков Sentinel-2, охватывающих диапазон расходов воды в вершине дельты от 10 900 до 106 000 м^3/с.

Раздел 2.3 представляет методику анализа плановых береговых переформирований на основе сопоставления спутниковых снимков: KeyHole программы «Corona» за 1964 г. с разрешением ~1 м, Landsat-7 за 2000 г. с разрешением 30 м и Sentinel-2 за 2024 г. с разрешением 10 м. Обработка проводилась двумя методами: ручной оцифровкой береговой линии (применялась для снимков KeyHole и Sentinel-2) и полуавтоматической обучаемой классификацией (для Landsat и Sentinel-2) в ArcMap 10.8. В ходе ручной оцифровки обработано более 800 островов аллювиально-морской террасы (выделены по [Большиянов и др., 2013]) в пределах дельты Лены. Суммарная длина оцифрованных берегов составила >23 600 км. Полуавтоматическая классификация реализована с применением метода максимального правдоподобия (Maximum Likelihood Classification) на основе обучающих выборок, включавших пять классов поверхностей. Площади горизонтальных деформаций за период 1964–2000 гг. получены вычитанием данных

автоматической классификации за 2000–2024 гг. из результатов ручной оцифровки за 1964–2024 гг. При этом показано, что автоматический метод систематически занижает площади разрушений вследствие пространственного разрешения и характера береговой границы, формируемой по краям пикселей размером 30 на 30 м (Landsat) и 10 на 10 м (Sentinel-2). Для расчета массы наносов, поступающих в результате береговых деформаций, использовались данные цифровых моделей рельефа ArcticDEM. Плотность отложений принята равной 270 кг/м³ с учетом содержания льда, растительных остатков и доли минеральной части, составляющей ~10% по данным [Fuchs et al., 2020]. Пространственный анализ выполнен на основе регулярной сетки 5 на 5 км, в пределах каждой ячейки которой суммировались площади разрушений и рассчитывались осредненные значения концентрации взвешенных наносов по спутниковым данным.

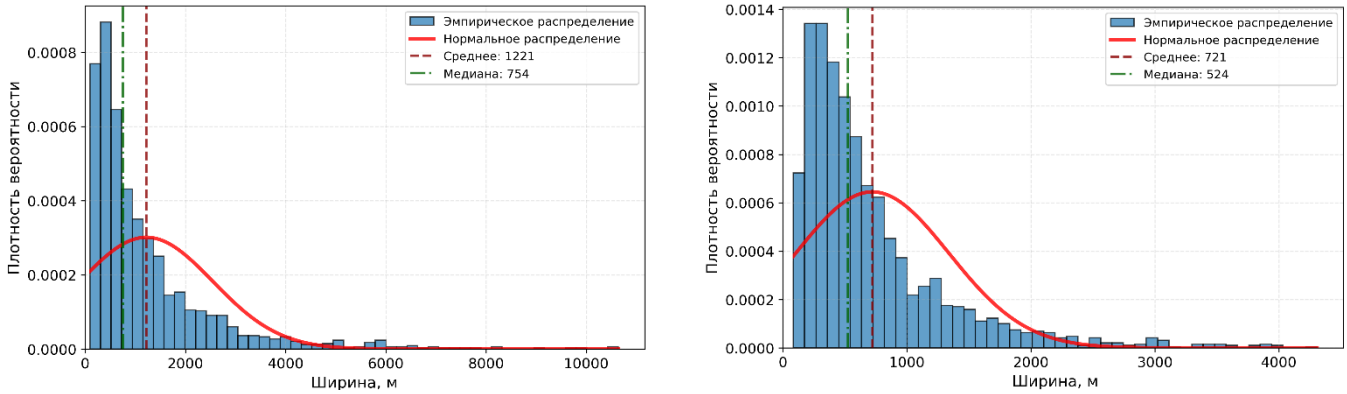
Глава 3. Закономерности распределения стока воды по рукавам дельты Лены

В разделе 3.1 впервые получены количественные оценки сезонной изменчивости морфометрических характеристик для большинства элементов русловой сети дельты Лены для условий летне-осенней межени (при $Q_{ВД}$ ~20 000 м³/с) и спада половодья (~70 000 м³/с). При переходе от половодья (площадь водной поверхности 7140 км², 1571 рукав) к межени (4300 км², 2045 рукавов) площадь водной поверхности сокращается на 40%, тогда как число водотоков и устьевых створов возрастает на 30 и 38% соответственно. Это объясняется тем, что в половодье значительная часть осередков и даже островов оказывается затоплена и не фиксируется при дешифрировании снимков как самостоятельные элементы сети. В межень, по мере падения уровней, они обнажаются и вновь выделяются в структуре русловой сети. Таким образом, наблюдаемый прирост числа элементов сети не отражает формирование новых водотоков, а демонстрирует то, что затопленные в половодье осередки и слившиеся протоки становятся дешифрируемы в межень. Коэффициент рекомбинации (отношение количества узлов слияния к узлам бифуркации) при этом изменяется незначительно (0,84–0,86), что свидетельствует о сохранении общей структуры сети: число узлов бифуркации и слияния растет пропорционально.

Условная густота русловой сети, под которой в настоящей работе понимается сумма длин водотоков на единицу водной поверхности, возрастает в межень на 50% (с 1,02 до 1,48 км/км2), увеличивается при сокращении водной поверхности, то есть сеть становится более густой на единицу площади. Связность сети (оценивается через среднюю степень узла – показатель, заимствованный из теории графов и характеризующий среднее число рукавов, сходящихся в одном узле сети) снижается лишь на 3,4% (с 2,95 до 2,85), что отражает разрыв гидравлических связей в малых протоках. Коэффициент трансформации (отношение густоты русловой сети в межень к густоте в половодье) составляет 1,45. Рост густоты (+50%) при минимальном снижении связности (–3,4%) указывает, что адаптация русловой системы к снижению водности идет преимущественно через усложнение внутренней структуры, в меньшей степени – за счет уменьшения связности (то есть связность между вершиной дельты и устьевыми створами при этом не нарушается). Рукава, обеспечивающие сток воды от вершины дельты к устьевым створам, в меженный период

сохраняются, тогда как перераспределение стока между ними происходит за счет усложнения внутренней структуры сети (увеличения числа узлов бифуркации и слияния).

Статистический анализ распределения ширины рукавов B_{mean} (согласно тесту Шапиро–Уилка при p-value < 0,001) выявил явное отличие от нормального (**рис. 1**). Для обоих сезонов характерна выраженная правосторонняя асимметрия (коэффициент асимметрии 2,15–2,74), то есть сеть дельтовых рукавов характеризируется подавляющим большинством относительно узких проток и ограниченным числом широких рукавов, формирующих длинный правый хвост распределения. Высокий эксцесс (5,79–10,2) подтверждает концентрацию рукавов вокруг медианных значений. Это позволяет количественно разграничить два морфометрически различимых класса элементов русловой сети: 1) многочисленные распределительные протоки малой ширины, 2) немногочисленные магистральные рукава, осуществляющие основной сток воды и взвешенных наносов. На основе характера распределения в качестве границы между двумя классами принято медианное значение ширины: в половодье – 754 м, в межень – 524 м.



(А) (Б)

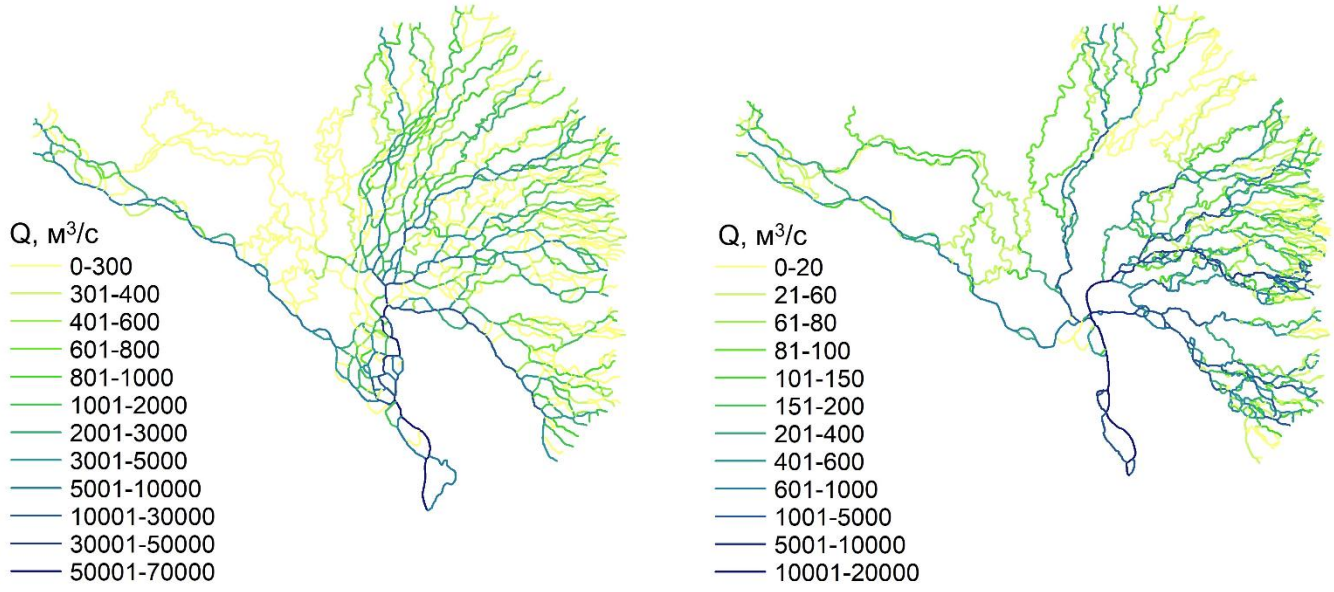
Рис. 1. Гистограммы распределения средней ширины (*B*mean) русел при $Q_{ВД}$ ~70 000 м³/с (А) и при ~20 000 м³/с (Б)

В **разделе 3.2** представлены результаты расчета распределения стока воды для двух гидрологических фаз.

В период спада половодья при $Q_{ВД}$ ~70 000 м³/с увеличение уровней воды и затопление осередков, отмелей и низкой поймы обеспечивают прохождение воды по всем четырем секторам, включая малые поперечные протоки. В привершинной части дельты сток делится между Главным руслом и Булкурской протокой, которая обеспечивает сток воды в Оленёкскую протоку (~13% стока в вершине дельты). В основном узле разветвления у о. Столб сток распределяется следующим образом: Быковская протока – 28%, Трофимовская – 50% (из которых на 25–30 км ниже истока 20% уходит в протоку Бурчах-Уэсэ, по 10% – в Сардахскую и в систему Большой и Малой Трофимовской проток), в сеть Туматских проток поступает ~9%. В период повышенной водности активизируются малые протоки, благодаря чему сток свободно перераспределяется между секторами (**рис. 2**).

В межень при $Q_{ВД}$ ~20 000 м³/с закономерности значительно меняются. Спад уровней воды приводит к резкой концентрации стока в восточном направлении. Роль западного (Оленёкского) и северного (Туматского) секторов снижается. Несмотря на кратное деление потока в ходе развития

осередковых разветвлений, основной сток концентрируется в ограниченном числе наиболее глубоких и широких русел, что визуально выражается в более высоких значениях относительного расхода воды (*Qi*) в крупнейших протоках Трофимовской системы – это 60%, из которых ~34% распределяется в пользу Сардахской, ~16% – в пользу Большой и Малой Трофимовской. ~28% поступает в Быковскую протоку. Значительно меньше стока уходит в Туматский (~8%, из которых ~1,3% распределяется в Арынскую) и Оленёкский (~4%) сектора.



(А) (Б)

Рис. 2. Расходы воды (*Q*) в рукавах дельты Лены в период спада половодья при $Q_{ВД}$ ~70 000 м³/с (А) и при ~20 000 м³/с (Б)

Устойчивость выявленных закономерностей подтверждена натурными измерениями 2022 и 2024 гг. и сопоставлением с литературными данными: распределение стока между главными секторами остается стабильным при сопоставимых расходах воды в вершине дельты, а внутрисекторные перестройки на уровне отдельных узлов разветвления за счет развития русловых переформирований не приводят к значимому изменению долей стока между истоками главных рукавов.

Таким образом, функционирование русловой сети дельты р. Лены определяется двумя устойчивыми режимами: 1) в многоводную фазу повышение уровней воды приводит к активизации поперечных гидравлических связей, что обеспечивает перераспределение стока между секторами дельты, за счет чего доли стока на устьевых створах существенно отличаются от долей в истоках рукавов; 2) в меженную фазу падение уровней воды приводит к ослаблению поперечных связей, из-за чего до 88% суммарного стока концентрируется в ограниченном количестве магистральных рукавов восточной части дельты – в Трофимовской и Быковской протоках. Установленные закономерности распределения водного стока являются ключевыми особенностями гидродинамики речного потока в дельте Лены, формирующимися в условиях сложной сезонной изменчивости

водности и ледовых явлений. Полученные оценки, установленные впервые для всей русловой сети дельты, служат основой для расчета стока взвешенных наносов в главе 4.

Глава 4. Трансформация стока взвешенных наносов в дельтовых рукавах и количественная оценка его притока в море Лаптевых

В **разделе 4.1** на основе обработки 130 снимков Landsat (2000–2024 гг.) и 150 снимков Sentinel-2 (2017–2024 гг.) проведен систематический анализ продольного изменения концентрации взвешенных наносов (ΔSSC, %) от вершины дельты до участков среднего течения (для исключения влияния колебаний со стороны моря) магистральных рукавов. Диапазон изменений ΔSSC составил от –88 до +172%, что свидетельствует о высокой изменчивости эрозионно-аккумулятивных процессов в дельте, определяющих как продольное увеличение ($\Delta SSC > 0$), так и уменьшение ($\Delta SSC < 0$) концентрации взвешенных наносов (**рис. 3**).

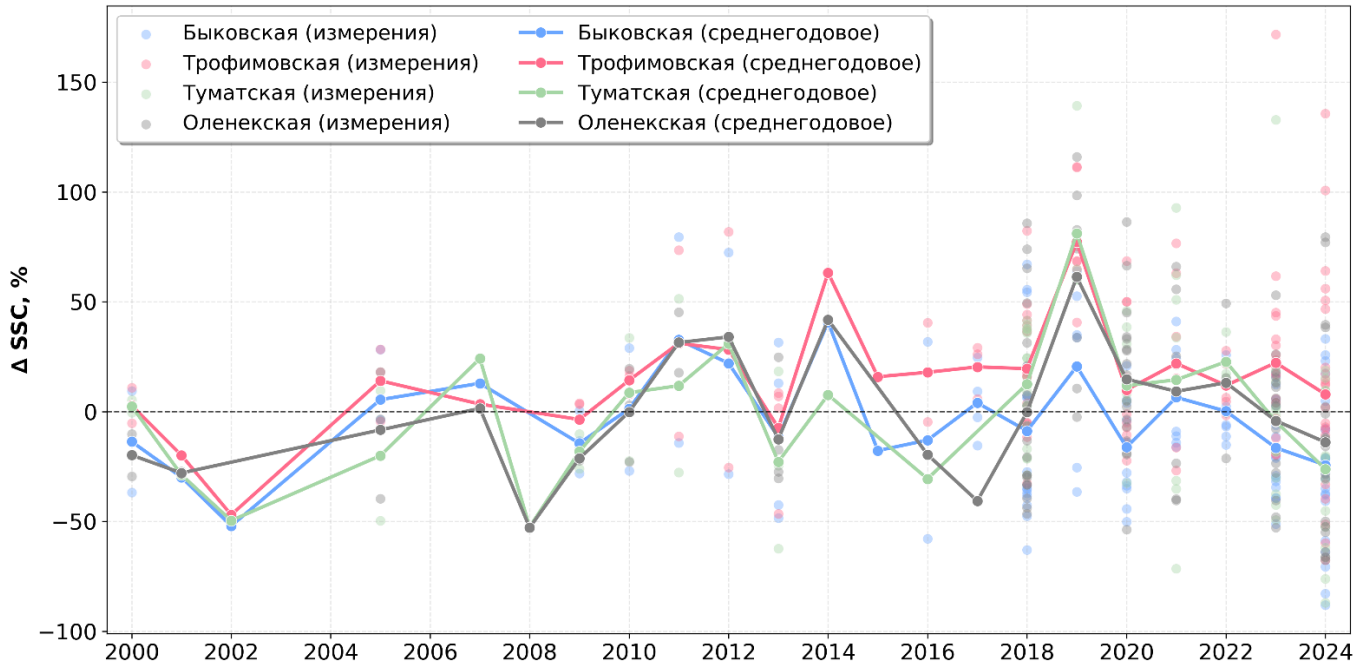


Рис. 3. Многолетние колебания относительного изменения концентрации взвешенных наносов (ΔSSC, %) по протокам

Установлены различия в характере трансформации стока взвешенных наносов между рукавами. Трофимовская протока – крупнейший по водности рукав – отличается устойчивым преобладанием продольного увеличения концентрации взвешенных наносов: по данным Landsat, в 59% случаев фиксируются положительные значения ΔSSC при среднем значении +13,4%, по данным Sentinel – 72% случаев при среднем +20,7%. Для этого рукава также выявлен статистически значимый положительный многолетний тренд увеличения значений ΔSSC (коэффициент Спирмена $\rho = +0{,}464$, p-value = 0,034), свидетельствующий о достоверном нарастании интенсивности поступления взвешенных наносов в рукав за 2000–2024 гг. Быковская протока, напротив, характеризуется устойчивым преобладанием отрицательных значений (в 67% случаев по Landsat, среднее –13,3%) и отсутствием значимого тренда ($\rho = +0{,}012$). Для Туматской и Оленёкской проток

также характерна высокая межгодовая и внутрисезонная изменчивость, тренды статистически незначимы.

Анализ зависимости Δ*SSC* от расхода воды в вершине дельты ($Q_{ВД}$) показал, что в периоды больших расходов ($Q_{ВД}$ > 75 000 м³/с) продольное увеличение концентрации взвешенных наносов фиксируется во всех четырех рукавах (+17,8% в Быковской, +26,7% в Трофимовской, +17,4% в Туматской, +40,4% в Оленёкской). Такая особенность связана с тем, что мощный поток вовлекает в транспорт отложения, накопленные у подножия берегов в предыдущий период открытой воды. При переходе к меженным условиям ($Q_{ВД}$ < 25 000 м³/с) для Быковской протоки характерны случаи продольного уменьшения концентрации взвешенных наносов (Δ*SSC* = –14,0%), тогда как в Трофимовской сохраняются положительные значения (+18,1%) вне зависимости от расхода воды (**рис. 4**). При этом контрастное сопоставление маловодных 2019 и 2024 гг. – при схожих расходах воды Δ*SSC* во всех рукавах значительно различались – это наглядно демонстрирует, что в меженный период режим трансформации стока взвешенных наносов определяется не расходом воды, а иными факторами, рассмотренными в главе 5.

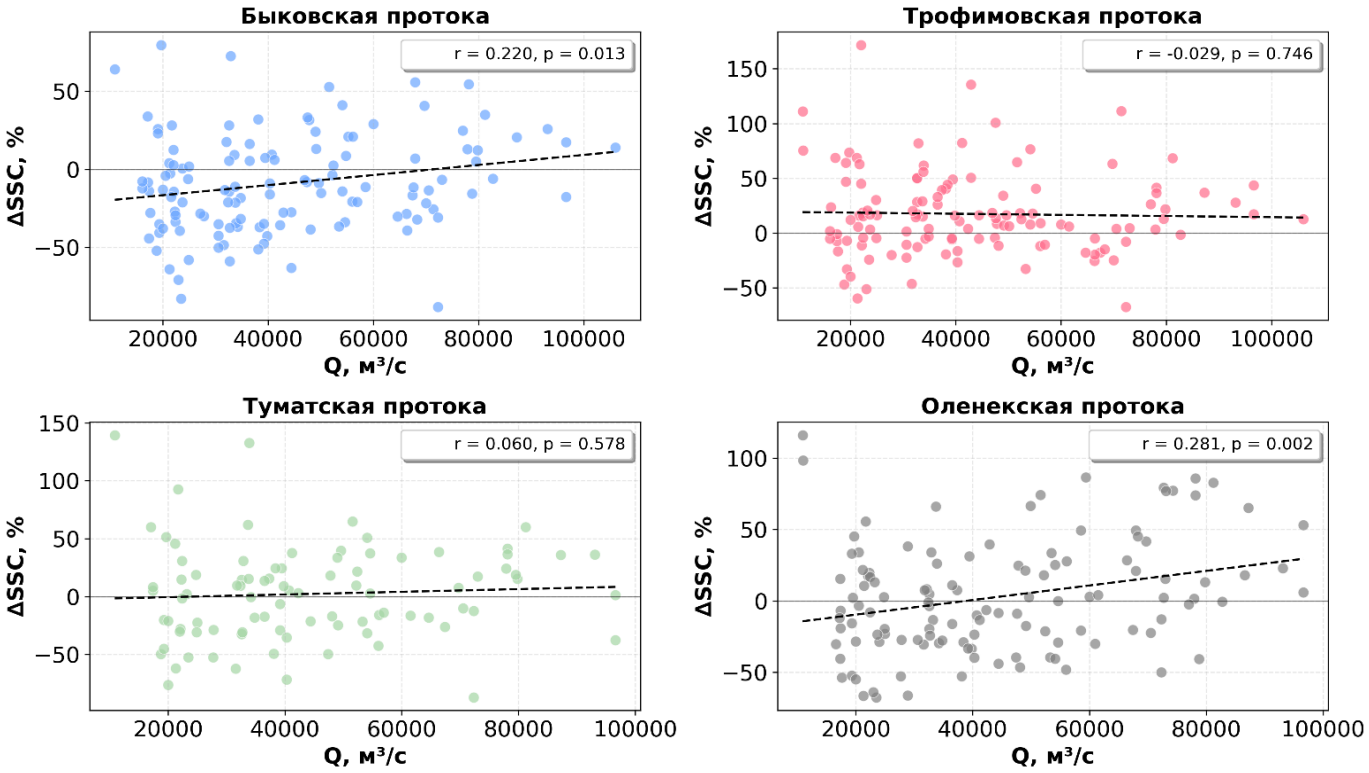


Рис. 4. Распределение продольных изменений концентрации взвешенных наносов (Δ*SSC*, %) в зависимости от расходов воды ($Q_{ВД}$, м³/с) по рукавам дельты

Сопоставление с дельтами Южной Сибири (Селенга, Верхняя Ангара), для которых автором проводилось аналогичное исследование, выявило отличия в режиме трансформации взвешенных наносов. В южных дельтах в периоды высоких расходов воды доминируют процессы аккумуляции: мощный поток затопляет пойму, представленную прибрежными зарослями макрофитов и пойменными озерами, что приводит к снижению транспортирующей способности потока и аккумуляции взвеси на пойме. В арктических дельтах Лены и Колымы картина противоположная.

Повышение расходов воды приводит к продольному увеличению концентрации взвешенных наносов, тогда как при низких водах возможны как продольное увеличение, так и уменьшение – в зависимости от термических условий и других факторов.

В **разделе 4.2** выполнена количественная оценка суммарного стока взвешенных наносов в море Лаптевых с учетом внутридельтовой трансформации по систематическим спутниковым данным. Среднемноголетний расход взвешенных наносов в вершине дельты составляет 1665 кг/с, а годовой сток – 15,7 млн т в год (из них 14,9 млн т приходится на период открытой воды июнь–сентябрь). Сравнение с данными наземных измерений Тиксинского УГМС за исследуемый сезон показало среднее расхождение в 9,5%. Полученное расхождение обусловлено взаимной компенсацией двух факторов: систематическим недоучетом стока в июне из-за невозможности дешифрирования снимков в период ледохода (основной сток взвешенных наносов приходится на пик половодья) и завышением относительно точечных наземных измерений в августе–сентябре, не всегда репрезентативных для всего живого сечения в условиях низких уровней воды.

С учетом выявленных закономерностей трансформации рассчитан годовой сток взвешенных наносов в море Лаптевых по трем сценариям: +3,2% (только по снимкам Landsat за 2000–2024 гг.); +9,0% (совместная база Landsat и Sentinel, наиболее репрезентативная оценка); +13,5% (только по снимкам Sentinel за 2017–2024 гг.). Сток взвешенных наносов в море Лаптевых составляет 16,1–17,7 млн т в год, а величина трансформации внутри дельты оценивается в 0,5–2,0 млн т в год.

Установлено, что распределение стока взвешенных наносов между рукавами соответствует распределению водного стока (**таблица 1**): Трофимовская протока переносит 60,7% суммарного потока взвешенных наносов при 61% водного стока, Быковская – 24,7% при 26%, Туматская – 7,1% при 6%, Оленёкская – 7,5% при 7%. Близость этих соотношений указывает на то, что абсолютная масса переносимых взвешенных наносов определяется прежде всего водностью рукава, тогда как продольная трансформация концентрации взвешенных наносов вдоль рукавов – иными факторами, рассмотренными в главе 5.

Таким образом, реальный годовой приток взвешенных наносов р. Лены в море Лаптевых превышает все существующие оценки, основанные на данных г/п Кюсюр, на 0,5–2,0 млн т в год за счет эрозионно-аккумулятивных процессов внутри дельты, не фиксируемых в замыкающих створах. Для корректного расчета этой величины необходим учет трансформации речного стока непосредственно в дельте, что впервые реализовано в настоящей работе.

Таблица 1. Средние расходы и годовой сток взвешенных наносов по главным рукавам дельты Лены

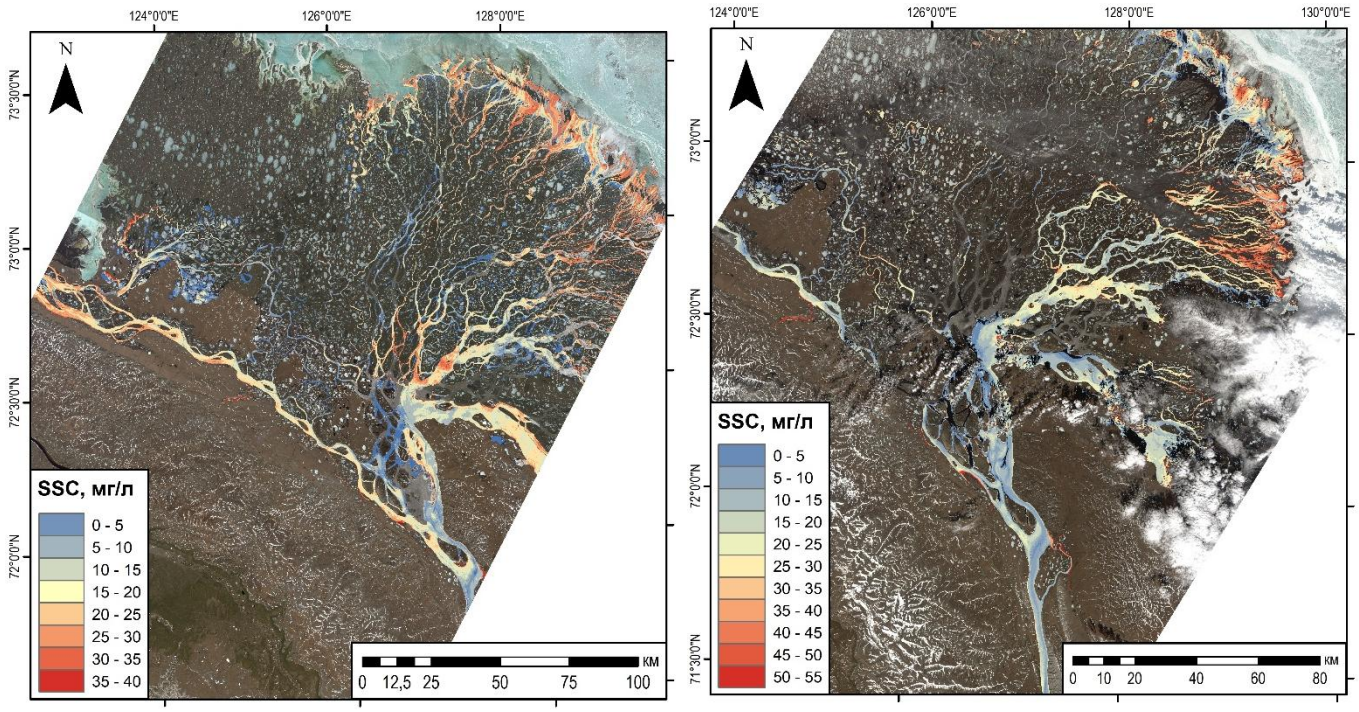
Рукав	R, кг/с	W_R, млн т за июнь–сентябрь	W_R, млн т в год	Доля в стоке наносов, %	Доля в стоке воды, %
Быковская	425	4,48	4,72	24,7	26
Трофимовская	1043	11,0	11,6	60,7	61
Туматская	122	1,29	1,36	7,1	6
Оленёкская	128	1,35	1,42	7,5	7
Сумма по рукавам	1718	18,11	19,1	100	100
Вершина дельты	1665	17,6	18,5		

Глава 5. Анализ факторов трансформации стока взвешенных наносов

В разделе 5.1 для оценки влияния метеорологических факторов на трансформацию стока взвешенных наносов использованы данные реанализа ERA5-Land (температура воздуха, осадки, солнечная радиация, скорость ветра) и данные о температуре ММП по скважине о. Самойловский. Рассчитаны коэффициенты корреляции между Δ*SSC* и метеорологическими параметрами (суточными и осредненными за 3, 5 и 7 суток) по каждому из четырех рукавов. Статистическая значимость оценивалась по *t*-критерию Стьюдента (α = 5%).

При анализе всей выборки наиболее высокая корреляция выявлена между Δ*SSC* в Оленёкской протоке и суточным количеством осадков (*r* = 0,77): выпадение интенсивных осадков формирует гиперконцентрированные мутьевые потоки с термоэрозионных оврагов и водосбора дельты, которые локально увеличивают концентрацию взвешенных наносов в рукавах. Для Оленёкской протоки также установлена средняя степень связи с температурой ММП на глубине 0,75 м (*r* до 0,57): повышение температуры мерзлоты активизирует процессы термоденудации и формирование концентрированных взвесью потоков, а солнечная радиация усиливает этот эффект (*r* до 0,66 при Δ*SSC* > 0). В Туматской протоке определяющим фактором является скорость ветра (*r* до 0,59): волновое воздействие приводит к взмучиванию донных отложений в центральной части дельты на широких участках рассредоточения стока, что обеспечивает продольное увеличение концентрации взвешенных наносов. При скоростях ветра выше 6 м/с зафиксированы экстремальные значения Δ*SSC*: до 51% (11.08.2011) и 42% (10.06.2018). Аналогичный эффект наблюдается в Быковской протоке, где на участках шириной до 8 км скорость ветра коррелирует с величинами Δ*SSC* при *r* до 0,48.

При разбивке выборки по уровню водности установлено, что при увеличении расходов $Q_{ВД}$ > 37 500 м³/с преобладающими факторами являются расход воды (*r* до 0,58 для Туматской и Оленёкской) и солнечная радиация (*r* до 0,47 для Быковской) (**рис. 5**). В меженный период (при $Q_{ВД}$ < 37 500 м³/с) роль водности резко снижается, и на первый план выходят ветровой режим (*r* = 0,76 в Туматской протоке) и температура воздуха и ММП (*r* = 0,64 в Оленёкской). Принципиально иная картина характерна для Трофимовской протоки: коэффициенты корреляции с большинством метеорологических факторов остаются низкими при любых условиях водности, что свидетельствует о том, что трансформация стока взвешенных наносов в крупнейшем рукаве определяется не краткосрочными метеорологическими условиями, а распределением большей части стока в этот рукав, морфологией русла и активностью русловых переформирований, рассмотренных в разделе 5.2. Данные факторы определяют статистически значимый нарастающий многолетний тренд Δ*SSC* в Трофимовской протоке при отсутствии столь же выраженных трендов в остальных рукавах.



(А) (Б)

Рис. 5. Карты пространственной изменчивости *SSC* от 10 июня 2018 г. при $Q_{ВД}$ = 78 100 м^3/с ($\Delta SSC_{Трофимовская}$ = 41,5%, $\Delta SSC_{Быковская}$ = 67,1%, $\Delta SSC_{Туматская}$ = 41,5%, $\Delta SSC_{Оленёкская}$ = 73,9%) (А) и 8 июня 2014 г. при $Q_{ВД}$ = 69 700 м^3/с ($\Delta SSC_{Трофимовская}$ = 62,3%, $\Delta SSC_{Быковская}$ = 40,7%, $\Delta SSC_{Туматская}$ = 7,63%, $\Delta SSC_{Оленёкская}$ = 41,8%) (Б)

В **разделе 5.2** проведен комплексный анализ вклада русловых переформирований в трансформацию стока взвешенных наносов. По результатам ручной оцифровки снимков KeyHole (1964) и Sentinel-2 (2024) общая площадь разрушений берегов аллювиально-морской террасы за 60 лет составила 87,3 км² при средней скорости 0,68 м/год. Наибольшая активность зафиксирована в Трофимовском секторе, где разрушениям подверглось 49,6 км² островов (57% суммарной площади), средняя скорость составляет 0,88 м/год, а максимальная достигает 15 м/год на о. Собо-Сисё. По данным обучаемой классификации снимков Landsat и Sentinel за 2000–2024 гг. общая площадь разрушений составила 48,8 км² при средней скорости 1,49 м/год.

Сравнение периодов 1964–2000 и 2000–2024 гг. на 50 ключевых участках показало ускорение темпов береговых переформирований на 66% (с 1,56 до 2,57 м/год) (таблица 2). Для объяснения этого ускорения проверена гипотеза о связи интенсивности разрушений с возрастом аллювиально-морских аккумулятивных отложений [Большиянов и др., 2013]. Сопоставление со скоростями отступания в пределах различных геоморфологических выделов не выявило монотонной зависимости: наименьшие скорости характерны для островов возрастом 8000 лет (0,39 м/год), наибольшие среди аллювиально-морских аккумулятивных форм – для островов возрастом 6000–4000 лет (1,04 м/год). Возраст отложений и естественная эволюция дельты не являются определяющими факторами наблюдаемых закономерностей.

Таблица 2. Сравнение характеристик плановых переформирований за периоды 1964–2000 (1) и 2000–2024 гг. (2)

Участки (количество)	Период	Площадь разрушений, км^2	Длина эрозионных берегов, км	Средняя скорость, м/год	Изменение средней скорости за периоды 1 и 2, %	Средняя максимальная скорость, м/год	Изменение средней максимальной скорости за периоды 1 и 2, %
Трофимовская протока (19)	1	4,54	64	1,83	+66	4,21	+56
	2	5,32	74	3,03		6,58	
Туматская протока (13)	1	1,01	28	0,96	+94	1,83	+83
	2	1,52	31	1,87		3,34	
Оленёкская протока (9)	1	1,98	40	1,38	+55	3,11	+32
	2	2,34	48	2,14		4,11	
Быковская протока (6)	1	0,47	14	0,99	+73	1,68	+92
	2	0,62	15	1,71		3,22	
Среднее по дельте	1	7,99	144	1,55	+66	3,02	+59
	2	9,81	168	2,57		4,78	

Наиболее высокие скорости зафиксированы на участках, сложенных Ледовым комплексом (в среднем 1,18 м/год, до 13,8 м/год на о. Собо-Сисё), что согласуется с механизмом термоэрозионного разрушения берегов в криолитозоне. Таким образом, выявленное ускорение переформирований, вероятнее всего, обусловлено деградацией ММП под влиянием роста температуры воздуха, что влияет на увеличение глубины сезонного протаивания и удлинение безледного периода. Наиболее значительное увеличение активности горизонтальных переформирований зафиксировано в Трофимовской протоке, где высокая транспортирующая способность потока создает оптимальные условия для совместного воздействия механической и термической эрозии берегов, что непосредственно обусловливает статистически значимый положительный тренд стока взвешенных наносов ($\rho = +0{,}464$, p-value = 0,034).

Пространственное совпадение зон активных береговых разрушений с участками повышенной концентрации взвешенных наносов подтверждено для Трофимовской протоки на основе данных снимка Landsat-8 от 27 августа 2020 г. (**рис. 6**). Выявленная связь описывается уравнением логарифмической регрессии ($r = 0{,}49$, $R^2 = 0{,}24$, p-value < 0,001, $n = 62$):

$$SSC = 2{,}14 \ln(S_{\text{разрушений}}) + 36{,}2 \quad (4)$$

Расчетная масса наносов, поступающих от береговых разрушений выше створов определения ΔSSC в рукавах, составляет 1,42 млн т в год за 2000–2024 гг., что соответствует диапазону прироста стока взвешенных наносов в пределах дельты (0,5–2,0 млн т в год), установленного в разделе 4.2. Вклад водотоков из термоэрозионных оврагов с островов, представленных выходами отложений Ледового комплекса, незначителен, и поступление с одного ручья увеличивает расход взвешенных наносов в Оленёкской протоке лишь на 0,1–0,3%. Таким образом, разрушение берегов, сложенных ММП, является основным механизмом формирования трансформации стока взвешенных наносов. Относительный вклад этой составляющей в суммарный сток (15,7–19,0 млн т в год) составляет от 3 до 13%.

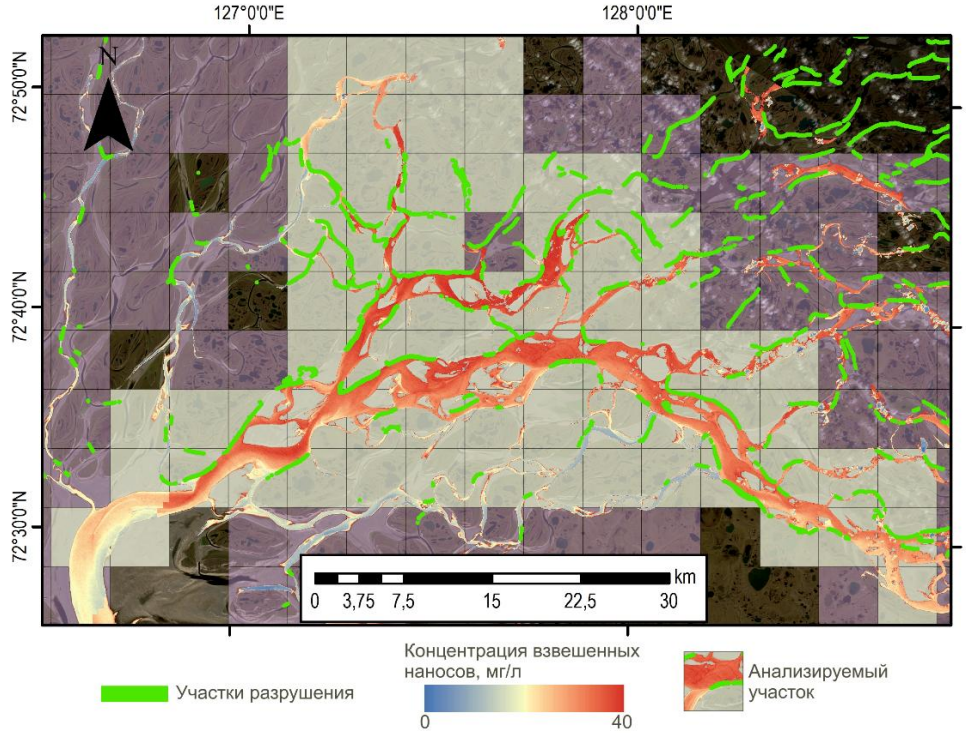


Рис. 6. Карта пространственной изменчивости концентрации взвешенных наносов и участков плановых переформирований вдоль Трофимовской протоки

В **заключении** сформулированы основные полученные результаты:

1. Разработан и верифицирован комплекс дистанционных методов для изучения гидрологического режима и русловых переформирований в арктических дельтах: граф-теоретический подход RivGraph для расчета расходов воды по всей русловой сети, региональные спутниковые алгоритмы оценки концентрации взвешенных наносов для Sentinel-2 и Landsat, реализованные в Google Earth Engine, и методика количественной оценки плановых береговых переформирований на основе 60-летнего ряда спутниковых данных.

2. Впервые получена полная морфометрическая характеристика русловой сети дельты для двух контрастных фаз. На спаде половодья (площадь водной поверхности составляет 7 140 км², 1571 водоток) и при переходе к межени (4 300 км², 2045 водотоков) густота сети возрастает в 2,2 раза при незначительном снижении связности (–3,4%). Выявлено статистически значимое (асимметрия 2,15–2,74, эксцесс 5,79–10,2) правостороннее распределение ширины рукавов, что подтверждает сосуществование двух классов элементов сети: многочисленных узких распределительных проток и малочисленных широких магистральных рукавов, в которых концентрируется основной сток.

3. Установлено, что характер сезонной трансформации стока воды в дельте определяется двумя режимами. В половодье активизация поперечных гидравлических связей обеспечивает перераспределение стока между секторами дельты, вследствие чего доли стока на устьевых створах существенно отличаются от долей в истоке рукава (Трофимовская ~50%, Быковская ~28%, Оленёкская ~13%, Туматская ~9%). В межень поперечные связи ослабевают и в море из определенного сектора выносится именно тот объем стока, который поступил в исток его рукавов

(Трофимовская ~60%, Быковская ~28%, Туматская ~8%, Оленёкская ~4%). Установлено, что в межень до 88% суммарного стока сосредоточивается в восточных рукавах.

4. На основе 280 спутниковых снимков за 2000–2024 гг. впервые систематически охарактеризована трансформация стока взвешенных наносов в дельте. Распределение стока взвешенных наносов близко к распределению стока воды: Трофимовская – 60,7%, Быковская – 24,7%, Туматская и Оленёкская – по ~7%. Сток в вершине дельты оценен в 15,7 млн т в год, а реальный приток в море Лаптевых, принимая во внимание продольное изменение и распределение стока по рукавам с учетом внутридельтовой трансформации (+9,0%), составляет 17,0 млн т в год (по разным сценариям от 16,1 до 17,7 млн т в год). Таким образом, все существующие оценки, основанные на данных г/п Кюсюр, систематически занижают поступление взвешенных наносов в море Лаптевых на 0,5–2,0 млн т в год.

5. Установлены закономерности трансформации стока взвешенных наносов, принципиально отличающиеся от характерных для дельт умеренного пояса. В периоды высокой водности ($Q_{ВД}$ > 37 500 м³/с) во всех рукавах фиксируется рост концентрации из-за высокой транспортирующей способности потока и разрушения берегов. В летне-осеннюю межень доминируют метеорологические факторы: в Оленёкской – температура ММП (r до 0,57), в Туматской – скорость ветра (r до 0,76). Трофимовская протока выделяется отсутствием значимых корреляций с краткосрочными метеорологическими факторами при любых условиях водности, что свидетельствует об определяющей роли плановых переформирований. В отличие от дельт других регионов (Селенга, Верхняя Ангара), где высокие расходы воды определяют пойменную аккумуляцию, в арктических дельтах Лены и Колымы усиливается приток взвеси вследствие взаимодействия потока и русла, обусловливая положительную зависимость ΔSSC от Q.

6. Площадь разрушений берегов аллювиально-морской террасы за 1964–2024 гг. составила 87,3 км^2 при средней скорости 0,68 м/год. В период 2000–2024 гг. скорость переформирований на ключевых участках возросла на 66% (с 1,56 до 2,57 м/год). Интенсивность разрушений определяется льдистостью отложений, а не их возрастом и естественной эволюцией дельты. Максимальные скорости (до 13,8 м/год) зафиксированы на участках Ледового комплекса. Ускорение переформирований обусловлено деградацией ММП под влиянием роста температуры воздуха и является причиной статистически значимого нарастающего тренда ΔSSC в Трофимовской протоке (ρ = +0,464, p-value = 0,034). Масса наносов, поступающая в русловую сеть при разрушении берегов, оценивается в 1,42–3,18 млн т в год.

Основные публикации по теме диссертации:

1. **Прокопьева К.Н.**, Магрицкий Д.В. Распределение стока воды по рукавам дельты реки Лены: применение метода автоматизированного построения графа речной сети (RivGraph) // Водные ресурсы. — 2026. — Т. 53. — № 5. (принята к публикации)

2. **Прокопьева К.Н.**, Конева У.А. Закономерности плановых переформирований в дельте реки Лены // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. — 2025. — Т. 12 — С. 153–164. DOI: 10.24412/2687-1092-2025-12-153-164

3. **Прокопьева К.Н.**, Чалов С.Р. Анализ причин увеличения мутности воды в дельте р. Лена // Водные ресурсы. — 2025. — Т. 52. — № 2. — С. 30–44. DOI: 10.31857/S0321059625020037

4. Chalov S., **Prokopeva K.**, Magritsky D., Grigoriev V., Fingert E., Habel M., Juhls B., Morgenstern A., Overduin P.P., Kasimov N.S. Climate change impacts on streamflow and sediment transport in the Lena River Delta // Ecological Indicators. — 2023. — Vol. 157. — P. 111252. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.111252

5. Магрицкий Д.В., **Прокопьева К.Н.**, Лычагин М.Ю., Чалов С.Р., Лошкова О.В., Конева У.А., Лошков О.Д. Гидрологические условия в дельте реки Лена в августе 2024 г. // Известия Русского географического общества. — 2026. — Т. 158. — № 2. — С. 65–90. DOI: 10.7868/S3034538326020045

6. Chalov S., **Prokopeva K.,** Habel M. North to south variations in the suspended sediment transport budget within large Siberian river deltas revealed by remote sensing data // Remote Sensing. — 2021. — Vol. 13. — no. 22. — P. 4549. DOI: 10.3390/rs13224549

7. Chalov S., **Prokopeva K.** Sedimentation and erosion patterns of the Lena River anabranching channel // Water. — 2022. — Vol. 14. — no. 23. — P. 3845. DOI: 10.3390/w14233845

8. Чалов С.Р., **Прокопьева К.Н.** Оценка баланса взвешенных наносов в дельте р. Лены по данным дистанционного зондирования Земли // Исследование Земли из космоса. — 2021. — № 3. — С. 19–29. DOI: 10.31857/S0205961421030027

9. Chalov S., **Prokopeva K.**, Efimov V., Ivanov V., Koffi B., Botavin D., Babinski Z., Zimov N., Pavlyukevich E., Habel M. Implications of Yedoma bank outcrop on the Arctic river sediment transport // Scientific reports. — 2025. — Vol. 15. — P. 19320. DOI: 10.1038/s41598-025-02614-7

10. Chalov S., **Prokopeva K**., Magritsky D. Lena River Delta // Delta Sustainability: A Report to the Mega-Delta Programme of the UN Ocean Decade. Eds Weiguo Zhang, Huib de Vriend. — 2024. — P. 145–164. DOI: 10.1007/978-981-97-7259-9

11. Магрицкий Д.В., Чалов С.Р., Гармаев Е.Ж., **Прокопьева К.Н.**, Крастынь Е.А. Новые данные о трансформации стока воды и наносов в дельте реки Лены по итогам экспедиционных измерений в августе 2022 г. // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2023. — Т. 69. — № 2. — С. 171–190. DOI: 10.30758/0555-2648-2023-69-2-171-190

12. Чалов С.Р., Морейдо В.М., **Прокопьева К.Н.**, Ефимов В.А. Влияние береговых едомных обнажений на сток наносов арктических рек // Гидросфера. Опасные процессы и явления. — 2022. — Т. 4. — № 2. — С. 141–157. DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.165

13. Магрицкий Д.В., Морейдо В.М., **Прокопьева К.Н.** Изменение каскадом водохранилищ стока взвешенных наносов реки Вилюй // Гидросфера. Опасные процессы и явления. — 2022. — Т. 4. — № 1. — С. 68–92. DOI: 10.34753/HS.2022.4.1.68