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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
кандидат географических наук
Михайлова Мария Вадимовна

Москва – 2026

Оглавление

Введение ... 3

Глава 1. Географо-гидрологическая характеристика устьевой области р. Лены ... 12

1.1. Структура устьевой области ... 12

1.2. Климат и природные особенности устьевой области ... 14

1.3. Гидрологический режим устьевой области ... 20

1.4. Особенности формирования дельты р. Лены ... 42

Выводы к главе 1 ... 53

Глава 2. Методы расчета распределения стока воды, стока взвешенных наносов и интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов по спутниковым снимкам ... 54

2.1. Граф-теоретический подход к моделированию распределения стока воды по рукавам ... 54

2.2. Дешифрирование концентрации взвешенных наносов по спутниковым снимкам ... 64

2.3. Оценка плановых переформирований и расчет поступления наносов ... 78

Выводы к главе 2 ... 86

Глава 3. Закономерности распределения стока воды по рукавам дельты Лены ... 88

3.1. Морфометрические характеристики совокупности дельтовых рукавов и проток ... 88

3.2. Распределение стока воды в периоды повышенной и пониженной водности ... 93

Выводы к главе 3 ... 101

Глава 4. Трансформация стока взвешенных наносов в дельтовых рукавах и количественная оценка его притока в море Лаптевых ... 103

4.1. Многолетняя изменчивость с 2000 по 2024 г. и сезонные особенности с 2017 по 2024 г. 103

4.2. Суммарный сток взвешенных наносов в море Лаптевых с учетом его трансформации ... 115

Выводы к главе 4 ... 120

Глава 5. Анализ факторов трансформации стока взвешенных наносов ... 122

5.1. Влияние метеорологических и гидрологических факторов ... 122

5.2. Влияние русловых переформирований ... 137

Выводы к главе 5 ... 153

Заключение ... 155

Список литературы ... 158

Введение

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 и 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; большая 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 значительных 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 объемов и 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 арктических морей [Holmes et al., 2012; Tank et al., 2012]. 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 той же дельты Лены (>30 тыс. км²) делает проведение регулярных натурных наблюдений, особенно в фазы половодья, логистически и финансово затруднительным, 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 устьевых областей 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…, 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 т в год [Водные пути бассейна.., 1995]; по данным г/п Кюсюр, среднегодовой сток взвешенных наносов составляет 22,5 млн т (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.

Объект и предмет исследования

Объект исследования – крупнейшая дельта в Арктике и третья по площади в мире – дельта р. Лены. Отличительные черты исследуемого объекта – сложная гидрографическая сеть (свыше

2 000 рукавов и проток, около 44 000 озер и около 1 600 островов), повсеместное распространение многолетнемерзлых пород и тысячелетняя полигенетическая история формирования. Все это определяет дельту Лены как уникальный природный объект, уязвимый к климатическим изменениям.

Предметом исследования выступает трансформация стока воды и взвешенных наносов в многорукавной системе дельты Лены в сезонном и многолетнем масштабах.

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.

Методология и методы исследований

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, проводимых Тиксинским УГМС (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.

Защищаемые положения

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 р. 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.

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.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 13 статей, в том числе в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных перечнем ВАК.

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. Sensitivity of erosion and sediment transport to recent climate change (Айхштетт, 2024), WASWAC 4th International Youth Forum on Soil and Water Conservation (IYFSWC IV) (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 проектов № 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 выполнена 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.

Объем и структура работы

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.

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

1.1. Структура устьевой области

Дельта р. Лены – крупнейшая в России по площади и числу рукавов, она уникальна по своему строению и истории образования, а также по своей экологической ценности [Большиянов и др., 2013; Гуков, 2001; Михайлов, 1997; Эстуарно-дельтовые системы…, 2007].

Дельта – главная составляющая устьевой области р. Лены, в которую, согласно современному районированию устьевых областей [Михайлов, Горин, 2012], помимо нее входит устьевая зона моря Лаптевых (устьевое взморье). Верхняя граница устьевой области совпадает с вершиной дельты. Нижнюю границу устьевого взморья и устьевой области можно выделить по изобате 4 м [Fuchs et al., 2022], с которой начинается свал глубин.

Дельта простирается на 190 км с юга на север и на 250 км с запада на восток (рис. 1.1). Обширная дельта включает в себя ~4 000 рукавов и проток общей длиной 10 660 км, которые образуют ~1 000 островов, а число озер достигает 44 000, их общая площадь по разным оценкам составляет от 3 200 до 6 175 км^2 [Иванов, Пискун, Корабель, 1983; Schneider, Grosse, Wagner, 2009], по данным автора – 4 000 км^2.

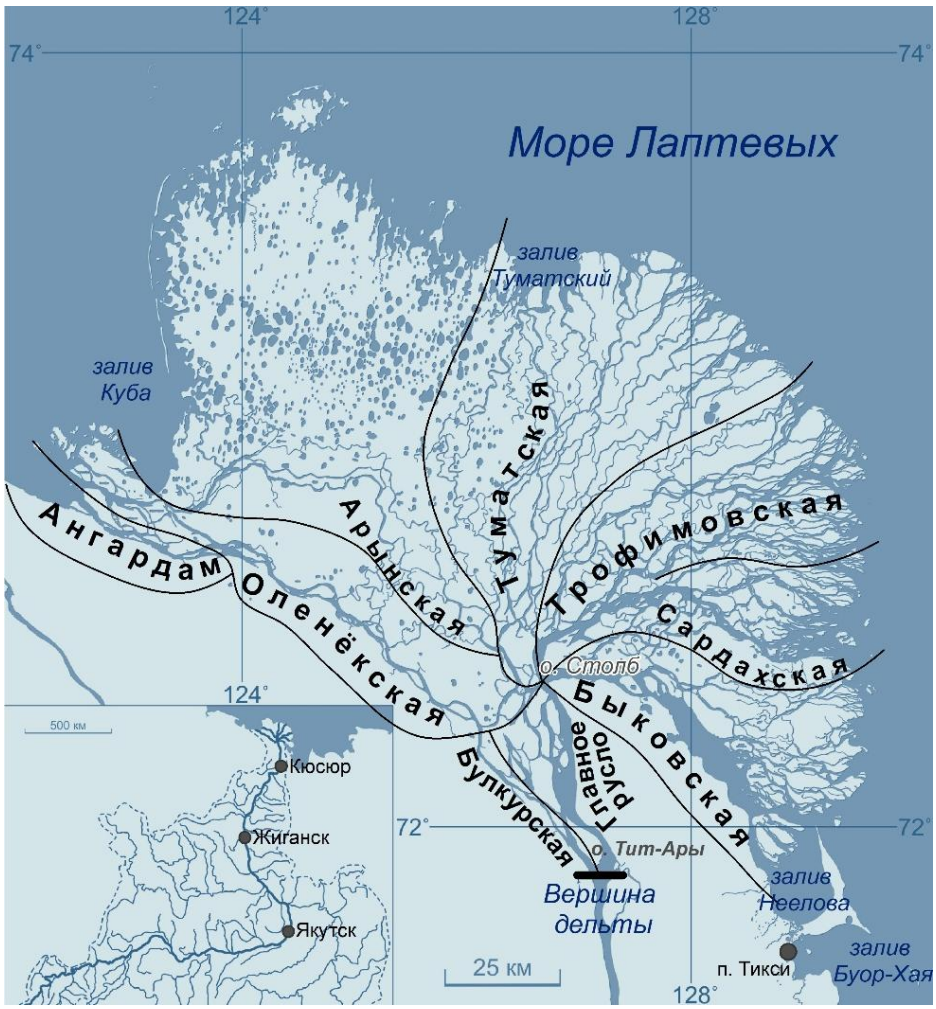


Рис. 1.1. Схема дельты р. Лены

Дельта р. Лены – классический пример дельты выдвижения [Михайлов, Рогов, Чистяков, 1986]. В качестве вершины дельты можно принимать первый узел разветвления – о. Тит-Ары, который разделяет реку на два рукава: Главное Русло и Булкурскую протоку. Главное Русло является морфологическим продолжением русла реки, выходящей из «Ленской трубы». Булкурская протока, неглубокий рукав шириной до 1,5 км, следует вдоль уступов кряжа Чекановского и впадает в один из крупнейших дельтовых рукавов – Оленёкскую протоку. В этом случае, по современным подсчетам, площадь дельты составляет 29 630 км^2 [Schneider, Grosse, Wagner, 2009], 29 300 км^2 [Кравцова, Митькиных, 2013], 29 630 км^2 [Большиянов и др., 2013]. Дельта имеет сложное строение и включает в себя не только аллювиально-дельтовые отложения Лены, но и останцы позднеплейстоценовой едомной равнины, а также массивы древних морских отложений и останцы скальных пород [Большиянов и др., 2013]. Поэтому площадь собственно аллювиально-дельтовых образований оценивается в 20 000 км^2 [Коротаев, 1991].

Ниже острова Тит-Ары Главное Русло Лены прижимается к правому борту долины и на расстоянии 70 км пролегает вдоль обрывистого склона Приморского кряжа до о. Столб, где расположен второй узел разветвления. У о. Столб река разбивается на четыре основных рукава: Быковскую, Трофимовскую, Оленёкскую и Туматскую протоки, образующие одноименные сектора дельты. Это основной узел разветвления дельты Лены. Если вершину дельты определять относительно о. Столб, то площадь дельты составляет уже 28 300 км^2 [Лопатин, Федоров, 1947]. Левобережная часть естественного расширения русла между хребтом Чекановского, Приморским кряжем и о. Столб заполнена дельтовыми островами.

На участке второго узла разветвления сток резко поворачивает на северо-восток и переходит в рукав Трофимовская протока, длина которого составляет 142 км от о. Столб до моря Лаптевых. На 25-м км от начала Трофимовской протоки от нее отходит рукав Сардахская протока длиной 97 км. Левая часть Трофимовской протоки – Большая Трофимовская, представляет собой извилистое русло в обрывистых берегах. Выходя из «Ленской трубы», река резко поворачивает к юго-востоку по Быковской протоке и течет практически в обратном направлении ниже о. Столб. Здесь формируется Быковская протока длиной 103 км от о. Столб до м. Быкова. Разветвления здесь начинают формироваться при выходе в приморскую часть. Сектор Быковской протоки характеризуется меньшим размером общей площади островов и меньшим количеством проток.

Центральный сектор дельты – сеть Туматских проток, берет свое начало от о. Самойловский. Русло в этой части дельты более узкое и неглубокое, разбивается на многочисленные протоки. На 10-м км от Туматской протоки отходит Арынская протока, которая присоединяется к Оленёкской протоке в ее нижнем течении. В этой части дельты много островов. С левой стороны Туматские протоки обрамляет о. Арга-Муора Сисё.

Западная часть дельты представлена самым длинным рукавом дельты – Оленёкской протокой, которая берет начало у о. Столб и тянется на 210 км до устьевого бара. На 15-м км в нее впадает протока Булкурская, играющая определяющую роль в водности Оленёкской протоки. В 50 км от впадения Булкурской протоки в Оленёкскую последняя разделяется на два небольших водотока, левый из которых – Ангардамская протока. На этом участке, в 40 км от морского края дельты (МКД), в Оленёкский рукав впадает Арынская протока, которая берет свое начало в Туматском секторе дельты.

В целом восточная часть дельты, включающая в себя систему Быковских и Трофимовских проток, характеризуется небольшим количеством островов малой площади и бóльшей абсолютной высоты и бóльшим количеством крупных проток. Западная часть дельты – система Туматских и Оленёкских проток – отличается бóльшей площадью островов, но меньшей абсолютной высотой островов. Согласно [Лопатин, Федоров, 1947], высота островов в восточной части дельты от вершины дельты к МКД изменяется от 40–50 м до 15–20 м, а в западной части – от 20–25 м до 4–5 м.

1.2. Климат и природные особенности устьевой области

Дельта р. Лены расположена в восточносибирской области арктического пояса с континентальным климатом. Метеорологические параметры можно описать на основе многолетних данных близлежащих метеорологических станций (мс) – Кюсюр (в 150 км по прямой от о. Столб) и Тикси (залив Неелова, куда впадает Быковская протока). Среднегодовая температура воздуха на мс Тикси с 1930 по 2022 г. составляет –12,7 °С, по данным мс Кюсюр с 1926 по 2021 г. среднегодовая температура воздуха была –13,2 °С. Средняя температура января составляет –30,8 °С (мс Тикси) и –37,4 °С (мс Кюсюр), средняя температура июля – +7,6 °С (мс Тикси) и +12,6 °С (мс Кюсюр). Годовое количество осадков за период с 1940 по 2021 г. на мс Кюсюр в среднем составляет 351 мм, на мс Тикси за период с 1933 по 2021 г. – 288 мм. Сумма осадков за теплый период года (июнь – сентябрь) по мс Тикси 143 мм (54% суммы твердых и жидких осадков за год), для мс Кюсюр – 192 мм (54% суммы). В теплый период максимальная температура воздуха может достигать +34,3 °С (07.07.1991 – мс Тикси) и +34,3 °С (28.07.1937 – мс Кюсюр), минимальная за год – до –50,5 °С (10.02.2002 – мс Тикси) и –61,6 °С (15.12.1993 – мс Кюсюр).

Согласно данным мс, установленной на о. Самойловский [Boike et al., 2019c], среднегодовая температура воздуха с 1998 по 2017 г. с учетом пропусков в данных за 1998, 2000–2003, 2005, 2006, 2009, 2010 гг. составила –12,3 °С. Если рассчитывать только по рядам с данными без пропусков за 1999, 2004, 2007–2017 гг., то среднегодовая температура воздуха равна –11,7 °С. Средняя температура самого теплого месяца (июль) +9,4 °С (1999, 2004, 2005, 2007, 2008, 2011–

2017 гг.), самого холодного (февраль) –31,7 °С (1999, 2000, 2004, 2005, 2007, 2008, 2011–2017 гг.). Среднегодовая сумма жидких осадков (июнь – октябрь) составляет 145,2 мм (1999, 2003–2008, 2011–2017 гг.). Максимальное количество жидких осадков за сутки 53,5 мм (25.07.2003 – мс Тикси) и 55,4 мм (15.07.1996 – мс Кюсюр).

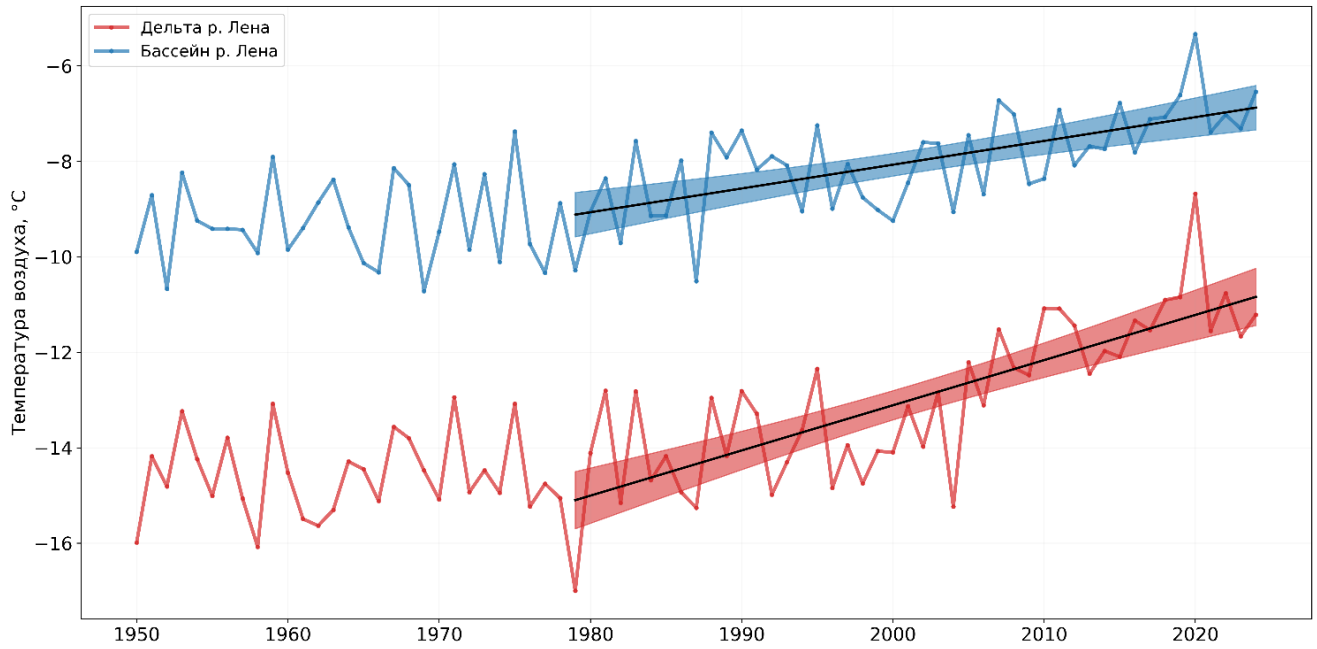
Число дней со снежным покровом в среднем составляет 250 дней в году, однако высота снежного покрова относительно мала: на льду 5–15 см, под береговыми обрывами может достигать 50–100 см. Продолжительность безморозного периода с температурой выше 0 °С не более 3–4 месяцев.

Ветровой режим в зимние месяцы определяется положением ложбины пониженного атмосферного давления над восточной частью моря Лаптевых. По этой ложбине часто проникают циклоны с западных территорий, которые приносят с собой тепло, осадки и ветры муссонного характера. В летние месяцы преобладают ветра северного и северо-восточного направлений, а зимой – южного. В августе–сентябре часто наблюдается штормовая погода, вызванная северо-западными и западными ветрами, со средней скоростью ветра до 20 м/с. Роль ветра особенно велика в прибрежных районах моря Лаптевых в летние месяцы, когда фиксируются сгонно-нагонные явления в Туматской и Оленёкской протоках [Григорьев, 1993].

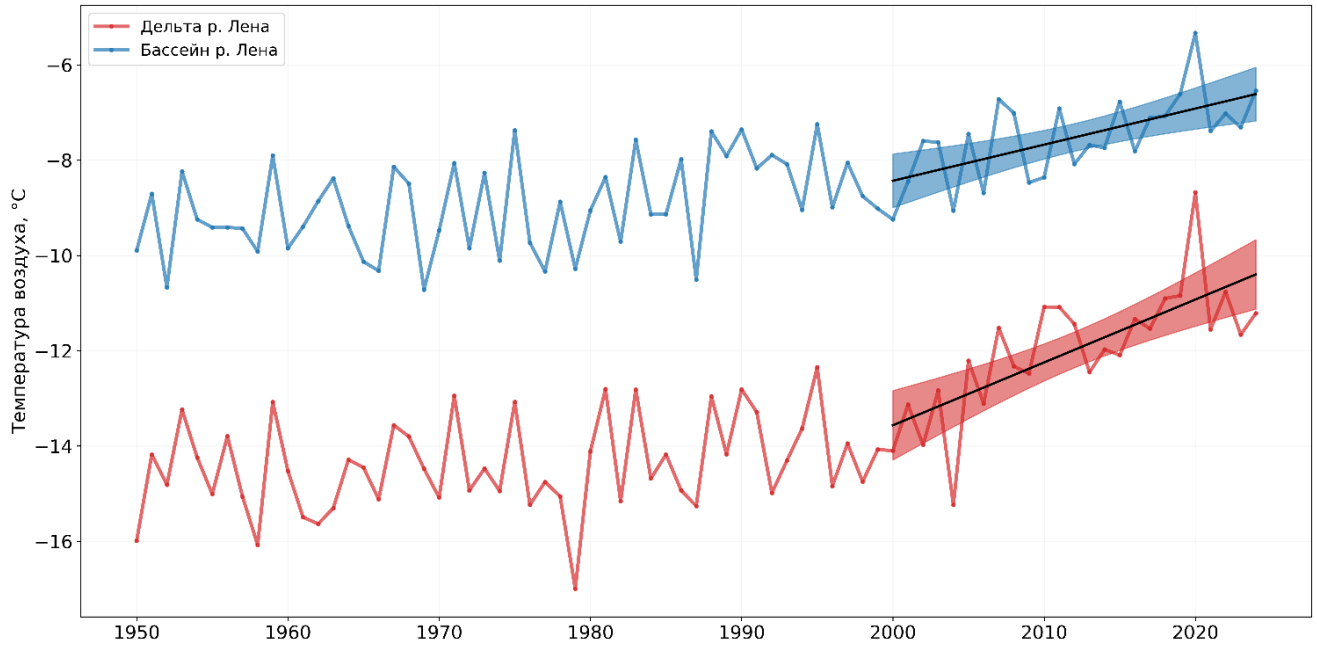
По данным Росгидромета и экспертов МГЭИК [Третий оценочный доклад…, 2022; IPCC, 2013], интенсивный рост температуры воздуха в мире начался с 1976 г. Средние темпы потепления приземного воздуха в течение 1976–2020 гг. составили 0,18 °С/10 лет в глобальном масштабе, т. е. порядка 0,8 °С за 45 лет. Особенно быстро температура повышалась в Северной полярной области, где за 30 лет (1991–2020 гг.) линейный рост среднегодовой температуры составил ~2,64 °С [Третий оценочный доклад…, 2022]. Согласно результатам, основанным на четырех наборах данных наблюдений (NASA’s Goddard Institute for Space Studies Surface Temperature version 4 [GISTEMP], the Berkeley Earth temperature dataset [BEST], the Met Office Hadley Centre/Climatic Research Unit version 5.0.1.0 [HadCRUT5] и ERA5 reanalysis), потепление в Арктике наблюдается с 1979 г. [Rantanen et al., 2022].

Для того чтобы сравнить эти процессы в более широком пространственном масштабе в Арктике, автором, в коллективе с соавторами [Chalov et al., 2023], определены темпы потепления для бассейна Лены, а также для других крупнейших водосборных бассейнов Сибири (Оби и Енисея) на основе того же набора данных ERA5-Land. В бассейне р. Лены в 1936–2019 гг. темпы увеличения годовой температуры составили 0,25 °С/10 лет и 0,36 °С/10 лет для холодного сезона (ноябрь−апрель). В дельте Лены потепление происходит быстрее, чем в других арктических регионах (рис. 1.2), в частности в бассейнах рек Обь и Енисей темпы ниже [Chalov et al., 2023]. В период с 1979 по 2021 г. в районе к северу от Полярного круга температура повысилась почти в четыре раза (на 0,73 °С/10 лет) по сравнению с остальным миром (на 0,19 °С/10 лет) [Rantanen

et al., 2022]. Таким образом, дельту Лены можно признать «горячей точкой» в плане климатических изменений, которые могут привести к необратимым гидрологическим последствиям.



(А)



(Б)

Рис. 1.2. Изменение среднегодовой температуры воздуха с 1950 по 2024 г. в бассейне (синяя линия) и дельте (красная линия) р. Лены по данным реанализа ERA5-Land, с указанием тренда с 1979 по 2024 г. и доверительного интервала (А), с указанием тренда с 2000 по 2024 г. и доверительного интервала (Б)

В результате детального анализа климатических условий по данным реанализа ERA5-Land на территории дельты за теплый период (т. е. с июня по сентябрь) с 1950 по 2024 г. автором исследования уточнены результаты, представленные ранее в работе автора с соавторами [Chalov

et al., 2023]. Обработка метеоданных за период прохождения основного стока воды и взвешенных наносов показывает, что среднемноголетнее значение температуры в дельте Лены по результатам осреднения за июнь − октябрь составило +4,71°С. Минимальное значение данного параметра по доступным данным реанализа было отмечено в 1962 г. и составило +1,70°С. Максимальное значение было отмечено в 2020 г. и составляло +8,58°С, то есть размах среднемноголетних значений температуры воздуха за 75 лет составил почти 7°С (рис. 1.3).

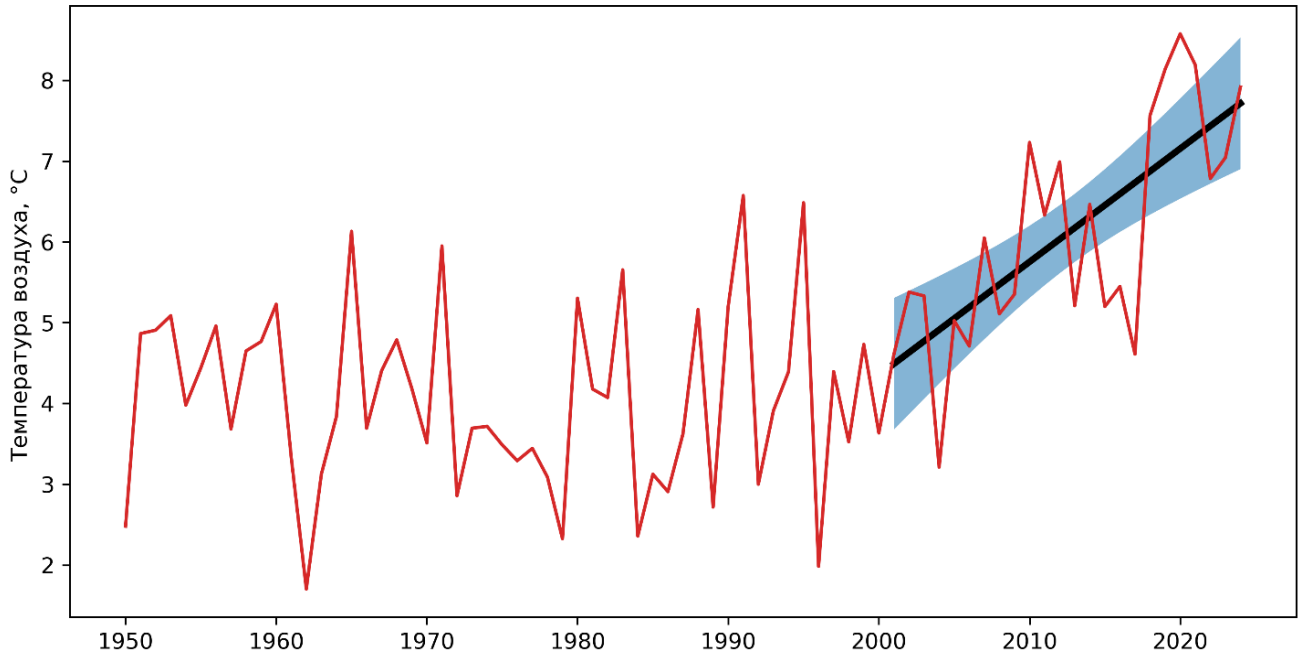


Рис. 1.3. Многолетний ход температуры воздуха за июнь–сентябрь (красная линия) в дельте р. Лены по данным реанализа с 1950 по 2024 г. с указанием тренда (черная линия) с 2004 по 2024 г. и с указанием доверительного интервала (голубая область)

Наиболее значительное повышение температуры воздуха произошло за последние 24 года. Средняя температура воздуха составляла 4,1 °С за 1950–1999 гг., тогда как за последний 20-летний период (2000–2024 гг.) она достигла 6,0 °С. Величина скорости потепления с 2000 г. составляет 1,62 °С/10 лет (значение коэффициента корреляции Спирмена с 2000 по 2024 г. 0,72 при *p*-уровне значимости < 0,05). Величина тренда с 1979 г. составила +0,9 °С/10 лет, с 1992 – +1,3 °С/10 лет (значимость трендов по коэффициенту Спирмена 0,69 и 0,77 при $p < 0,05$).

Также по данным Росгидромета и экспертов МГЭИК [Третий оценочный доклад…, 2022; IPCC, 2013], в последние десятилетия происходит увеличение количества осадков над сушей, причем его темпы с каждым годом возрастают. Этот прирост по разным источникам данных оценивается в 5−10 мм за десятилетие на фоне значительной межгодовой изменчивости, однако подобные оценки имеют региональную неоднородность.

По результатам обработки данных реанализа ERA5-Land за период июнь–сентябрь с 1950 по 2024 г. среднее количество осадков составляет 164 мм (рис. 1.4); максимальное и минимальное

значения отмечались в 1970 г. (264 мм) и в 1979 г. (96,8 мм). Размах среднемноголетних значений осадков за исследуемый период составил 167 мм. Статистически значимых изменений с 1950 по 2024 г., согласно Петтитт-тесту, не обнаружено (p = 0,9026). Однако согласно [Магрицкий, 2015; Второй оценочный доклад…, 2014] прослеживается увеличение жидких осадков с середины – конца 1980-х гг. В конце 2000-х гг. и в последнее десятилетие происходит уменьшение количества осадков.

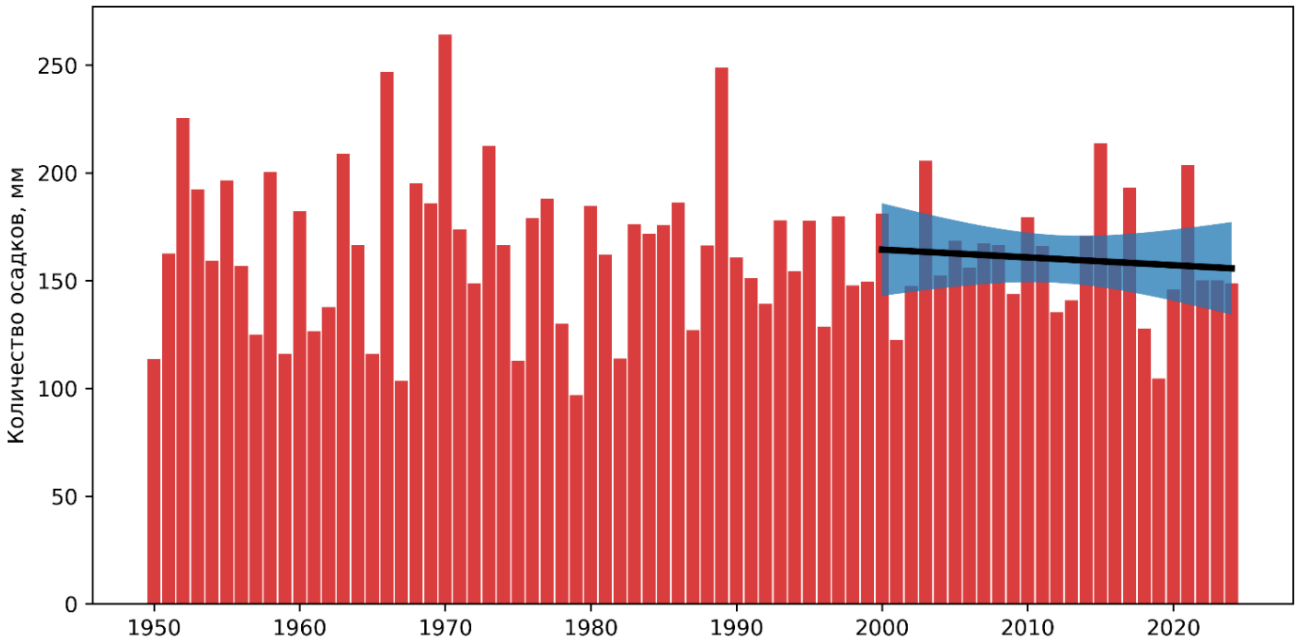


Рис. 1.4. Многолетний ход количества осадков за июнь–сентябрь (красные столбики) в дельте р. Лены по данным реанализа с 1950 по 2024 г. с указанием тренда (черная линия) с 2000 по 2024 г. и с указанием доверительного интервала (голубая область)

Анализ данных по солнечной радиации основан на реанализе ERA5-Land с 1950 по 2024 г. (имеется пропуск за 2023 г.). Среднее значение за сезон июнь−сентябрь суммарной солнечной радиации за исследуемый период составило 112 Вт/м^2. Год минимального количества солнечной радиации (1962 г.) совпал с годом, когда среднегодовое значение температуры воздуха было также минимально за исследуемый период. В 1962 г. величина средней за сезон июнь−сентябрь солнечной радиации равна 94,5 Вт/м^2. Поток солнечной радиации был также минимален два года подряд в 1984 и 1985 гг. (95,3 Вт/м^2 и 94,6 Вт/м^2). В 2018 г. максимальное значение солнечной радиации достигло 140 Вт/м^2 (рис. 1.5).

Значимые изменения были установлены и для многолетнего ряда солнечной радиации. Например, до 1979 г. среднее значение составило 110 Вт/м^2, а для периода 1980–2024 гг. увеличилось до 115 Вт/м^2. Величина тренда с 1979 по 2024 г. оценивается в 3,52%/10 лет. Однако значимость тренда статистически не подтверждается. Значительно выше величина тренда для последних 24 лет потепления. Так, величина тренда с 2000 по 2024 г. составила 5,00%. Значимость тренда по коэффициенту Спирмена 0,45 при $p < 0,05$. Почти в два раза поток

солнечной радиации увеличился с 2004 г. – величина тренда статистически значима и составляет 8,05%/10 лет (коэффициент Спирмена 0,57 при $p < 0,05$).

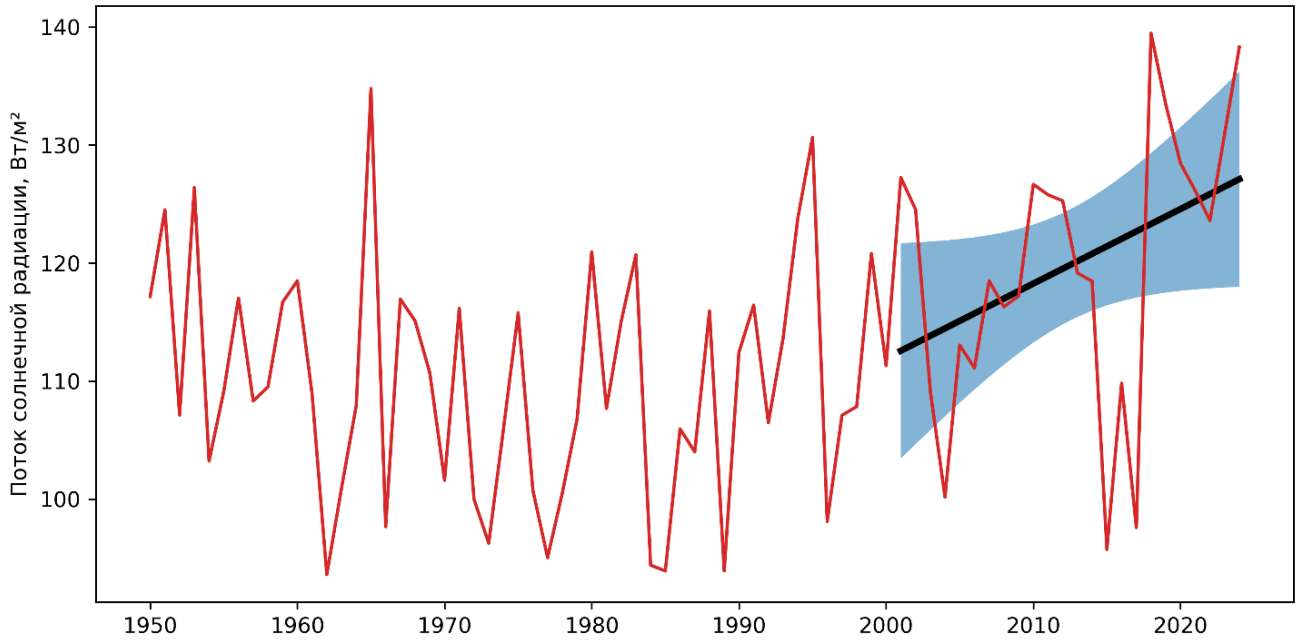


Рис. 1.5. Многолетний ход сезонного потока солнечной радиации за июнь–сентябрь (красная линия) в дельте р. Лены по данным реанализа с 1950 по 2024 г. с указанием тренда (черная линия) с 2000 по 2024 г. и с указанием доверительного интервала (голубая область)

Изменение скорости ветра носит более сложный характер. При незначительном уменьшении средних скоростей максимальные скорости ветра в северных регионах Сибири не уменьшаются или даже имеют тенденцию к возрастанию. В Третьем оценочном докладе об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [Третий оценочный доклад…, 2022] также приводятся сведения о глобальном ослаблении приземного ветра над сушей, которое особенно заметно в Северном полушарии.

В работе автором диссертации также проанализированы многолетние ряды по скорости ветра с 1950 по 2024 г. Среднее значение скорости ветра за июнь–сентябрь составило 4,97 м/с. Минимальная средняя скорость была зафиксирована в 1974 г. (4,45 м/с). Максимальное значение приходится на 2023 г. (6,62 м/с). Наблюдается увеличение средних скоростей ветра за июнь–сентябрь в 2023 и 2024 гг. Статистически значимые изменения фиксируются для периода 2004–2024 гг. (коэффициент Спирмена 0,54 при $p < 0,05$), однако связано это с возрастанием значений за последние два года (рис. 1.6).

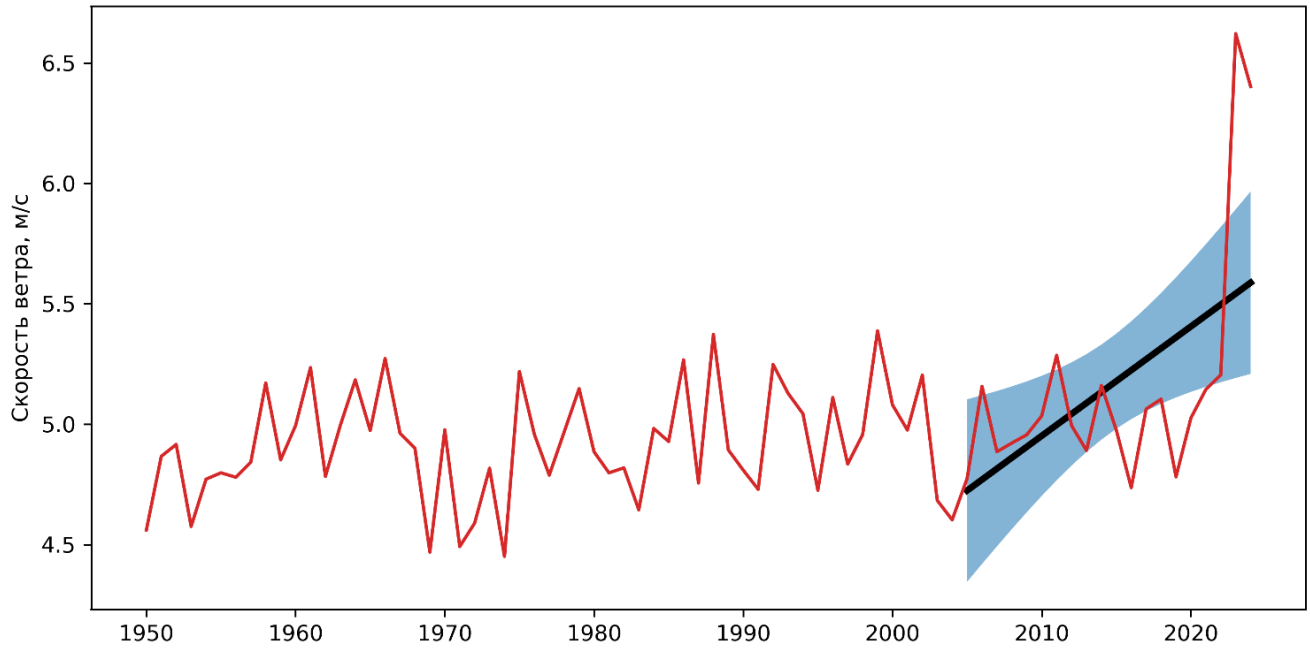


Рис. 1.6. Многолетний ход величины скорости ветра за июнь–сентябрь (красная линия) в дельте р. Лены по данным реанализа с 1950 по 2024 г. с указанием тренда (черная линия) с 2004 по 2024 г. и с указанием доверительного интервала (голубая область)

1.3. Гидрологический режим устьевой области

1.3.1. Сток воды и его перераспределение по рукавам дельты

Лена – одна из крупнейших рек, впадающих в море Северного Ледовитого океана и обеспечивающая ~12% общего стока всех арктических рек. Сток воды в вершине дельты р. Лены в первую очередь характеризуется среднемноголетним расходом воды на гидрометрическом посту (г/п) Кюсюр, где наблюдения ведутся с 1934 г. [Рейнберг, 1938]. Согласно последним обобщениям с участием автора [Chalov et al., 2023], по гидрометрическим измерениям в замыкающем створе с 1927 г. (с учетом восстановленных расходов воды за 1927–1934, 2012–2020 гг.) по 2020 г. среднемноголетний расход составляет 17 200 м^3/с, а годовой объем стока – 543 км^3. Благодаря боковой приточности и положительному водному балансу в дельте к морю годовой объем стока увеличивается примерно на 10 км^3 [Magritsky et al., 2018].

По данным статьи [Chalov et al., 2023] с участием автора диссертации, многолетние колебания водного стока характеризуются: 1) сравнительно небольшой межгодовой изменчивостью (Cv = 0,12) и высокой скоррелированностью (коэффициент автокорреляции r(1) = 0,32; критерий Андерсена t(A) = 3,2 (+) и критерий числа серий t(u) = 2,12 (+)), что закономерно для очень больших рек; 2) чередованием периодов разной водности и продолжительности (рис. 1.7), среди которых выделяются: продолжительный маловодный период в 1939–1957 гг. (средний модульный коэффициент разностно-интегральной кривой $k_{ср}$ = 0,91), средний по водности – 1958–2003 гг. ($k_{ср}$ = 0,99), многоводный – 2004–2020 гг. ($k_{ср}$ = 1,10); 3) увеличением стока с 1988 г. (коэффициент корреляции Спирмена составляет 0,21 при p, равном 0,23), особенно мощным с

2004 г. Оно соответствует началу потепления климата в бассейне с 1988 г. [Магрицкий, 2015]. В сравнении с 1935–1987 гг. увеличение годового объема стока составило 56,3 км^3 (то есть примерно на 12%). Увеличение объема стока приблизительно на 43% обеспечено ростом водности реки в верхнем течении (до поста Табага в районе г. Якутска), 31% – Алдана, 20% – Вилюя (рис. 1.7). Оставшиеся 6% – это боковая приточность и невязки руслового водного баланса. Многолетние изменения среднегодового стока характеризуются увеличением его объема на 41% в ходе роста водности половодья (май–июль) и на 29 и 30% за счет летне-осеннего (август–октябрь) и зимнего сезонов. Причем роль естественных факторов и Вилюйского водохранилища в увеличении зимнего стока в низовье р. Лены и нарушении его стационарности почти равнозначная [Магрицкий, 2015; Berezovskaya, Yang, Hinzman, 2005; Magritskii, 2008]: эксплуатация Вилюйского водохранилища обеспечила дополнительный сток зимой в размере ~700 м^3/с. Максимальные расходы половодья выросли незначительно и статистически незначимо – с 134 000 до 138 000 м^3/с. Выявлена тенденция к более раннему достижению пика половодья – в среднем на четверо суток.

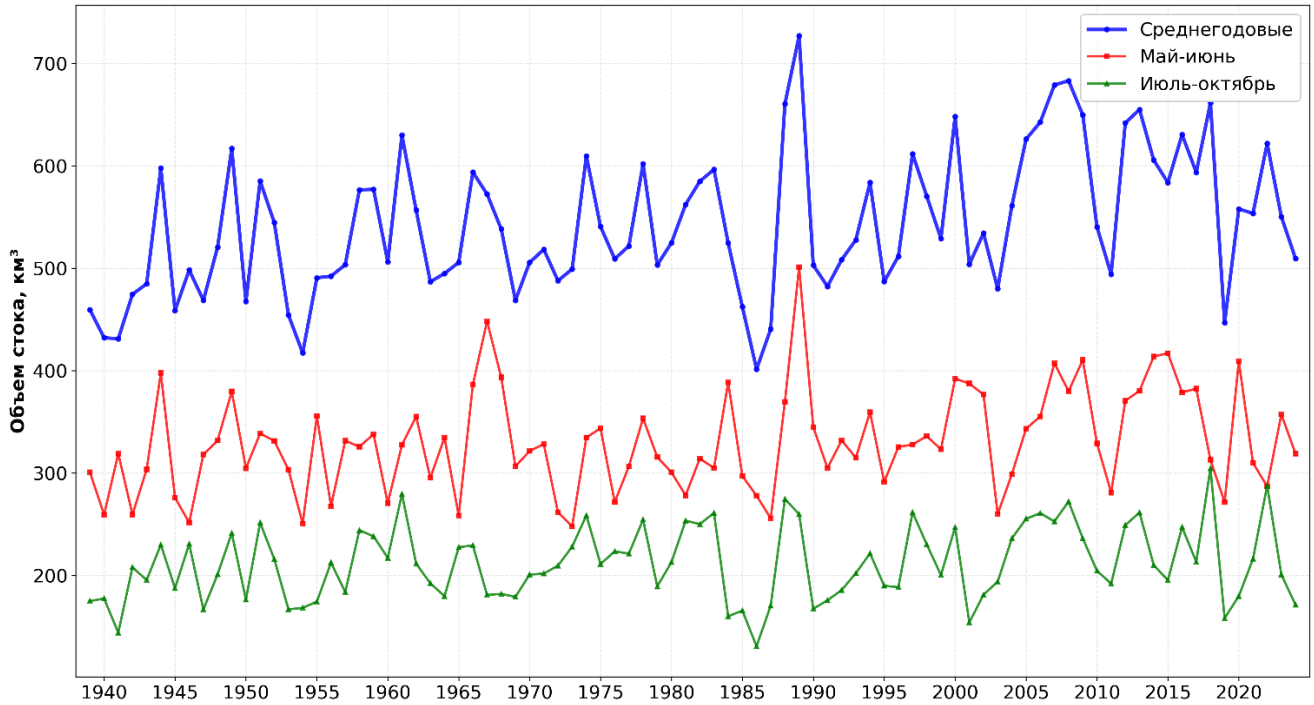


Рис. 1.7. Многолетние колебания объемов стока на г/п Кюсюр: среднегодовых, за половодье (май–июнь) и летне-осенний меженно-паводочный сезон (июль–октябрь)

Авторы многочисленных исследований за последние 25 лет приходят к выводу, что сток арктических рек увеличивается [McClelland et al., 2006; Peterson et al., 2002; Shiklomanov et al., 2006, 2021]. Например, согласно одному из первых анализов данных мониторинга на реках Евразии, среднемноголетний расход шести крупнейших рек (Северная Двина, Печора, Обь, Енисей, Лена, Колыма) увеличился на 7% с 1936 по 1999 г., т. е. темпы увеличения составляют

2,0 ± 0,7 км^3/год [Peterson et al., 2002]. Согласно последним оценкам [Магрицкий и др., 2023], основанным на данных с 1936 по 2022 г., величина годового притока речных вод в моря Российской Арктики с 1989 г. выросла на 238 км^3 (прирост 8,9%). Авторы проанализировали измерения на замыкающих створах арктических рек и установили, что сток увеличивается от 2 до 27% на реках: Оленёк (17–27%), Анабар (16,6%) и Яна (>17–20%), Енисей (6,3%), Колыма (9,3%), Индигирка (8,5–9,5%), Обь (3,6%), Мезень (2,3%).

Сток воды р. Лены в течение года распределяется очень неравномерно. В фазу повышенной водности реки проходит 60–90% годового стока. На г/п Кюсюр фаза половодья длится от 55 до 100 суток, в среднем с середины мая и до конца июля. В многоводные годы доля стока весной может увеличиваться до 90%. Максимальные расходы в половодье формируются за счет основного источника питания реки – талых снеговых вод (~50% годового стока). Максимальные расходы половодья в среднем превышают 100 000 м^3/с, средняя дата прохождения максимальных расходов воды приходится на начало июня. По многолетним наблюдениям, наибольший расход составил 220 000 м^3/с (4 июня 1989 г.). Распределение стока по сезонам представлено в таблице 1.1 [Геоэкологическое состояние Арктического…, 2007] с добавлением данных, обновленных автором по результатам мониторинга ArcticGRO [The Arctic Great…, 2025].

Таблица 1.1. Внутригодовое распределение стока воды в устье р. Лены [Геоэкологическое состояние Арктического…, 2007] (в скобках обновленные автором данные с 1934 по 2024 г.)

Среднемесячные расходы воды, м^3/с											
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2930 (3200)	2340 (2530)	1820 (1950)	1500 (1630)	6700 (9420)	73 900 (73 300)	39 700 (39 100)	27 200 (27 800)	24 600 (25 300)	14 300 (15 100)	3540 (3900)	3000 (3350)
По сезонам, %											
XI–IV				V–VII				VIII–X			
7,5 (8,0)				59,7 (59,0)				32,8 (33,0)			

Дельта Лены отличается продолжительным периодом с ледовыми явлениями (до 200 дней и больше). При вскрытии Лены вода с верхних участков реки заливает острова и расширенные участки дельтовых рукавов, на поверхности которых сохраняется сплошной лед. В рукавах заторы характеризируются небольшой продолжительностью и незначительным подъемом уровня воды, так как вода и лед перераспределяются в смежные водотоки. Изменения расходов и уровней воды в водотоках дельты в период половодья приводят к их значительным русловым деформациям.

Наблюдающиеся гидроклиматические изменения речного стока могут оказывать значительное влияние на гидрологические условия в дельте, в том числе на перераспределение стока по рукавам дельты и транспорт взвешенных наносов.

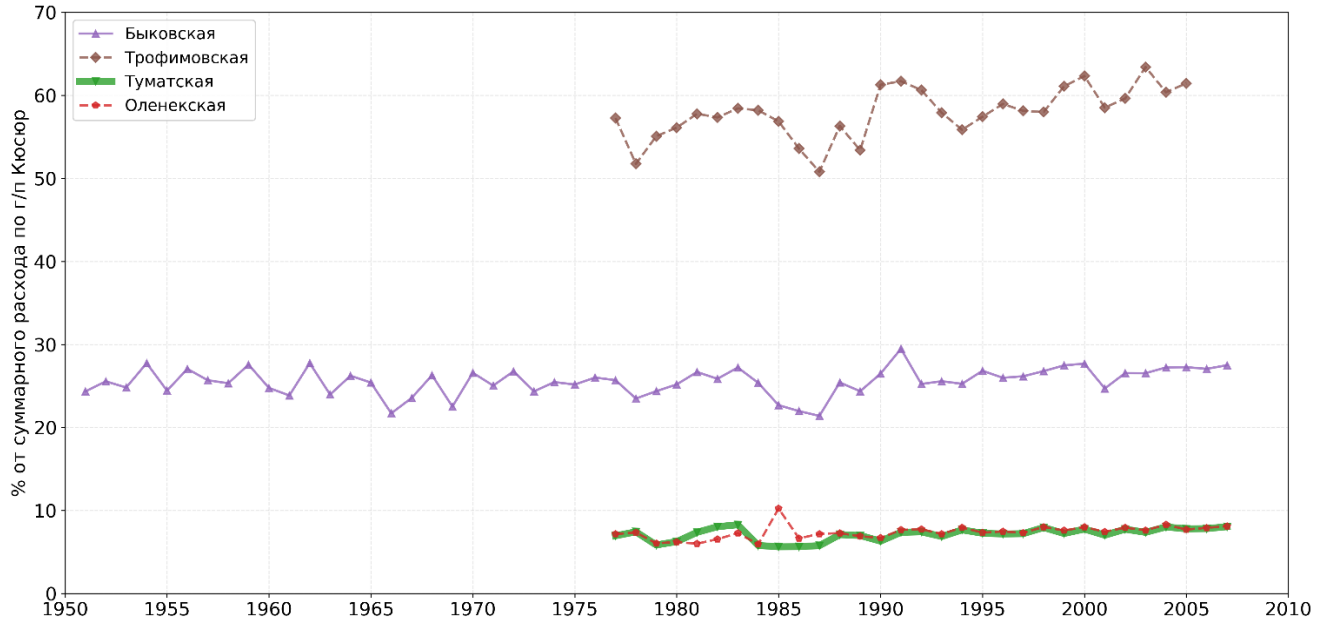
Изучению перераспределения стока воды по рукавам дельты Лены посвящено множество исследований, основанных на данных мониторинговых наблюдений на постах в истоках рукавов дельты, экспедиционных измерений и результатах моделирования.

Первые данные о распределении стока по рукавам получены в ходе Усть-Ленской экспедиции сотрудников ААНИИ в 1950 г. В этом же году свое функционирование начала первая гидрологическая станция в устье Быковской протоки – полярная станция Столб (с 1987 г. полярная станция имени Ю.А. Хабарова), на которой велся мониторинг уровней, расходов, температуры воды и ледовой обстановки. Измерения расходов воды с 1950 г. проводились в двух створах: в Быковской протоке и в створе «4,7 км выше о. Столб» в Главном Русле дельты. В 1948 г. в вершине дельты у о. Тит-Ары начал работу уровенный пост. С 1953 г. запущен створ «Остров Малышева» в протоке Исполатова, а в 1961 г. начаты регулярные измерения в крупнейшем рукаве дельты Лены – протоке Трофимовской (створ Сагыллах Ары). По итогам экспедиционных и мониторинговых наблюдений проведены обобщения распределения стока воды по рукавам дельты [Антонов, 1967; Иванов, 1963; Иванов, Пискун, Корабель, 1983; Тасаков, 1965].

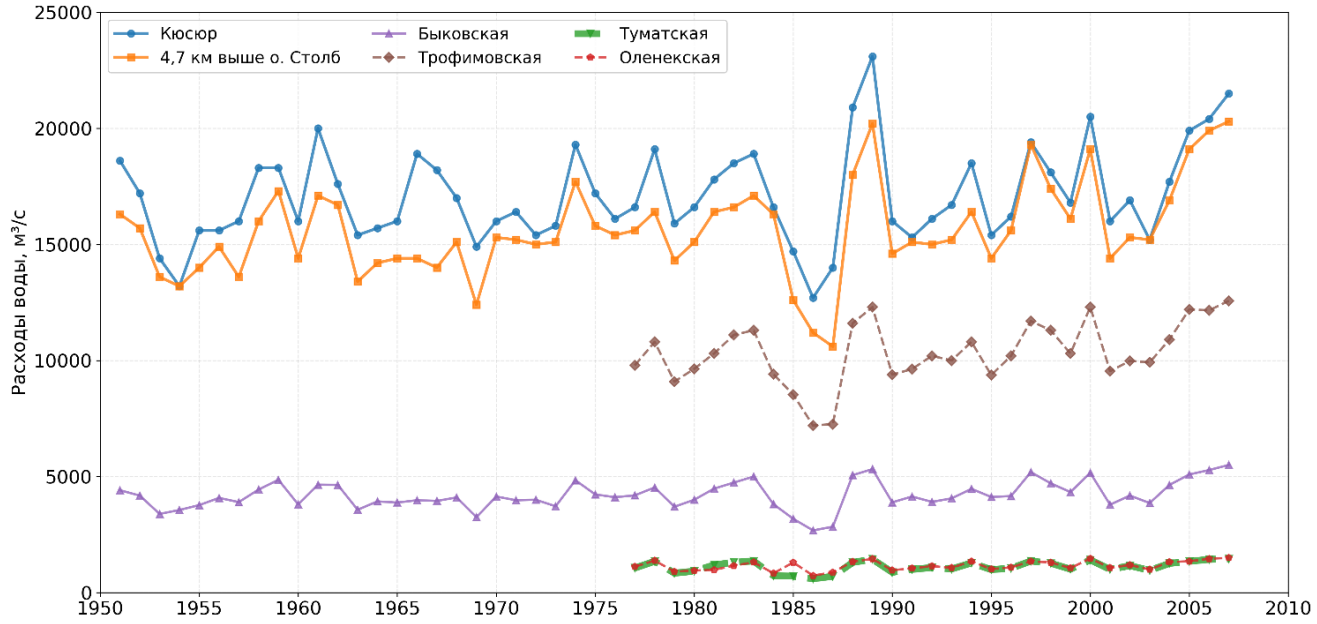
Второй этап изучения гидрологического режима дельты и проведения измерений в рукавах дельты начат сотрудниками Тиксинской ЦГМС, которые с 1973 г. проводили эпизодические измерения. С 1977 г. заложены створы систематических измерений расходов воды в истоках проток Туматская, Оленёкская и Трофимовская. К 1991 г. были закрыты все уровенные посты, кроме створа в истоке Быковской протоки. После 2007 г. прекращены регулярные измерения расходов воды на створах в рукавах дельты. Обобщение синхронных наблюдений за период с 1977 по 2007 г. демонстрирует отсутствие изменений перераспределения стока воды по рукавам дельты (рис. 1.8). Данный вывод подтверждает анализ результатов измерений, проведенных в августе 2022 и 2024 гг. (с участием автора) и отраженных в работах [Большиянов и др., 2013; Магрицкий, Айбулатов, Горелкин, 2018; Федорова и др., 2017]. В исследовании [Магрицкий и др., 2023], проведенном с участием автора диссертации, приводятся расчеты, показывающие, что перераспределение стока воды по рукавам за последние 20 лет не изменилось: примерно 24,9–25,0% общего притока в дельту приходится на Быковскую протоку, 58–59,2% – уходит в Трофимовскую, 6% – в Туматскую и 6,6% – в Оленёкскую. Разница с расчетными данными из [Большиянов и др., 2013; Магрицкий, Айбулатов, Горелкин, 2018] составляет менее 0,3%.

Внутригодовое распределение расходов воды по рукавам значительно меняется в зависимости от расхода воды в вершине дельты. Так, в половодье при больших расходах воды увеличивается роль Туматской, Оленёкской и Быковских проток, с уменьшением расходов воды сток, наоборот, концентрируется в Трофимовской протоке за счет уменьшения доли стока остальных рукавов. Это связано с морфологическими особенностями главного узла разветвления. При высоких расходах воды затопляются пойменные территории, с которых сток перетекает в

малые протоки. В межень Трофимовская протока, представляющая в истоке морфологическое продолжение Главного Русла Лены и являющаяся более глубокой и широкой, сосредотачивает основной сток в своем русле. Подробные обобщения и расчеты среднемесячных расходов по рукавам дельты проведены в [Иванов, Пискун, Корабель, 1983] и представлены в таблице 1.2.



(А)



(Б)

Рис. 1.8. Изменение процентного распределения стока воды по рукавам дельты (от г/п Кюсюр) в период открытой воды по данным систематических наблюдений Тиксинского УГМС (А), среднегодовых расходов воды с 1951 по 2007 г. (Б)

Таблица 1.2. Характеристика среднемесячных и среднегодовых расходов воды в истоках рукавов основных проток дельты р. Лены [Иванов, Пискун, Корабель, 1983]

Характеристика	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	**Год**
Главное Русло													
Q, м³/с	2740	2220	1710	1440	4610	62 600	38 700	26 000	22 400	12 900	3340	2860	**15 100**
CvQ	0,21	0,29	0,34	0,33	1,12	0,14	0,2	0,24	0,26	0,24	0,25	0,22	**0,12**
Быковская протока													
Q, м³/с	509	376	267	209	1000	19 200	10 500	6500	5670	3160	676	550	**4070**
CvQ	0,34	0,42	0,5	0,51	1,32	0,16	0,23	0,28	0,28	0,27	0,3	0,34	**0,14**
Трофимовская протока													
Q, м³/с	2360	2060	1700	1470	3830	37 300	24 300	17 300	14 600	8650	2380	2260	**9860**
CvQ	0,12	0,16	0,2	0,19	0,78	0,16	0,18	0,23	0,28	0,25	0,23	0,18	**0,14**
Туматская протока													
Q, м³/с	22,6	9,31	3,31	0,96	318	6010	2740	1470	1100	580	74,8	32,8	**1030**
CvQ	1,72	2,09	2,22	2,96	1,53	0,24	0,32	0,41	0,5	0,53	0,82	1,32	**0,26**
Оленёкская протока													
Q, м³/с	98,3	60,1	25,9	10,4	292	5910	2800	1630	1280	710	163	134	**1080**
CvQ	0,85	1,12	1,27	1,9	1,61	0,28	0,29	0,34	0,4	0,42	0,62	0,76	**0,19**

Среднемноголетние расходы воды Трофимовской протоки, измеренные при открытом русле в период с 1977 по 2005 г., изменяются в пределах от 8 990 до 44 600 м^3/с [Тиксинская ЦГМС]. Максимальный расход пришелся на половодье в 1978 г., достигнув отметки в 72 600 м^3/с (16.06.1978). Средний расход в Трофимовской протоке за период открытой воды (июнь–сентябрь) составляет 23 900 м^3/с. По данным измерений за период открытой воды в Трофимовскую уходит от 50 до 64% общего расхода воды на г/п Кюсюр и 58–66% общего расхода воды в створе «4,7 км выше о. Столб».

О распределении стока воды по многочисленным протокам Трофимовского разветвления известно только по данным экспедиционных работ, так как ниже створа систематических измерений не проводилось. Первые измерения здесь получены в 1979–1982 гг. Ленской партией географического факультета МГУ [Коротаев и др., 1990]. У о. Сардах (25 км ниже от истока Трофимовской) расходы воды составляли ~90% общего стока в истоке рукава. В крупнейшем узле разветвления сток распределяется между рукавами Большая Трофимовская (41%) и Сардахская (49%). Далее при отделении от рукава Большая Трофимовская часть стока переходит в протоку Баарчах (22%) и в протоки Малая Трофимовская и Давыда (12%). В межень перед выходом к устьевому бару сток Трофимовского рукава (в 85 км ниже разветвления с Сардахской протокой)

вследствие распределения в правые протоки составляет лишь 8% количества воды, поступающей в Трофимовскую у о. Столб [Бабич и др., 2007].

Перераспределение стока в этих протоках непостоянное вследствие активных русловых переформирований в Трофимовско-Сардахском узле (рис. 1.9). Изменчивость стока в этой части дельты приводится при анализе фондовых материалов Тиксинской ЦГМС [Магрицкий, Айбулатов, Горелкин, 2018], согласно которым в первой половине 1980-х гг. в Большую Трофимовскую уходило 900, 2 000, 4 500 и 7 300 м^3/с (при общем расходе воды в истоке Трофимовской, равном соответственно 2 500, 5 000, 10 000 и 15 000 м^3/с). Остальная часть стока поступала в протоку Сардахскую. По данным измерений в 2001–2002 г., расходы воды в Большой Трофимовской сократились до 700, 1 600, 3 600 и 5 850 м^3/с [Большиянов и др., 2013].

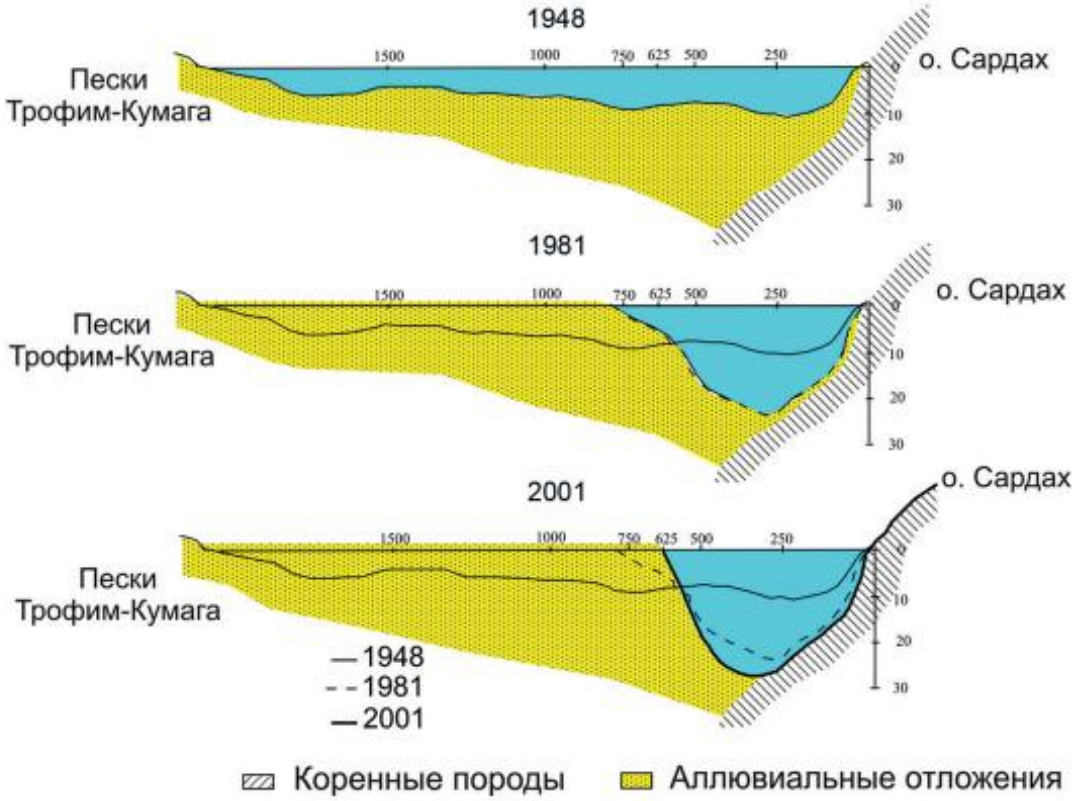


Рис. 1.9. Русловые деформации Сардахской протоки в створе Сардах-Хая – Трофим-Кумага по данным [Атлас Сардахской протоки…, 1949] и измерениям [Большиянов и др., 2013] в 2001–2002 гг. (составитель [Большиянов и др., 2013])

В Быковскую протоку, формирование которой все еще продолжается, в среднем за год поступает ~25–30% суммарного стока в основном узле разветвления у о. Столб [Иванов, Пискун, Корабель, 1983] или 21–26% стока по г/п Кюсюр. Сток Быковской протоки, наоборот, увеличивается с возрастанием суммарного расхода воды в вершине дельты. По данным Тиксинской ЦГМС за период инструментальных наблюдений с 1951 по 2007 г., за период открытой воды расход в Быковской протоке составил 10 700 м^3/с. Расходы воды в Быковской протоке могут уменьшаться до 3 070 м^3/с в периоды глубокой межени и отсутствия осадков.

Максимальный среднемесячный расход воды в Быковской протоке был зафиксирован в 1962 г. и составил 25 700 м^3/с с увеличением на пике половодья до 45 600 м^3/с (07.06.1962).

Через центральную часть дельты, формирование которой происходило на ранних этапах ее развития, в протоку Туматскую в течение года проходит относительно небольшой объем воды, ~5,8–9,3%. Более 50% ее стока уходит в Арынскую протоку, которая впадает в Оленёкскую в ее нижнем течении. Средний расход Туматской протоки при открытом русле за период с 1977 по 2007 г. равен 3 000 м^3/с. Минимальный расход, измеренный в Туматской протоке, составил 265 м^3/с (14.08.1986), а максимальный – 28 800 м^3/с (10.06.1983).

В Оленёкско-Булкурский узел разветвления, который играет определяющую роль в водности Оленёкской протоки, в период повышенного стока поступают значительные объемы воды – до 12% стока в вершине дельты. Но уже на спаде половодья сток воды через Булкурскую протоку в Оленёкскую прекращается [Федорова и др., 2017], и расходы воды в Оленёкской падают. В среднем расход воды в Оленёкской протоке составляет 3 100 м^3/с, с увеличением в половодье до 34 300 м^3/с (09.06.1985) и уменьшением в межень до 450 м^3/с (14.08.1986). В Оленёкскую протоку поступает от 5,9 до 11,8% общего объема воды в створе «4,7 км выше о. Столб» или 5,9–10% на г/п Кюсюр. На протяжении 145 км расходы в Оленёкской протоке практически не изменяются. В 60 км от устьевого створа она разделяется на два водотока, левый из которых – Ангардамская протока – забирает 53% стока Оленёкской. Водность правого водотока – Оленёкской – возрастает в результате впадения в нее Арынской протоки. Тем не менее сток воды Оленёкской протоки к ее устью снижается до 65% стока в ее истоке [Коротаев и др., 1990].

Авторы исследования [Магрицкий, Айбулатов, Горелкин, 2018] также провели обобщение распределения стока воды по рукавам в зависимости от суммарного стока в замыкающем створе р. Лены на г/п Кюсюр (таблица 1.3).

Таблица 1.3. Распределение расходов воды *Q* по рукавам дельты Лены в период открытого русла [Магрицкий, Айбулатов, Горелкин, 2018]

Кюсюр	Быковская протока		Трофимовская протока		Туматская протока		Оленёкская протока	
Суммарный *Q*, м^3/с	м^3/с	% суммарного *Q*	м^3/с	% суммарного *Q*	м^3/с	% суммарного *Q*	м^3/с	% суммарного *Q*
10 000	2000	21,3	6800	72,3	200	2,1	400	4,3
20 000	4800	24,4	13 000	66,1	825	4,2	1040	5,3
30 000	7500	25,1	18 900	63,3	1670	5,6	1800	6,0
50 000	13 500	26,4	30 000	58,8	3800	7,4	3750	7,3
80 000	23 500	27,5	46 500	54,4	7700	9,0	7800	9,1
100 000	29 500	27,7	55 500	52,1	10 700	10,0	10 800	10,1
120 000	34 300	27,6	63 000	50,6	13 300	10,7	13 900	11,2
140 000	39 000	27,8	70 000	49,9	15 000	10,7	16 200	11,6

Эти данные были дополнены в ходе обобщения стационарных измерений в 2001–2007 гг. (среднесуточные, срочные) и экспедиционных измерений ААНИИ, СПбГУ в летние сезоны 2004–2006 гг. в протоке Булкурской при отсутствии данных на период подъема половодья с учетом невязок к суммарному расходу на г/п Кюсюр и в створе «4,7 км выше о. Столб» [Магрицкий, Айбулатов, Горелкин, 2018] (таблица 1.4).

Таблица 1.4. Распределение расходов воды Q по рукавам дельты Лены в период открытого русла по [Магрицкий, Айбулатов, Горелкин, 2018] (рассчитанные значения указаны курсивом)

р. Лена		Вершина дельты			Основной узел разветвления						
Замыкающий створ – г/п Кюсюр		Главное Русло – 4.7 км выше о. Столб	Исток Булкурской	Невязка ΣQ_i по отношению к Q на г/п Кюсюр	Исток Быковской – г/п о. Столб (Хабарова)		исток Трофимовской	исток Туматской	Оленёкская, ниже слияния с Булкурской	Невязка ΣQ_i по отношению к Q на г/п (с округлением)	
										Кюсюр	4,7 км выше о. Столб
Q, м^3/с	уровень, см	Q_i, м^3/с	Q_i, м^3/с	%	Q_i, м^3/с	уровень, см	Q_i, м^3/с	Q_i, м^3/с	Q_i, м^3/с	%	%
10 000	360	900	*0*	*–10*	2000	120	6800	200	400	-6	4,5
20 000	620	19 000	*0*	*–5,0*	4800	267	13 000	825	1040	-1,5	3,5
30 000	828	28 800	*100*	*–3,5*	7500	370	18 900	1670	1800	-0,5	3,5
40 000	1 025	38 600	*320*	*–2,5*	10 200	445	24 200	2640	2680	-0,5	3,0
50 000	1 200	48 500	*950*	*–1,0*	13 500	518	30 000	3800	3750	2,0	5,5
60 000	1 360	57 500	*1 900*	*–1,0*	16 800	578	35 300	4890	4880	3,0	7,5
80 000	1 640	76 000	*5 000*	*1,0*	23 500	685	46 500	7700	7800	7,0	12,5
100 000	*1 930*	*92 500*	н/д	н/д	*29 500*	*805*	*55 500*	*10 700*	*10 800*	*6,5*	*15,0*
120 000	*2 240*	*108 000*	н/д	н/д	*34 300*	*800*	*63 000*	*13 300*	*13 900*	*4,0*	*15,5*
140 000	*2 560*	*122 500*	н/д	н/д	*39 000*	*900*	*70 000*	*15 000*	*16 200*	*0*	*14,5*
160 000	*2 840*	*136 000*	н/д	н/д	*45 000*	*1 050*	*77 000*	н/д	н/д	н/д	н/д

Примечание: н/д – нет данных.

1.3.2. Сток взвешенных наносов

Формирование стока взвешенных наносов в пределах дельты Лены определяется, в первую очередь, их поступлением с речным стоком к вершине дельты и воздействием местных факторов трансформации: притоком с водосборной площади, эрозионно-аккумулятивными процессами, синоптической обстановкой, гидродинамическими условиями.

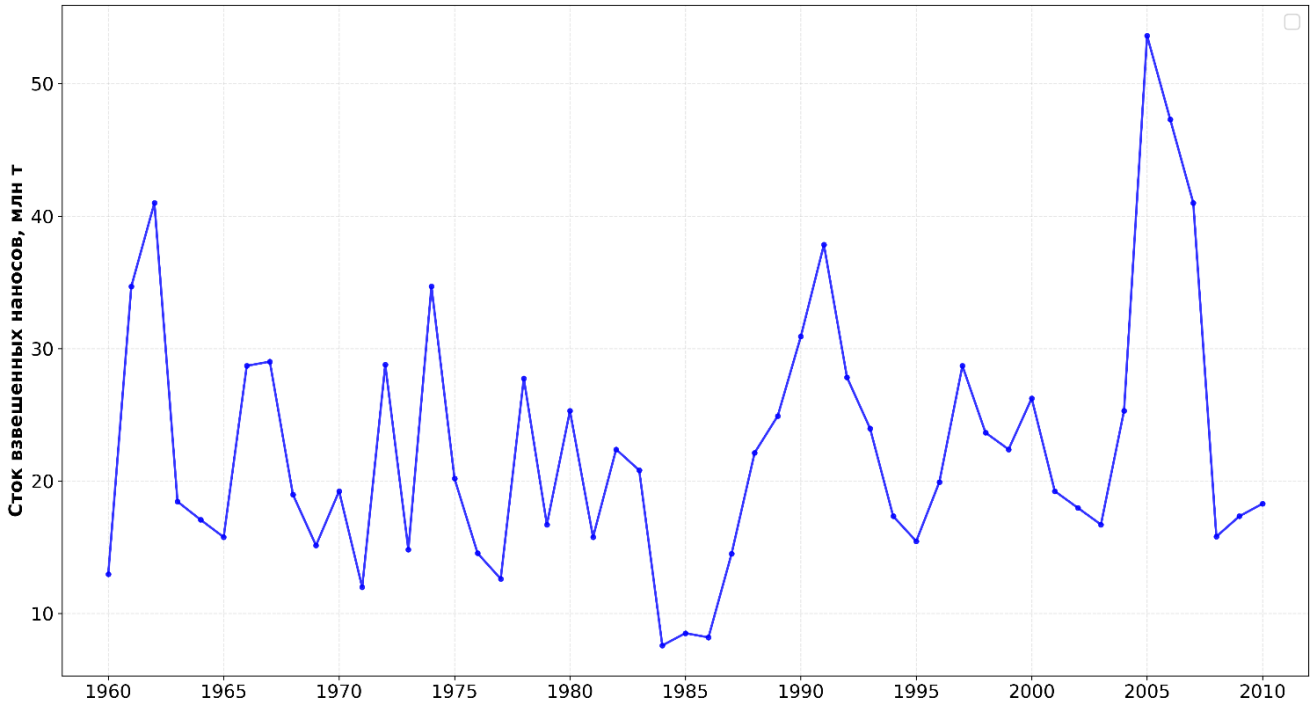
Анализ данных измерений в замыкающем створе г/п Кюсюр

Обработка данных сетевых наблюдений в 1936, 1944, 1960–2010 гг. в замыкающем створе г/п Кюсюр показывает, что сток взвешенных наносов W_R Лены составляет 22,5 млн т, а расход взвешенных наносов оценивается в 712 кг/с. Концентрация взвешенных наносов в нижнем

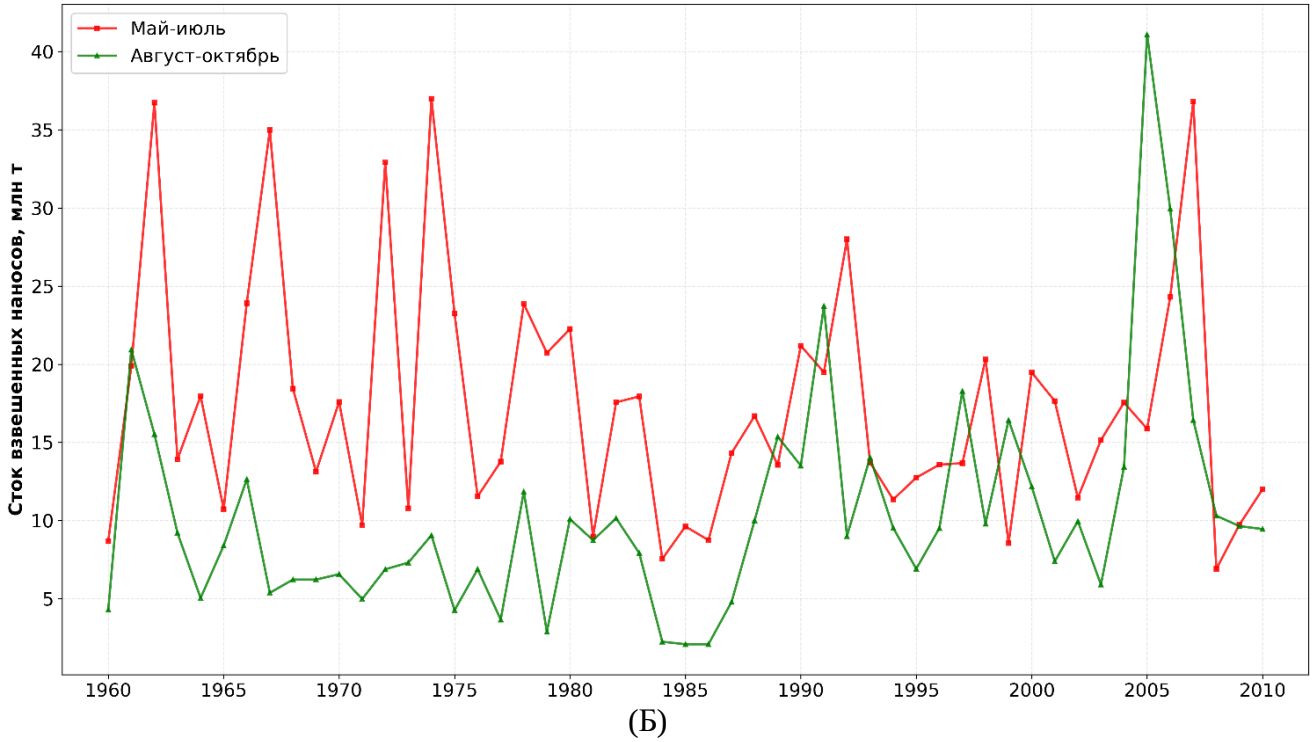
течении Лены невысокая, поскольку эрозионные процессы ограничены большой длительностью холодного периода, распространением многолетнемерзлых пород, значительной долей равнинных, заболоченных и залесенных территорий, прохождением половодья в условиях еще мало оттаявших отложений [Магрицкий, 2010; Ресурсы поверхностных вод…, 1972]. По данным многолетних измерений на г/п Кюсюр, среднегодовая концентрация взвешенных наносов достигает 41,1 мг/л. В течение года концентрация взвешенных наносов увеличивается в половодье до 35–90 мг/л (максимальная измеренная величина за период наблюдений составила 790 мг/л – 18 августа 2004 г.) и в период летне-осенних паводков до 35–65 мг/л, закономерно уменьшается в период между паводками до 20–30 мг/л. Минимальны значения концентрации взвешенных наносов в зимнюю межень (1,5–4,5 мг/л).

Подробный анализ характеристик стока взвешенных наносов (W_R) проведен в исследовании [Chalov et al., 2023] с участием автора диссертации. Установлено, что годовой сток наносов за инструментальный период наблюдений на г/п Кюсюр изменялся от 53,6 (2005 г.) до 7,6 млн т (1984 г.). В многолетнем ходе W_R выявлено определенное совпадение с колебаниями стока воды и две долговременные тенденции: снижение W_R до 1986–1987 гг. и статистически незначимое увеличение W_R в последующие годы на 6,1 млн т в год, значимое лишь по критерию Манна – Уитни *U-test* (*p*-уровень < 0,05) (рис. 1.10). Невысокая корреляция между межгодовыми изменениями стока воды и взвешенных наносов ($r \approx 0,5$) объясняется зависимостью W_R не только от годового стока воды, но и от внутригодового распределения расходов воды, от числа и мощности дождевых паводков и других факторов.

Сток взвешенных наносов на г/п Кюсюр вырос за счет летне-осенней межени [Магрицкий, 2015], поскольку в криолитозоне транспорт взвешенных наносов чувствителен не только к увеличению слоя осадков и расходов воды, но и к росту температуры воздуха и речных вод [Chalov et al., 2025; Costard et al., 2007]. После 1988 г. доля стока половодья снижалась с 82,7% в 1936, 1944, 1960–1987 гг. до 64,8% в 1988–2010 гг., а доля стока в летне-осенний сезон увеличилась с 16,8 до 34,9%. Однородность ряда летне-осенних значений W_R с 1988 г. была нарушена и по дисперсии (критерий Фишера, F-test (+)), и по среднему (критерий Манна –Уитни, *U-test* (+)) (рис. 1.11).

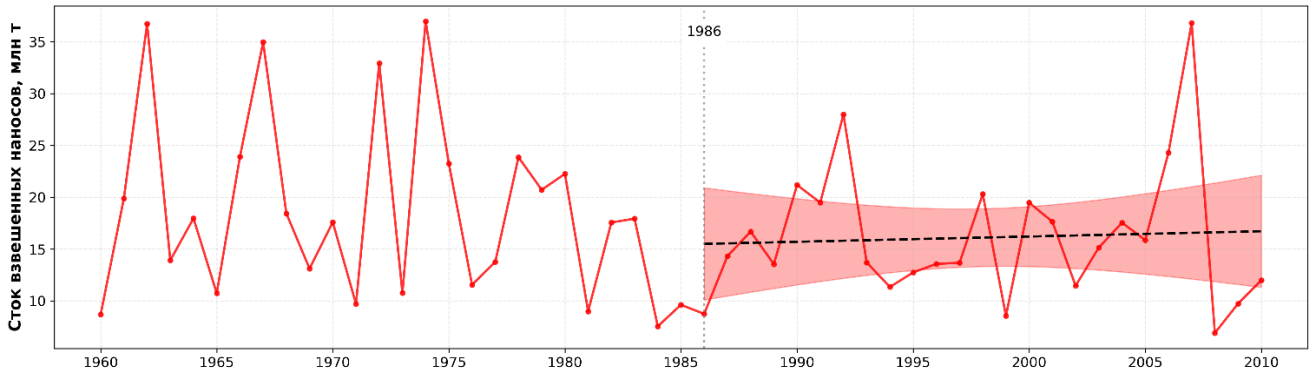


(А)

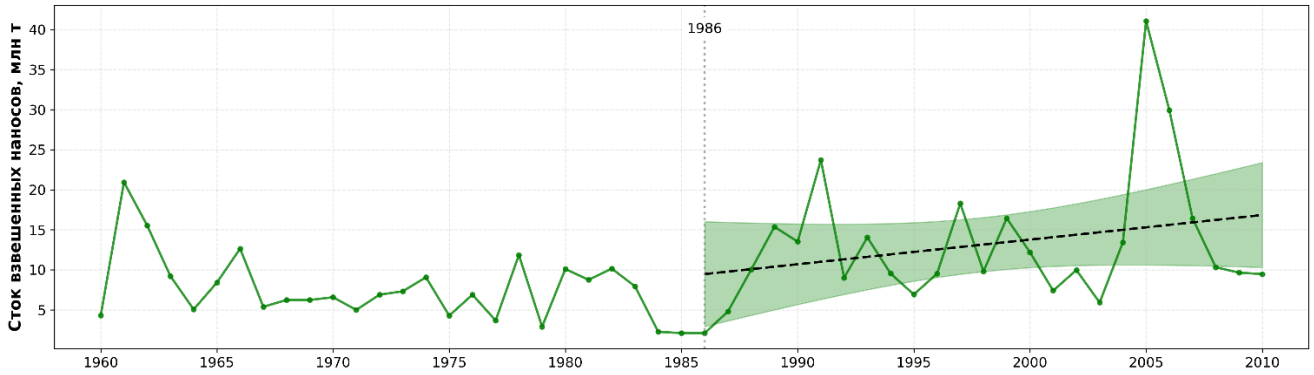


(Б)

Рис. 1.10. Многолетние колебания стока взвешенных наносов на г/п Кюсюр: годовой сток взвешенных наносов (А), сток взвешенных наносов за период половодья (май–июль) и период летне-осенней межени (август–октябрь) (Б)



(А)



(Б)

Рис. 1.11. Многолетние изменения стока взвешенных наносов на г/п Кюсюр за май–июль (А) и август–октябрь (Б) с указанием трендов и доверительных интервалов с 1986 г.

На точность данных оказывает влияние и то, что на рубеже 1980–1990-х гг. изменилось местоположение точки отбора пробы воды для определения концентрации взвешенных наносов, что определяет необходимость изучения данных и на других постах в бассейне Лены. Анализ на посту Табага демонстрирует увеличение W_R лишь с 2006 г. Его формируют взвешенные наносы, главным образом рек Олёкма и Чара, поскольку на Верхней Лене и ее притоках сток взвешенных наносов уменьшился. На постах в нижнем течении р. Алдан отмечен убывающий тренд, возможно, по причине сокращения масштабов воздействия горнодобывающих предприятий. В низовьях Вилюя и Лены колебания W_R похожи (со второй половины 1980-х гг.), но увеличение стока взвешенных наносов Вилюя ограничено влиянием Вилюйского водохранилища [Магрицкий, Морейдо, Прокопьева, 2022].

Согласно данным [Magritsky et al., 2018], сток взвешенных наносов в вершине дельты примерно такой же, что и на замыкающем створе г/п Кюсюр. В створе «4,7 км выше о.Столб», в 70–80 км от места выхода реки из Ленской трубы, концентрация взвешенных наносов на спаде половодья (в июле) примерно на 17,5% меньше, чем на г/п Кюсюр, в августе–сентябре – на 42%, за год – на 14,5%. В итоге годовой сток взвешенных наносов в Главном Русле составляет ~79% его величины на г/п Кюсюр. На постах в дельте Лены зафиксирован такой же рост и в те же сроки, что и на г/п Кюсюр. То есть рост концентрации и стока взвешенных наносов в нижнем течении Лены связан с увеличением на среднем участке р. Лены, включая бассейн р. Олёкмы, и с

активизацией механического и термоэрозионного разрушения речных берегов в низовьях Вилюя и самой Лены.

Для сравнения среднемноголетние характеристики стока взвешенных наносов крупнейших рек Сибири приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5. Сравнительная характеристика многолетних величин стока взвешенных наносов в замыкающих створах рек Обь, Енисей и Колыма

Характеристика	Река, замыкающий створ		
	Обь, Салехард	Енисей, Игарка	Колыма, Колымское-1 (мониторинг после введения горных работ и эксплуатации ГЭС) [Магрицкий, 2010, 2016]
SSC среднегодовое, г/м^3	37 [Gordeev, 2006], 41 [Магрицкий и др., 2019]	22 до сооружения Красноярской ГЭС [Магрицкий, 2019; Gordeev, 2006], 4 после [Вострякова, Подлипский, Широков, 1973; Михайлов, 1997]	150 (1977–1980) и 74 (1989–1997) [Магрицкий, 2009], 98 [Алексеевский, Магрицкий, Михайлов, 2015]
SSC в половодье, г/м^3	25–75 (максимальная 150) (по данным натурных измерений до 1977 г.)	>30 до сооружения Красноярской ГЭС (максимальная 190)	141 [Геоэкологическое состояние..., 2007]
SSC в летне-осеннюю межень, г/м^3	15–30 [Геоэкологическое состояние..., 2007]	5,5 и 2,7 (до и после сооружения ГЭС) [Геоэкологическое состояние…, 2007]	65 [Геоэкологическое состояние..., 2007]
SSC в зимнюю межень, г/м^3	5–10 [Геоэкологическое состояние..., 2007]	1,8 и 1,3 (до и после сооружения ГЭС) [Геоэкологическое состояние…, 2007]	13,4 [Геоэкологическое состояние..., 2007]
Годовой сток взвешенных наносов W_R, млн т	от 9,5 (1943) до 28,7 (2007) (по данным мониторинга Росгидромета), 16,4 [Магрицкий и др., 2019], 13,4 [Шамов, 1949], 15,8 [Lisitzyn, 1972], 16,5 [Gordeev, 2006; Walker, 1998], 5,7–25 (1938–1996) [Holmes et al., 2002]	11 [Шамов, 1949], 13,2 [Lisitzyn, 1972], 12,6 до сооружения 2,4 после [Вострякова, Подлипский, Широков, 1973; Михайлов, 1997], 12,4 до сооружения 4,9 [Магрицкий, 2010] после, 4,7 [Gordeev, 2006] после	14,0–15,7 (1977–1980) [Алексеевский, Магрицкий, Михайлов, 2015], 10,4–12,25 (по данным мониторинга Росгидромета 1936–2015)
Многолетние изменения, млн т год	+0,18 (к-т корреляции Спирмена 0,1 при *p*-уровне 0,41) [Магрицкий и др., 2019]		

Изменение W_R к дельте	+1% [Магрицкий, 2010]	+3,2% [Магрицкий, 2010]	+1,8 млн т [Алексеевский, Магрицкий, Михайлов, 2015]
Изменение W_R в дельте	Аккумуляция: 46–63% [Разумихина, Новожилова, 1983], 7,8 млн т [Разумихина, 1984]	Аккумуляция: 60% в межень и 7% в половодье [Алабян и др., 1991], 30–35% [Эстуарно-дельтовые системы…, 2007]	

Анализ данных мониторинговых, экспедиционных наблюдений и расчетных данных в дельте

Оценки стока взвешенных наносов на замыкающем створе г/п Кюсюр не отражают реальной величины их поступления в море Лаптевых, так как замыкающий створ находится более чем на 200 км выше вершины дельты Лены и на 350–400 км дальше от МКД. Также на этом участке сток взвешенных наносов трансформируется вследствие боковой приточности и эрозионно-аккумулятивных процессов в дельте.

Сток взвешенных наносов в дельте Лены изучался в ходе проведения множества экспедиций с середины XX в. На сегодняшний день доступны материалы экспедиционных исследований ААНИИ, МГУ, Тиксинской ЦГМС, ГГИ и 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., 2017, 2009; Чаркин и др., 2009; Alabyan et al., 1995; Ogneva et al., 2022; Rachold et al., 1996].

Существует свыше 20 оценок годового стока взвешенных наносов р. Лены в замыкающем створе, которые основаны как на данных сетевого мониторинга, так и на результатах экспедиционных исследований. По этим данным, годовой сток взвешенного вещества оценивается в диапазоне от 11,7 млн т [Лопатин, Федоров, 1947] до 27,4 млн т [Водные пути…, 1995].

Многолетние данные об изменении стока взвешенных наносов имеются лишь для Главного Русла и основных рукавов. Для многолетних колебаний стока взвешенных наносов в вершине дельты характерна цикличность: выделяются два периода – с пониженным (1967–1987) и повышенным (1968–2004) стоком [Magritsky et al., 2018] (рис. 1.12).

Однако эти колебания не совпадают с соответствующими периодами колебаний стока воды. Однозначный тренд увеличения или уменьшения среднемесячного стока взвешенных наносов в 1960–2005 гг. отсутствует [Magritsky et al., 2018], но наблюдается увеличение стока за период летне-осенней межени. В результате доля стока взвешенных наносов, проходящая в период половодья, снизилась с 82,7% в 1936, 1944 и 1960–1987 гг. до 64,8% в 1988–2010 г., а доля летне-осенней межени увеличилась с 16,8 до 34,9%.

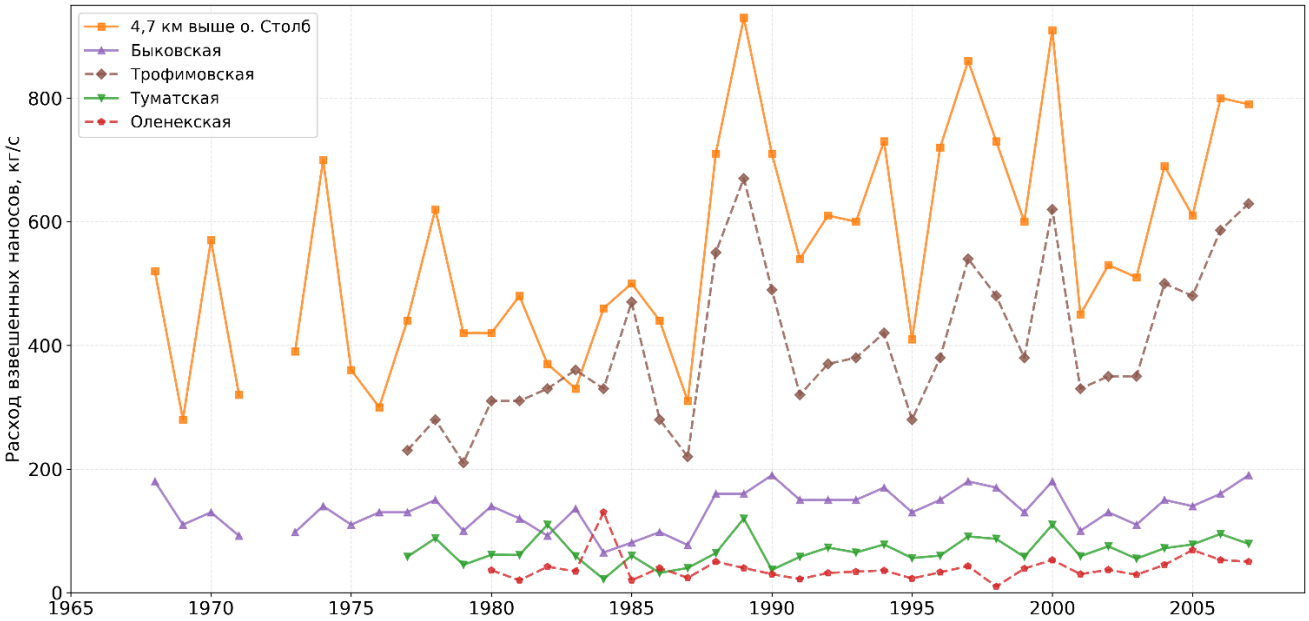


Рис. 1.12. Многолетние колебания стока взвешенных наносов на створах мониторинга в истоках рукавов с 1968 по 2007 г.

Поступление в дельту различных веществ зависит также от внутригодового распределения стока воды. Рахольд [Rachold et al., 1996] в своих работах привел результаты экспедиционных исследований за 1975–1981 гг., а также провел обобщение многолетних данных по стоку взвешенных наносов за весь период наблюдений на р. Лене, что привело к выводу: концентрация взвешенных веществ сильно зависит от времени года. Внутригодовое распределение расходов взвешенных наносов и концентрации взвешенных наносов подробно представлено в работе [Водные пути…, 1995]. Согласно таблице 1.6, в период половодья проходит ~75% годового стока взвешенных наносов. Средняя концентрация взвешенных наносов р. Лены на г/п Кюсюр составляет 50 мг/л. На летне-осеннюю межень приходится 23–25% от годового стока взвешенных наносов. Концентрация в этот период уменьшается до 23,5 мг/л. В периоды установления ледостава и зимней межени концетрация взвешенных наносов воды падает до 3 мг/л. На этот период приходится менее 1% годового стока взвешенных наносов.

Известно, что сток взвешенных наносов по главным рукавам дельты распределяется пропорционально стоку воды [Магрицкий, Михайлов, 2006], который представлен в предыдущем подразделе. В работе [Водные пути…, 1995] проведен анализ сетевых данных наблюдений, которые начались в 1968 г. в створе «4,7 км выше о. Столб» и в Быковской протоке, а с 1977 г. – в рукавах Трофимовская, Туматская и Оленёкская протоки. В целом расходы взвешенных наносов соответствуют распределению стока воды по рукавам. Исключение – Оленёкская протока, где при уменьшении суммарного расхода воды доля стока взвешенных наносов увеличивается (таблица 1.7).

Таблица 1.6. Внутригодовое распределение расходов взвешенных наносов *R* и концентрации взвешенных наносов *SSC* (данные по створу Кюсюр) [Водные пути…, 1995]

Характеристика	Распределение по месяцам											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
R, кг/с	6	3,7	2,4	2,3	165	4170	1790	894	750	253	16,2	8,7
R, %	0,1	0,1	0	0	2,0	51,7	22,3	11,1	9,3	3,1	0,2	0,1
SSC, г/м^3	2,3	1,9	1,6	1,9	21,4	56,5	44	32,1	31,1	17,8	4,7	3,1
	Распределение по сезонам											
	половодье				лето–осень				зимняя межень			
R, кг/с	2040				632				6,6			
R, %	76				23,5				0,5			
SSC, г/м^3	50,1				28,7				2,9			

Таблица 1.7. Распределение расходов взвешенных наносов по рукавам дельты Лены [Водные пути…, 1995]

Пост «4,7 км выше о. Столб»		Быковская протока		Трофимовская протока		Оленёкская протока		Туматская протока	
Q, м^3/с	*R*, кг/с	*Q*, м^3/с	*R*, кг/с	*Q*, м^3/с	*R*, кг/с	*Q*, м^3/с	*R*, кг/с	*Q*, м^3/с	*R*, кг/с
20 000	200	5000	50	13 400	230	600	20	375	7
40 000	1300	10 600	210	25 700	680	2600	70	2650	115
60 000	3100	18 000	800	36 400	1220	4900	140	6000	440
80 000	4950	25 400	1520	46 800	1740	7250	215	9250	850
100 000	6750	32 800	2240	57 000	2260	9500	300	12 600	1280

На режиме стока взвешенных наносов сказывается также сооружение водохранилищ. Вилюйское водохранилище (1967–1974) несильно повлияло на годовой сток взвешенных наносов Лены, однако сток р. Вилюй значительно уменьшился. Изменения режима стока ввзвешенных наносов отчетливо фиксируются только в период зимней межени [Никаноров и др., 2011]. Многолетние данные наблюдений указывают на снижение концентрации взвешенных наносов в водах Лены на г/п Кюсюр с 830 кг/с в середине XX в. до 670 кг/с к началу XXI в.

Суммарные потери взвешенных наносов в дельте Лены оцениваются в 83–90% [Alabyan et al., 1995], 70% [Коротаев, 1991], 40–65% [Magritsky et al., 2018b]. Активное накопление отложений в водотоках дельты Лены и на ее устьевом взморье требовало периодического дноуглубления с целью поддержания судоходных глубин [Водные пути…, 1995]. По данным [Peregovich, Hoops, Rachold, 1999], только 10–17% взвешенных наносов, фиксируемых на г/п Кюсюр, достигают моря Лаптевых по основным протокам дельты. Основная часть отложений аккумулируется на обширных дельтовых равнинах и в многочисленных протоках. На основе данных измерений российско-германской экспедиции «Лена-2013» [Widhalm et al., 2014] сделан аналогичный вывод, что в дельте Лены аккумулируется примерно 87% стока речных наносов.

По результатам сравнения карт, аэрофото- и спутниковых снимков, анализа морфологических изменений в восточной части дельты, частично по данным натурных измерений, авторы публикации [Rachold et al., 2000] делают вывод, что бóльшая часть наносов не оседает в дельте, а достигает моря. Некоторые исследователи указывают, что в пределах дельты р. Лены происходит повышение стока наносов [Григорьев, 1993].

Новое, более масштабное сравнение карт и снимков не подтверждает и не опровергает этот вывод [Кравцова, Инюшин, 2019], свидетельствуя лишь о стабильности МКД. В работе [Чалов, Прокопьева, 2021] анализировались различия в значениях коэффициента отражения (на снимках Landsat за 2000–2019) для участков в вершине дельты и устьях главных рукавов. Обнаружено увеличение коэффициента отражения в Быковской и Сардахской протоках и его уменьшение в Оленёкской и Туматской. Основная причина – добавление в поток наносов от термоэрозии берегов южной экспозиции и относящихся к Ледовому комплексу в теплую и солнечную погоду. Это согласуется с данными М.Н. Григорьева, оценившего массу наносов, поступающих в рукава с таких берегов (по 42 участкам общей длиной 76,6 км), в 2,15 млн т год [Григорьев, 2008].

Режим продольного изменения стока взвешенных наносов в дельте Лены в настоящее время охарактеризован на основе эпизодических измерений.

В работе [Коротаев и др., 1990], основанной на итогах экспедиций русловой партии МГУ в дельте Лены в 1979–1981 гг., представлены результаты комплексных гидрологических и русловых работ. Отмечается, что по длине Быковской протоки при расходах воды выше 60 000 $м^3/с$ происходит уменьшение расходов взвешенных наносов, а при расходах менее 50 000 $м^3/с$ сток взвешенных наносов изменяется следующим образом: в 30–55 км от устья Быковской протоки расходы наносов выше в 1,5–2 раза, чем в истоке, а перед выходом в море расходы наносов резко уменьшаются из-за перераспределения стока Быковской протоки во второстепенные протоки. Об изменении в Трофимовской протоке известно, что от истока рукава к устью происходит 13-кратное уменьшение расходов наносов (от 850 кг/с до 66 кг/с), а концентрация взвешенных наносов падает в 2,6 раза – от 88 до 33 мг/л.

В работе [Гуков, 2001] подводятся итоги гидробиологических исследований проток дельты совместно с Тиксинской ЦГМС в 1980–1990-х гг. в устьях Оленёкской и Быковской поток. Сделаны выводы, что осаждение взвешенных наносов происходит на устьевом взморье. В Быковской протоке аккумуляция взвешенных наносов наблюдается при разделении Быковской протоки на Исполатова, Герасимовскую и Синицынскую – перед впадением в залив Неелова.

С конца 1990-х гг. проводились серии российско-германских экспедиций «Система моря Лаптевых». В 1994 г. с 5 июля по 3 августа на участке от г. Якутска до залива Неелова было отобрано свыше 20 интегральных проб на 24 станциях, четыре из которых располагались в пределах дельты Лены [Expedition to the Lena River…, 1995]. В самой дельте пробы были

отобраны с 23 по 25 июля 1994 г., когда расходы по г/п Кюсюр менялись от 35 400 м^3/с до 34 200 м^3/с. В створе «4,7 выше о. Столб» средняя концентрация взвешенных наносов на основе трех интегральных проб составила 13,5 мг/л. В Оленёкской протоке концентрация возросла до 37,2 мг/л. Высокие значения концентрации взвешенных наносов зафиксированы и в Трофимовской протоке – 33,8 мг/л. И наоборот, в Быковской протоке концентрация в истоке составляла 10,9 мг/л и убывала до 8,7 мг/л на участке залива Неелова.

В 1998 г. экспедиционные исследования проводились в дельте в июле–августе [Russian-German Cooperation…, 1998]. Отбор проб для определения концентрации взвешенных наносов проводился с 25 июля по 13 августа. Расходы воды по данным г/п Кюсюр в этот период снижались с 36 200 м^3/с до 26 600 м^3/с. По результатам отбора проб концентрация взвешенных наносов в Главном Русле Лены у о. Столб составляла 16 мг/л у поверхности и 18 мг/л в придонном слое. В трех протоках концентрации продольно увеличивались. Например, в устье Оленёкской протоки концентрация взвешенных наносов составила 20 мг/л (у поверхности и дна), в вершине Туматской протоки увеличивалась до 20 мг/л в поверхностном и до 40 мг/л в придонном слое; аналогичные значения зафиксированы в верхней части Трофимовской протоки. В устьевой зоне Быковской протоки до разделения на рукава концентрация составляла 10 мг/л у поверхности и 15 мг/л в придонном слое.

Экспедиции в дельту Лены продолжались и в начале 2000-х гг. В монографии [Большиянов и др., 2013] проводится обзор экспедиционных материалов о стоке взвешенных наносов за 2002 г. По результатам съемки 7 августа 2002 г. при расходе воды 24 100 м^3/с по г/п Кюсюр концентрация взвешенных наносов Быковской протоки возрастала от 12 мг/л до 23 мг/л в Сардахской протоке. Приводятся данные, что в Трофимовской протоке концентрация взвешенных наносов изменяется от 15,0 до 33 мг/л, в то время как концентрация в Сардахской протоке была несколько выше – до 40 мг/л. Концентрация взвешенных наносов в Сардахской протоке увеличивается за счет интенсивных разрушений ее берегов, представленных выходами Ледового комплекса, который представляет собой толщу поздненеоплейстоценовых отложений, сформировавшуюся в середине–конце позднего неоплейстоцена (50–17 тыс. лет назад). Он сложен переслаивающимися горизонтально-слоистыми песками, алевритами и растительными остатками (моховым торфом и органической слоёнкой) и пронизан мощными полигонально-жильными льдами шириной до 20 м и высотой до 20 м [Большиянов и др., 2013]. Также в этой протоке располагается крупнейшее обнажение многолетнемерзлых пород на о. Собо-Сисё.

В 2005 г. с 15 по 27 августа проведены масштабные измерения концентрации взвешенных наносов в главных рукавах дельты при расходах воды по г/п Кюсюр 27 200–36 000 м^3/с. Всего получено 15 значений. Так, в вершине дельты в створе «4,7 км выше о. Столб» по данным отбора проб 24 августа 2005 г. средняя концентрация взвешенных наносов по профилю составила

30,5 мг/л. В Быковской протоке днем ранее концентрация взвешенных наносов составляла 30,0 мг/л, а в Туматской – 31,7 мг/л. Вдоль Трофимовской протоки отбор проб воды проводился два раза: 23 августа отмечалось продольное увеличение концентрации взвешенных наносов от 22,0 мг/л в истоке Трофимовской протоки до 33,9 мг/л в Сардахской, а 25 августа, наоборот, концентрация взвешенных наносов продольно уменьшалась от 29,8 мг/л до 23,7 мг/л в 30 км от МКД. Вдоль Оленёкской протоки измерения проводились раньше – с 15 по 20 августа. В устье Оленёкской протоки отбор проб проводился один раз в день в течение трех дней, и концентрация взвешенных наносов составила 17,5 мг/л – 15 августа, 15,9 мг/л – 16 августа и 39,2 мг/л – 17 августа. По длине Оленёкской протоки в течение двух дней отбора чередовались участки с увеличением до 32,9 мг/л и уменьшением концентрации взвешенных наносов до 20,1 мг/л [Russian-German Cooperation…, 2005].

В 2006 г. проведен маршрут от о. Самойловский по одной из центральных проток дельты – Туматской [Большиянов и др., 2013]. Установлено, что концентрация взвешенных наносов в Туматской протоке закономерно уменьшалась от центральной части дельты к МКД за период с 2 по 8 июля 2006 г. (расходы воды по г/п Кюсюр от 64 000 до 55 300 $м^3/с$). Если у о. Самойловский концентрация взвешенных наносов составляла 46 мг/л, то у МКД Туматской протоки была в два раза меньше – 22,4 мг/л. Обнаружено, что на изменение концентрации взвешенных наносов у МКД в Туматской протоке сильное влияние оказывают приливные явления. В период прилива концентрация взвешенных наносов составляла 15,8 мг/л, в период отлива – 25,8 мг/л (10 июля 2006 г.).

В работе [Федорова и др., 2017] приводятся данные натурных измерений в Оленёкской протоке в июле 2016 г. Измеренная концентрация взвешенных наносов в истоке протоки Оленёкская составляла 19,9 мг/л и постепенно увеличивалась к устью протоки до 29,2 мг/л. В устьевой зоне концентрация взвешенных наносов падала до 24,6 мг/л.

По результатам исследований [Ogneva et al., 2022], проведенных на участке Трофимовской и Сардахской проток 7–9 августа 2019 г., наблюдается чередование участков с повышением и понижением концентрации взвешенных наносов. Так, в истоке Туматской протоки концентрация взвешенных наносов составляет 20,0 мг/л и постепенно уменьшается до 16,4 мг/л до впадения в Сардахскую протоку, где концентрация снова увеличивается до 19,4 мг/л и у МКД уже падает до 18,8 мг/л.

Последние исследования в дельте Лены проведены 10–15 августа 2022 г. сотрудниками географического факультета МГУ [Магрицкий и др., 2023] с участием автора диссертации. Измерения расходов и отбор проб воды пришлись на летне-осеннюю межень с наложением дождевых паводков, поэтому измеренная в поверхностном слое концентрация взвешенных наносов была сравнительно небольшой – 12–24 мг/л, с минимумом в Булкурской протоке (3,6

мг/л) и максимумом в активной протоке между островами Сасыл-Ары и Буор-Хая-Кумага (32,1 мг/л). По длине Оленёкской и Туматской проток концентрация взвешенных наносов снижалась (соответственно в 1,5 и 1,1 раза), а в ходе промеров в Быковской протоке 11 августа установлено, что концентрация взвешенных наносов продольно увеличивалась от о. Столб к заливу Неелова. По ежедневным отборам проб у о. Самойловский сделаны выводы, что распределение концентрации взвешенных наносов быстро меняется в зависимости от синоптических условий: возрастание скорости ветра может увеличивать содержание взвешенных наносов в потоке за счет взмучивания донных отложений.

В предыдущей оценке транспорта и аккумуляции взвешенных наносов в дельтах Арктики [Hines, Piliouras, 2024] отмечено, что от 10 до 70% взвешенных наносов аккумулируется в дельтах арктических рек в течение периода открытой воды. В данной работе также выявлено, что в крупных дельтах со сложным гидрографическим строением процессы аккумуляции протекают активнее, что определяет их устойчивость к эрозионным процессам, связанным с разрушением дельтовых берегов. Таким образом, согласно оценкам авторов, в дельте р. Лены аккумулируется 55,1% стока взвешенных наносов, то есть в вершине дельты W_R составляет 21,3 млн т, а в устьевых створах рукавов суммарный W_R уменьшается до 9,6 млн т.

На основе имеющихся многочисленных данных о стоке взвешенных наносов реки в море Лаптевых, его распределении по рукавам дельты и продольном изменении вдоль магистральных рукавов сделаны попытки моделирования транспорта взвешенных наносов. Однако все результаты исследований основаны на разовых, эпизодических измерениях или не учитывают местные гидродинамические условия и дополнительные источники наносов, что обусловливает противоречивость полученных выводов в предыдущих исследованиях.

1.3.3. Гидрологический режим устьевой зоны моря Лаптевых

Уровень моря Лаптевых – один из основных факторов, влияющих на гидролого-морфологические процессы в дельте Лены [Макаров, 2009]. За последние 100 лет средний уровень Мирового океана повысился примерно на 20 см, что, в первую очередь, связано с тепловым расширением морской воды, таянием ледников, а также изменением объема грунтовых вод [Church et al., 2011; Oppenheimer et al., 2019]. В недавних оценках приводится, что таяние антарктического ледяного щита при сценарии RCP8.5 приведет к повышению уровня Мирового океана на величину от 0 до 1,4 м [DeConto, Pollard, 2016; Golledge et al., 2019; Kopp et al., 2017]. Согласно сценариям SSP 1–1,9, 2–4,5 и 5–8,5, вклад ледяных щитов в повышение уровня Мирового океана к 2150 г. составит 0,2 ± 0,01, 0,5 ± 0,01 и 1,4 ± 0,1 м соответственно [Park et al., 2023].

По данным последних исследований [Куликов, 2023], основанных на интеграции натурных измерений и результатов моделирования, в западной части моря Лаптевых величина сизигийного прилива в несколько раз больше, чем в восточной части моря. Полусуточный прилив преобладает во всех частях моря Лаптевых, однако в его центральной части (в районе дельты Лены) вклад суточных приливов становится также заметным. Так, прилив для бухты Тикси и в Оленёкском заливе становится смешанным полусуточным, и его величина не превышает 50 см (рис. 1.13).

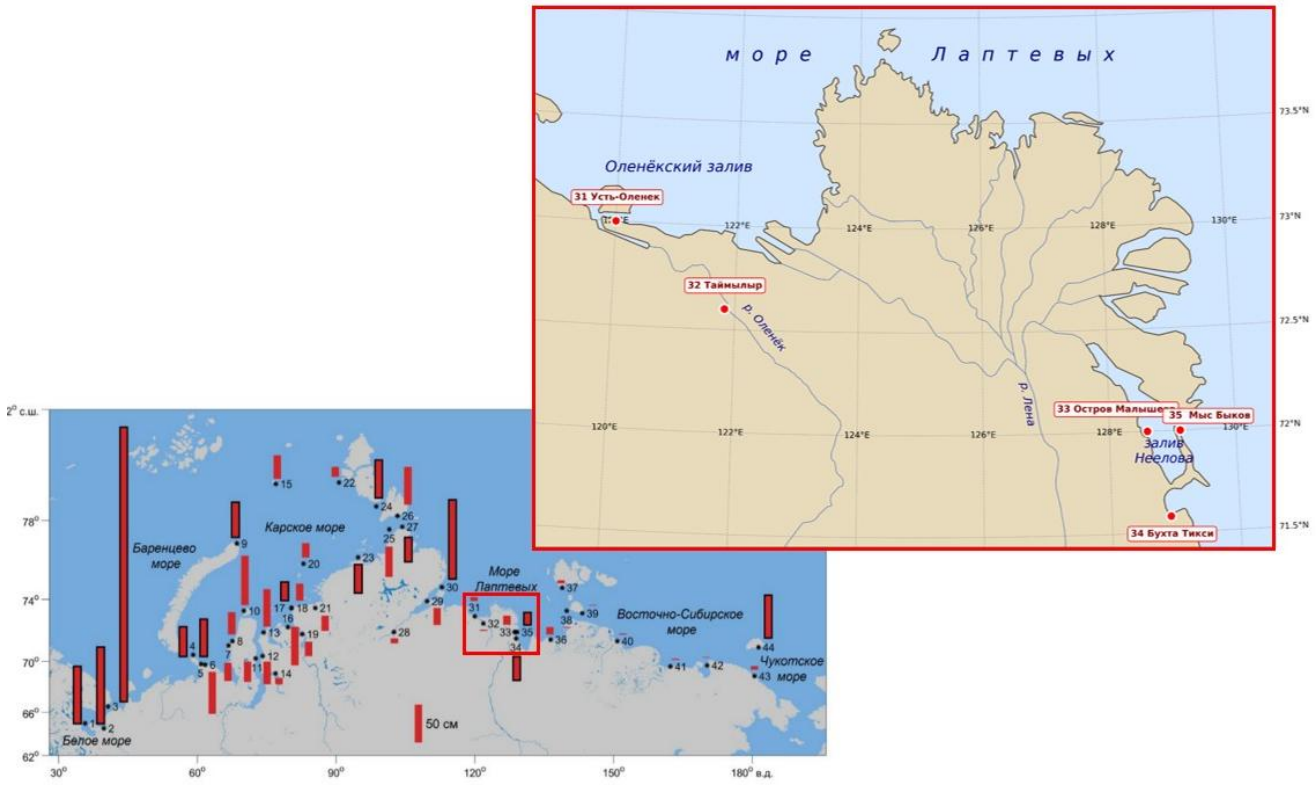


Рис. 1.13. Средняя величина полусуточного сизигийного прилива R_{spr} (см) и расположение станций в районе дельты Лены. Столбцы, выделенные черной границей, соответствуют значениям, построенным по многолетним данным

Например, в западной части Российской Арктики (Белое и Баренцево моря) величина прилива может достигать 10 м в сизигию (Мезенский залив в Белом море). Вдоль побережья Карского моря и морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского величина приливов практически нигде не превышает 1–1,5 м (исключением является Хатангский залив в море Лаптевых). По данным мониторинга, на ближайших к дельте Лены постах средняя величина прилива не превышает 31,2 см (бухта Тикси), а в восточной части дельты в устьевой зоне Быковской протоки – менее 5,3 см, в западной части в 20 км от устьевой зоны Оленёкской протоки – менее 16,4 см [Куликов, 2023].

Наличие подвижного ледяного покрова в течение года приводит к сезонной изменчивости гармонических постоянных прилива в арктических морях [Войнов, 2016]. В зимнее время (для моря Лаптевых с ноября по апрель) уменьшается величина приливов за счет взаимодействия приливной волны со льдом (особенно припаем) [Прошутинский, 1993]. Сезонные колебания прилива в работе [Kulikov et al., 2024] оценивались только для станций с многолетним мониторингом – ближайшая к дельте Лены станция расположена в бухте Тикси. Здесь сезонная величина среднего сизигийного прилива максимальна весной (в мае) и достигает 39,9 см, а минимальное значение отмечается в декабре и составляет 27,6 см. Например, в акватории Обской губы на станции Тадибе-Яха сезонный размах достигает максимальных значений (54,5 см).

Для моря Лаптевых характерны сгонно-нагонные явления. Величина сгонно-нагонных колебаний уровня может достигать 1–2 м, а в районе бухты Тикси может превышать 2,5 м [Куликов, 2023]. Наиболее мощные и частые явления наблюдаются в осенний период, чему способствуют устойчивые и сильные ветры.

Море Лаптевых, и в частности бухта Тикси, лидирует по количеству штормовых нагонов и сгонов [Куликов, 2023]. Здесь в среднем за год фиксируется до 44 событий с величиной >40 см. Кроме того, на станции в бухте Тикси отмечено рекордное число экстремальных случаев – 175, из которых 63 превысили 100 см. Для сравнения, на острове Врангеля в Чукотском море среднегодовое количество штормовых нагонов не превышает семи, а экстремальных – трех.

Результаты моделирования за период 1980–2000 гг. позволяют проследить проявления приливных и сгонно-нагонных колебаний уровня на устьевом взморье Лены [Куликов, 2023]. Величина среднего сизигийного прилива увеличивается при движении от МКД Быковской протоки к МКД Туматской протоки (в среднем от 41 до 69 см, максимальные величины – от 69 до 103 см) и снова уменьшается к МКД Оленёкской протоки, где величина сопоставима с Быковской протокой (в среднем от 7 до 41 см, максимальный от 24 до 71 см). Величина штормовых нагонов увеличивается от побережья Быковской протоки к Туматской и достигает максимума в Оленёкской протоке, где величина нагона может быть >150 см. Аналогичные закономерности установлены и для сгонных явлений.

В среднем вклад приливных колебаний увеличивается до 40% на северном побережье дельты (МКД Туматских проток). Минимален (<10%) вклад сгонно-нагонных колебаний для МКД Быковской и Оленёкской проток.

За последние десятилетия прослеживается стремительное сокращение площади морского льда в морях Северного Ледовитого океана, в том числе и в море Лаптевых: с 2000 г. темпы увеличились почти в два раза [Matveeva, Semenov, 2022]. Сезонное таяние льда в море Лаптевых начинается в мае–июне, минимальные площади льда отмечаются в сентябре, после морской лед быстро восстанавливается в течение двух последующих месяцев. В 2000–2019 гг. площадь

морского льда сократилась на 19% (105 тыс. км^2) по сравнению с 1979–1999 гг. [Matveeva, Semenov, 2022]. Продолжительность безледного периода статистически значимо увеличилась в 1979–2019 гг. как в открытом море, так и в прибрежной зоне моря Лаптевых, в том числе и на устьевом взморье Лены. Увеличение продолжительности безледного периода происходит как из-за смещения дат начала таяния морского льда на более ранние сроки (средняя скорость изменений –9,5 сут/10 лет), так и за счет смещения дат начала замерзания морского льда на более поздние сроки (средние темпы изменений +6,7 сут/10 лет). Оба эти процесса вносят равный и сопоставимый вклад в продолжительность безледного периода [Shabanov et al., 2024].

В пределах всей устьевой зоны Лены даты начала таяния морского льда, в среднем, смещаются на +6 сут за 10 лет – это максимальные тренды для моря Лаптевых. Однако для устьевой зоны отмечаются более слабые, по сравнению с открытой акваторией моря Лаптевых, тенденции изменения даты установления льда. Например, в восточной части устьевой зоны тренды даты установления морского льда составляют до –6 сут/10 лет в Оленёкском заливе. Лед сходит в среднем 2 июля в восточной и северной частях устьевой зоны, а устанавливается в среднем 1 октября. Общая продолжительность безледного периода выше для восточной части устьевой зоны, куда попадает основная часть стока р. Лены. По мнению авторов [Shabanov et al., 2024], увеличение речного стока и температуры речной воды в период зимней межени и половодья приводит лишь к незначительному смещению дат таяния морского льда на более ранние сроки и увеличению общей продолжительности безледного периода.

1.4. Особенности формирования дельты р. Лены

1.4.1. Эволюция дельты

Среди многообразия устьев рек арктического региона устьевая область р. Лены отличается сложной полигенетической историей формирования. Современный вид дельта приняла в голоцене в ходе заполнения залива речными наносами. На ее облик также оказали влияние процессы речной эрозии и морской абразии дельтовых берегов в условиях колебаний уровня моря Лаптевых и тектонических движений земной коры [Большиянов и др., 2013; Are, Reimnitz, 2000].

Вопросы происхождения и развития дельты р. Лены подробно рассмотрены в коллективной монографии [Большиянов и др., 2013], обобщающей многолетние исследования. В развитии дельты можно выделить три этапа: 1) дочетвертичный период, связанный в первую очередь с формированием залива в максимальную стадию постледниковой трансгрессии; 2) четвертичный период формирования дельтовой поймы и дельт выполнения долинных заливов и 3) формирование дельтовой поймы и дельты выдвижения в голоцене (рис. 1.14).

Дочетвертичный период. В период трансгрессии моря в пределах нынешней территории дельты Лены, обрамленной кряжем Чекановского и Хараулахским хребтом, располагались

коренные эрозионные останцы – острова Столб, Америка-Хая, Сардах и обширная морская терраса или останец аллювиально-морской равнины – остров Арга-Муора Сисё. Образование этих элементов рельефа происходило на морском мелководье из наносов, принесенных рекой. Затем о. Арга-Муора Сисё был поднят тектоническими движениями и с тех пор разрушается под влиянием речных и морских процессов. В период позднего плейстоцена между 43 и 14 тыс. лет назад на территории современной дельты сформировались отложения Ледового комплекса [Schwamborn, Rachold, Grigoriev, 2002]. Эти отложения образовались на шельфе моря Лаптевых и в Северо-Сибирской низменности и относятся ко времени позднеплейстоценовой регрессии [Alekseev, 1997; Sher, 1995; Romanovskii et al., 2000]. Отложения Ледового комплекса в регионе рассматриваются как остатки позднеплейстоценовой аккумулятивной равнины [Sher, 1999].

Современный облик дельты р. Лены начал складываться *в четвертичный период,* в период стабилизации уровня моря. В этот период свою нынешнюю форму приняли крупнейшие останцы Ледового комплекса в дельте р. Лены на островах Собо-Сисё (Трофимовская протока), Курунгнах, Джангылах-Сисё и Харданг-Сисё (последние три находятся по правому берегу Оленёкской протоки), вследствие быстрой трансгрессии и затопления, последующей механической и термической эрозии обширных частей Ледового комплекса [Большиянов и др., 2019; Are, Reimnitz, 2000]. Сейчас эти немногочисленные сохранившиеся формы представляют собой останцы позднеплейстоценовых отложений. Примерно в этот же период началось заполнение заливов и образование Оленёкской и Туматских проток (возраст отдельных форм достигает 9 000 лет).

Тектонический разлом, разделяющий дельту на две части (западную и восточную), и отмечающиеся здесь движения земной коры обусловили образование тектонического перекоса дельты с запада на восток. Разница в скоростях движений между западной и восточной частями составляла приблизительно 1 мм/год [Большиянов и др., 2019]. Изменение уклонов и занесение наносами западной части, а также постепенное разрушение останцов Ледового комплекса (который частично разрушился лишь в самом конце голоцена ~1 500 лет назад) определили продолжение формирования дельты в восточном направлении, где вследствие аккумуляции наносов образовались более молодые рукава и протоки дельты – сначала Трофимовская протока (4 000 лет назад), после – Быковская протока (до 1 500 лет назад) [Коротаев, 1984].

В современную эпоху (последние 2000 лет) скорости движения между восточной и левой частью дельты увеличились до 2 мм/год, что было выделено по разнице высот первой террасы дельты. Это привело к разному высотному положению поверхностей Ледового комплекса и первой террасы, а также определило современное развитие геоморфологических процессов.

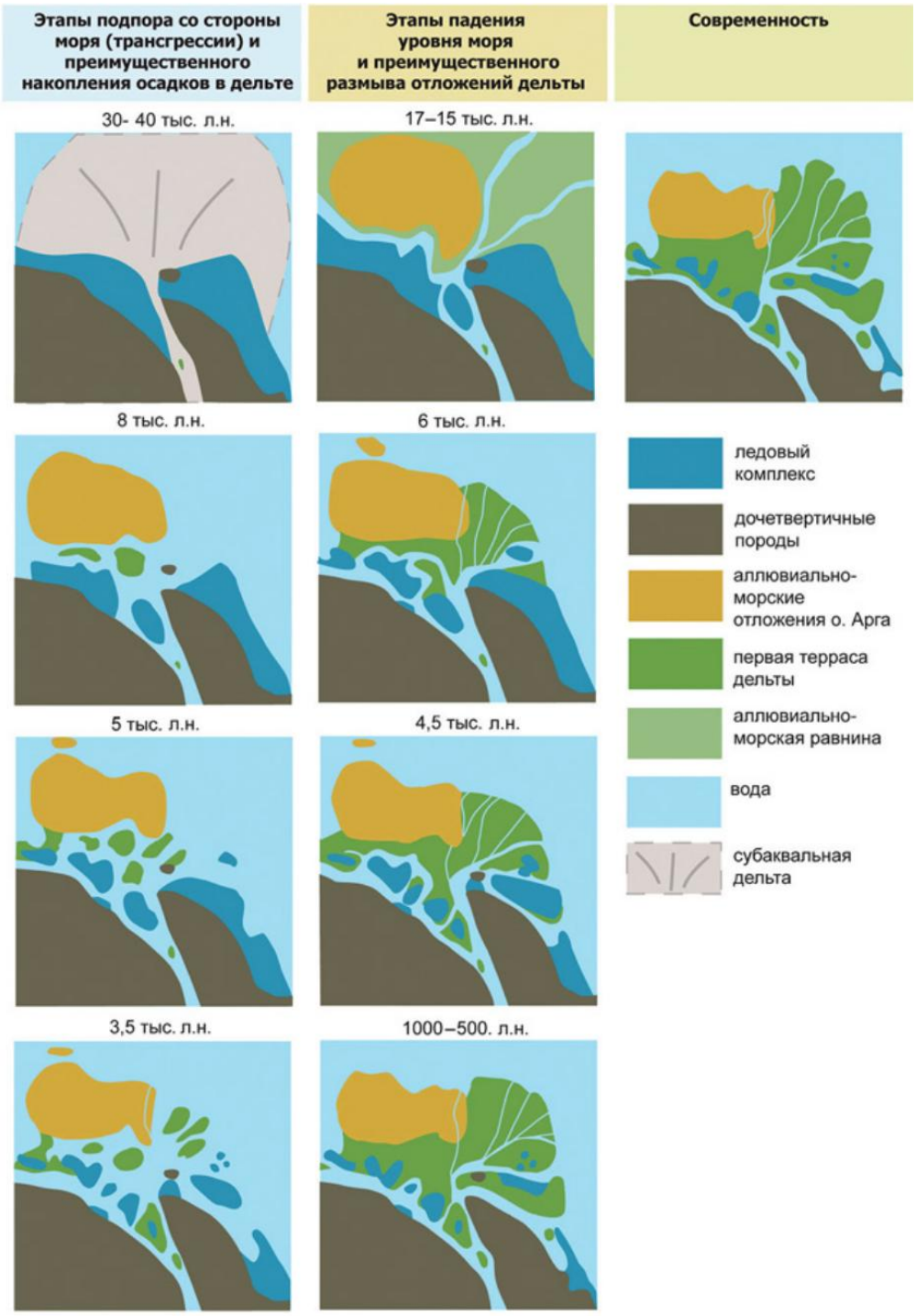


Рис. 1.14. Этапы формирования дельты р. Лены по [Большиянов и др., 2013]

1.4.2. Геоморфологическая характеристика дельты

Согласно выводам, приведенным в монографии [Григорьев, 1993], дельту Лены можно разделить на три геоморфологические надпойменные террасы (3-я – поверхность, сложенная породами Ледового комплекса, 2-я – сложена песками о. Арга-Муора-Сисё, 1-я – надпойменная терраса, сложенная алевритом и песком, в разной степени обогащенными растительными остатками, зачастую полностью вымещающими минеральную часть, и пойменные массивы (рис. 1.15).

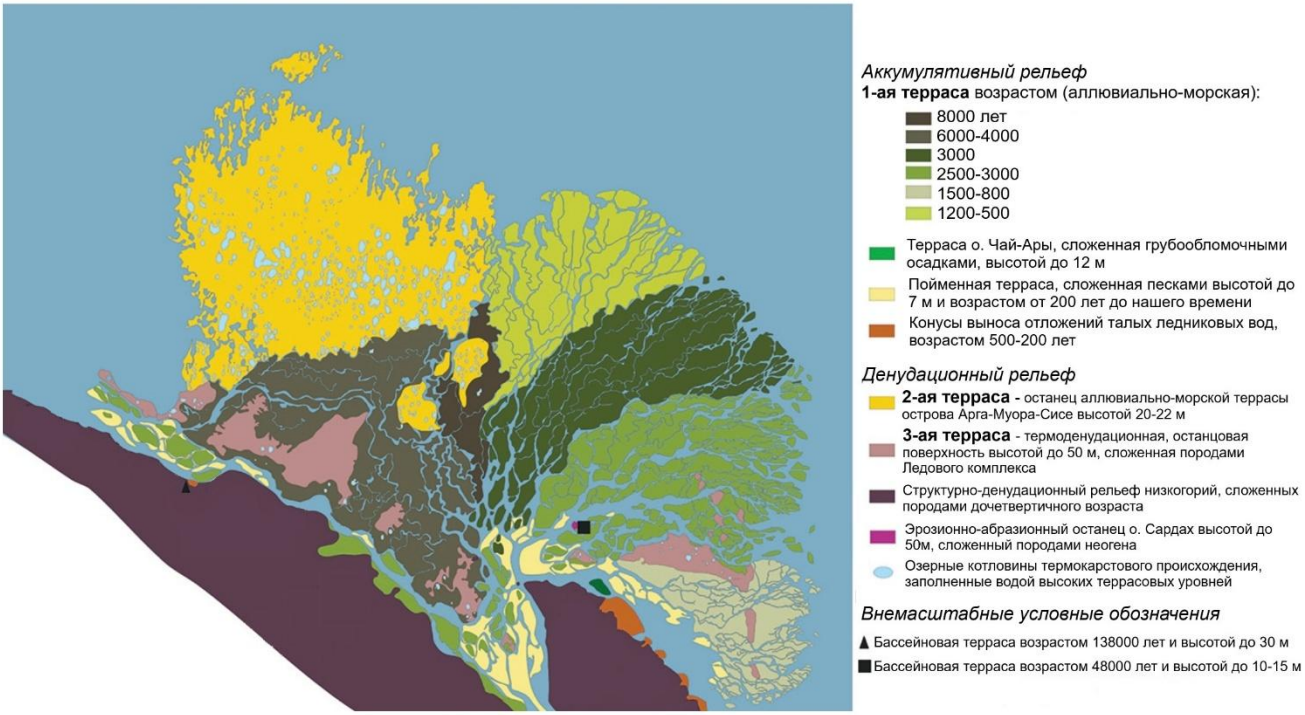


Рис. 1.15. Геоморфологическая карта дельты Лены (адаптирована и составлена по данным из [Большиянов и др., 2013])

Первая терраса, включающая поймы, охватывает основную часть восточного сектора дельты между протоками Туматской и Быковской. Предполагается, что эта терраса представляет собой «активную» дельту. Однако возраст и высоты первой террасы различаются в отдельных частях дельты. Центральная часть дельты, образовавшаяся ~8 тыс. лет назад, имеет высоты 10–12 м (например, о. Самойловский и Тит-Ары) [Makarov, Fedorov, Fedorova, 2006]. По направлению к МКД высота острова возрастом до первых сотен лет уменьшается до 0,5–1 м. Первая терраса состоит из насыщенных льдом аллювиальных отложений и богатых органикой песков на дне до илисто-песчаных торфов ближе к поверхности [Schwamborn, Rachold, Grigoriev, 2002]. Частично острова первой террасы сложены песками, но преимущественно состоят из органоминеральных слоистых отложений (слоёнки) [Большиянов и др., 2013]. Основная черта этих отложений – горизонтальная, редко волнистая слоистость, содержащая растительные включения, в разной степени обогащенные песчаными и илистыми частицами (до 10–15%), состоящими из неразложившихся мхов, обломков осоки и других растений, а также древесными остатками, в которых основную долю (до 90–100%) составляют остатки мохового растительного детрита [Bolshiyanov, Makarov, Savelieva, 2015].

Количество минеральных отложений в слоёнке очень различно от разреза к разрезу. Прослеживается закономерное уменьшение песчаных отложений в составе островов первой террасы при движении от вершины дельты (содержание песчаной фракции в слоистых отложениях о. Тит-Ары составляет 30–40%) к МКД, где содержание песка в береговых

отложениях <10%. Острова первой террасы также имеют высокое содержание льда (>50 мас. %) и представлены субаэральными или погребенными ледяными жилами высотой до 10–12 м и шириной до 2–3 м (максимальные мощности отмечаются в центральной части дельты) [Schwamborn, Rachold, Grigoriev, 2002]. Развитие ледяных жил приводит к формированию сети мерзлотных тундровых полигонов на поверхности островов. Среднее содержание льда в верхнем метре первой террасы составляет >65% [Zubrzycki et al., 2013], а толщина активного слоя первой террасы достигает примерно 30–50 см.

Например, в уступе размыва на о. Самойловский читаются две пачки слоёнки, мощность которых достигает 2,6 м. Верхняя пачка слоёнки (2,5 м) состоит из мхов, веток кустарников и прослоев серых алевритовых песков (<10%). Слоёнка подстилается с глубины 4,85–4,90 м песчаным прослоем и переслаиванием песков с растительными остатками, оценка которых по объему в отложениях составляет 10–15%. Текстура отложений горизонтально- и волнисто-слоистая. Волнистость особенно четко видна на глубине 2,9 м.

Западный сектор дельты между протоками Туматской и Оленёкской состоит в основном из песчаных островов, из которых остров Арга-Муора-Сисё – самый крупный и образующий вторую террасу. Совместно с островом Джипириес-Сисё общая площадь островов второй террасы достигает 10 км^2, а высоты их поверхностей – 30 м. Поверхность острова ровная, с перепадами высот до 10 м, сильно изъеденная термокарстовыми озерами и аласами, ориентированными длинными осями с северо-северо-востока на юго-юго-запад. Наибольшая степень заозеренности характерна для центральной части острова Арга-Муора-Сисё, где в пределах субширотного пояса на долю озер приходится ~50% площади. Здесь глубина озер достигает 30 м (оз. Николай-Кюеле). В связи с отсутствием в толще песков, слагающих эти острова, крупных ледяных жил и вообще крупных скоплений льда есть трудности в объяснении происхождения озер, природа которых явно связана с вытаиванием льда.

Песчаные толщи, покрытые Ледовым комплексом, образуют третью террасу, которая расположена на 30–55 м над уровнем моря. Понятие Ледовый комплекс применяется к многолетнемерзлым породам, состоящим из мелкозернистых лёссовидных отложений и алевритов, богатых органикой и растительными остатками [Большиянов и др., 2019]. Отличительная черта таких отложений – высокое содержание сегрегированного льда (>20%) [Fuchs et al., 2020] и полигональных ледяных жил высотой и шириной в несколько метров, достигающих мощности 20–30 м [Григорьев, 1993]. В работе [Fuchs et al., 2020] приводятся данные, что плотность минеральной части таких отложений составляет 2,65 г/см^3. Отложения Ледового комплекса распространены на островах вдоль Оленёкской протоки (Курунгнах, Джангылах-Сисё и Харданг-Сисё) и между Трофимовской и Быковской протоками (Собо-Сисё). Третью террасу можно разделить на две области из-за значительной разницы высот (20 м) между

западной и восточной частями дельты [Pavlova, Dorozhkina, 2000; Григорьев, 1993]. Эта особенность определяет расположение Ледового комплекса на о. Собо-Сисё относительно уреза водной поверхности.

Пойменные массивы распространены повсеместно вдоль всех проток и рукавов дельты. Высоты поймы, как и островов первой террасы, постепенно уменьшаются от центральной части к МКД: от 10 м (высокая пойма) до 9 м (низкая), до 0,3–0,5 м в прибрежных частях дельты [Большиянов и др., 2013]. Низкая пойма представлена песками и не успевает за короткий вегетационный период закрепиться растительностью. Ледяные жилы также не развиваются. Содержание льда в верхнем метре поймы составляет ~35% [Zubrzycki et al., 2013], толщина активного слоя на этой поверхности может достигать более 1 м. Высокая же пойма редко заливается водой. Она часто полностью освоена растительностью. Местами начинает закладываться сеть мерзлотных полигонов.

Преимущественным ландшафтом является влажная тундра с доминированием осок и мхов (28,5% всей площадь дельты) – ими покрыта высокая пойма. Влажные участки мохово-травяной тундры составляют 7,5% и занимают в основном участок второй надпойменной террасы, которая представлена Ледовым комплексом. Кустарничковая тундра и подвиды сухой (осоково-моховая, травяная и кочкарная) тундры до 16% – такие ландшафты расположены на о. Арга-Муора-Сисё. Площадь участков низкой и средней поймы, не занятых растительностью, составляет ~10% (с учетом песчаных банок и отмелей в протоках и вдоль побережий). В южной части о. Тит-Ары с 2006 г. фиксируются островки лиственницы [Schneider, Grosse, Wagner, 2009].

1.4.3. Состояние многолетнемерзлых пород

Суровость арктического климата способствует сплошному распространению многолетней мерзлоты толщиной ~500–600 м [Boike et al., 2013]. Толщина активного слоя в летний период (с конца мая до начала сентября) составляет 30–50 см и отражается на интенсивности и специфике гидролого-морфологических процессов, развитии криогенных форм рельефа и особенностях литологии дельтовых островов.

На сегодняшний день доступны данные мониторинга температуры многолетнемерзлых пород (ММП) в скважине, пробуренной в полигональной тундре на о. Самойловский, в которой была установлена цепь из 24 датчиков температуры на поверхности – 0,00 м и на глубинах: 0,75; 1,75; 2,75 … (далее через каждый 1 м) ... 18,75; 20,75; 22,75; 24,75; 26,75 м [Boike et al., 2019c]. Данные о температуре загружены через базу данных Глобальной наземной сети по многолетней мерзлоте (GTN-P). Непрерывные измерения ведутся с 24.08.2006 с дискретностью 1 час. На сегодняшний день доступны данные до 20.09.2021. В наборе данных отсутствуют значения за

холодный период для 2006, 2008, 2009, 2021 гг. При анализе данных также установлено, что отсутствуют данные с 1 августа по 30 декабря 2015 г.

С учетом пропусков за 2006, 2008, 2009, 2015 и 2021 гг. проанализированы среднегодовая температура мерзлоты на глубинах от 0 м до 26,75 м (рис. 1.16). С 2007 по 2020 г. отмечается повышение среднегодовой температуры за год на всех горизонтах. Максимальное значение среднегодовой температуры на глубине 0,75 м было зафиксировано в 2017 г. и составило –2,67 °С. Минимальная среднегодовая температура (–9,54 °С) была зафиксирована на глубине 0 м в 2007 г.

Анализ среднегодовых значений показывает статистически значимое (по коэффициенту Спирмена, при $p < 0,05$) стремительное увеличение температуры грунтов на всех глубинах (таблица 1.8). Максимальные тренды характерны для верхних горизонтов (4,75 °С/10 лет на 0,75 м). Значения декадных трендов равномерно уменьшаются по глубине и на отметке 26,75 м достигают 1,00 °С/10 лет. За исследуемый период среднегодовая температура по всему профилю в среднем увеличилась на 3,25 °С, что составляет 2,64 °С/10 лет.

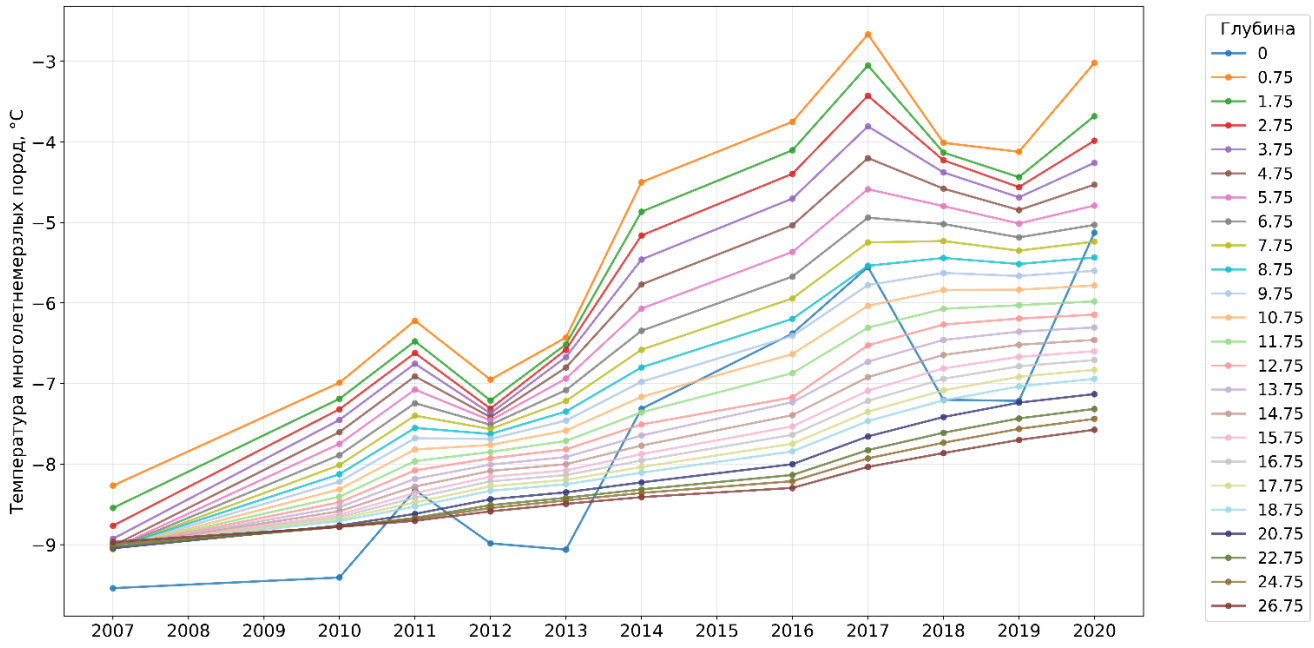


Рис. 1.16. Изменение среднегодовой температуры мерзлоты на разных глубинах по данным скважины на о. Самойловский с 2007 по 2020 г.

Таблица 1.8. Характеристика многолетних изменений среднегодовой температуры ММП по данным скважины о. Самойловский за 2007–2020 гг.

Глубина, м	Значения тренда, °C/10 лет	Коэффициент корреляции Спирмена	*p*-уровень	Среднее, °C	Максимальное значение, °C (год)	Минимальное значение, °C (год)	Разница между max и min, °C	Разница между 2020 и 2007 гг., °C
0	3,23	0,882	0,00	–7,65	–5,13 (2020)	–9,54 (2007)	4,42	4,42
0,75	4,17	0,864	0,00	–5,18	–2,67 (2017)	–8,27 (2007)	5,60	5,25
1,75	4,00	0,845	0,00	–5,47	–3,05 (2017)	–8,55 (2007)	5,50	4,87
2,75	3,93	0,900	0,00	–5,67	–3,43 (2017)	–8,77 (2007)	5,34	4,78
3,75	3,82	0,900	0,00	–5,86	–3,81 (2017)	–8,93 (2007)	5,12	4,67
4,75	3,67	0,909	0,00	–6,07	–4,20 (2017)	–9,02 (2007)	4,81	4,48
5,75	3,49	0,909	0,00	–6,26	–4,59 (2017)	–9,05 (2007)	4,46	4,26
6,75	3,32	0,909	0,00	–6,45	–4,94 (2017)	–9,06 (2007)	4,12	4,03
7,75	3,16	0,945	0,00	–6,62	–5,24 (2020)	–9,06 (2007)	3,83	3,82
8,75	3,00	0,957	0,00	–6,78	–5,44 (2020)	–9,05 (2007)	3,61	3,61
9,75	2,87	0,964	0,00	–6,92	–5,60 (2020)	–9,05 (2007)	3,45	3,45
10,75	2,72	0,973	0,00	–7,08	–5,78 (2020)	–9,05 (2007)	3,27	3,27
11,75	2,55	0,955	0,00	–7,24	–5,98 (2020)	–9,04 (2007)	3,06	3,06
12,75	2,40	0,984	0,00	–7,38	–6,15 (2020)	–9,04 (2007)	2,89	2,89
13,75	2,27	0,973	0,00	–7,49	–6,30 (2020)	–9,04 (2007)	2,73	2,73
14,75	2,14	0,918	0,00	–7,61	–6,46 (2020)	–9,03 (2007)	2,57	2,57
15,75	2,01	0,900	0,00	–7,71	–6,60 (2020)	–9,03 (2007)	2,43	2,43
16,75	1,91	0,882	0,00	–7,79	–6,71 (2020)	–9,03 (2007)	2,32	2,32
17,75	1,80	0,927	0,00	–7,88	–6,83 (2020)	–9,02 (2007)	2,19	2,19
18,75	1,70	0,936	0,00	–7,95	–6,94 (2020)	–9,02 (2007)	2,08	2,08
20,75	1,55	0,909	0,00	–8,08	–7,13 (2020)	–9,05 (2007)	1,91	1,91
22,75	1,37	1,000	0,00	–8,19	–7,32 (2020)	–9,02 (2007)	1,71	1,71
24,75	1,24	1,000	0,00	–8,25	–7,44 (2020)	–8,99 (2007)	1,55	1,55
26,75	1,00	1,000	0,00	–8,31	–7,57 (2020)	–8,97 (2007)	1,39	1,39

Интерпретация этих же данных за период с 2006 по 2017 г. немецкими учеными [Boike et al., 2019b] показывает, что горизонт нулевых годовых амплитуд (где сезонные изменения температуры незначительны и составляют <0,1 °C) находится на глубине ниже 20,75 м. На максимальной глубине 26,75 м температура колеблется с максимальной разницей в 0,05 °C. Авторы также проанализировали среднегодовую температуру между началом и концом временного ряда, а также минимальную и максимальную температуру (рис. 1.17) и установили, что с 2006 по 2017 г. температура ММП увеличивается на всех глубинах, но максимальное потепление характерно для поверхностного горизонта. На глубине 2,75 м среднегодовая температура повысилась на 5,7 °C (с –9,2 °C – среднее с сентября 2006 по август 2007 г.; до –3,5 °C – среднее с сентября 2016 по август 2017 г.), на глубине 10,75 м на 2,8 °C (с –9,0 °C до –6,2 °C), а на глубине нулевых годовых амплитуд 20,75 м – на 1,3 °C (с –9,1 °C до –7,7 °C).

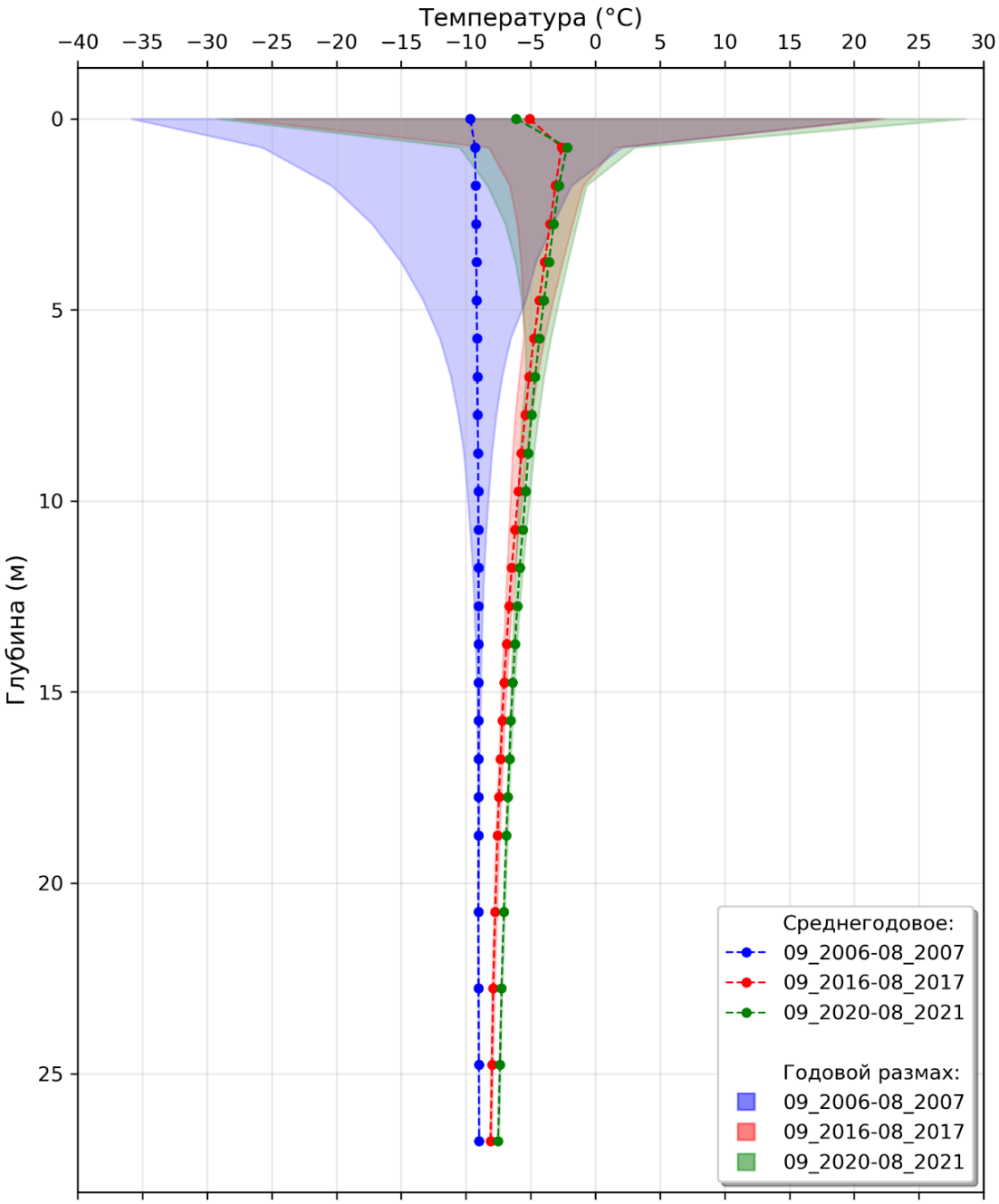


Рис. 1.17. Среднегодовые, максимальная и минимальная температура ММП на разных глубинах в период с 2006 по 2017 г. по данным скважины на о. Самойловский [Boike et al., 2019b], с добавлением автором данных за период 2020–2021 гг.

Однако при интерпретации этих данных необходимо учитывать существенное локальное антропогенное воздействие. Как показано в [Большиянов и др., 2024], ежегодное снегонакопление у устья скважины – вероятно, основная причина столь высоких темпов роста температуры в многолетнем разрезе. Данные независимой 66-метровой скважины, пробуренной в естественных условиях в том же регионе, фиксируют на сопоставимой глубине (26,75 м) существенно меньший тренд потепления – ~0,06 °C/год (или 0,6 °C/10 лет) [Большиянов и др., 2024].

Таким образом, данные по скважине на о. Самойловский, хотя и отражают интенсивное увеличение температуры ММП в точке наблюдений, могут быть нерепрезентативными для фоновых природных условий дельты Лены из-за сильного локального антропогенного фактора. Однако полученные значения согласуются с результатами измерений в скважинах, расположенных в арктической зоне. Так, в обобщении, представленном в [Biskaborn et al., 2019], с 2007 по 2016 г. темпы повышения температуры ММП составляли 0,39 °C ± 0,15 °C для участков станций мониторинга, расположенных в зоне сплошного распространения ММП, и 0,20 °C ± 0,10 °C для участков мониторинга в зоне прерывистого распространения ММП. Максимальные изменения температуры ММП +0,93 °C установлены для скважины, расположенной на полярной метеостанции Марре-Сале (п-ов Ямал, ЯНАО), при анализе с 2008–2009 по 2015–2016 гг. на глубине 10 м. Авторы также приводят данные по о. Самойловский, где на глубине 20,75 м за аналогичный период 2008–2016 гг. температура выросла на 0,90 °C. Однако для 2008 и для 2009 гг. данные доступны только до 20.09. Значения изменений ниже при анализе данных скважин, расположенных в зоне сплошного распространения ММП на севере Аляски.

В последнем обзоре [AMAP, 2024] приводятся данные о региональных различиях в темпах изменения температуры ММП с 1978 по 2023 г.: от 0,19 °C/10 лет во внутренних районах Аляски и Центральной долины Маккензи до 0,59 °C/10 лет для станций мониторинга, расположенных в прибрежной зоне Чукотского моря и моря Бофорта. Согласно данным [Romanovsky et al., 2019], на территории Европейского севера России (мыс Болванский – геокриологический стационар, расположенный в дельте р. Печоры на южном берегу Печорской губы) и в Западно-Сибирском регионе (Уренгой) температура на глубине 10 м с конца 1980-х повышается со скоростью ~0,4–0,6 °C/10 лет. Проведенное исследование авторов [Vasiliev et al., 2020] показывает, что среднегодовая температура ММП увеличивается от 0,3 до 0,6 °C/10 лет на глубине 10–12 м (пост Марре-Сале).

Обобщение данных до 2020 г. [Smith et al., 2023] отражает температурные изменения ММП с 1973 г. В данном исследовании приводятся результаты мониторинга температуры на глубинах ниже 10 м. Сравнение с данными по о. Самойловский показывает, что тренды потепления ММП в центральной части даже на самой нижней границе (на 26,75 м величина тренда 1,0 °C/10 лет) выше, чем в среднем по станциям, расположенным в Арктике, и в два раза выше значений, зарегистрированных на ближайшей к дельте Лены станции мониторинга «Дуванный Яр», расположенной в нижнем течении р. Колымы, – 0,4 °C/10 лет (2009–2020 гг.). Среднее значение тренда на глубинах 10,75–26,75 м здесь составляет 1,9 °C/10 лет.

Также в рамках исследования проведен анализ сезонных изменений температуры грунтов, однако за июнь–сентябрь данные отсутствуют для следующих периодов: с 1 июня по 24 августа 2006 г., с 1 августа по 30 сентября 2015 г. и с 20 по 30 сентября 2008 г. и 2021 г. В статистическом

анализе использовались данные с 2007 по 2021 г. (без восстановления пропусков за 2015 г. – 61 день, за 2008 г. – 10 дней и 2021 г. – 10 дней). График изменения сезонной температуры на всех горизонтах также демонстрирует увеличение температуры мерзлоты (рис. 1.18). Максимальные значения на всех горизонтах достигнуты в 2021 г. – 9,65 °С на поверхности и –7,47 °С на глубине 26,75 м. Минимальные значения характерны для первого года измерений (2007 г.), кроме поверхностных слоев до 3,75 м, где минимальные значения зафиксированы в 2015 г. (что скорее всего связано с пропусками за август–сентябрь). Без учета данных 2015 г. минимальные значения характерны для 2007 г. и 2009 г.

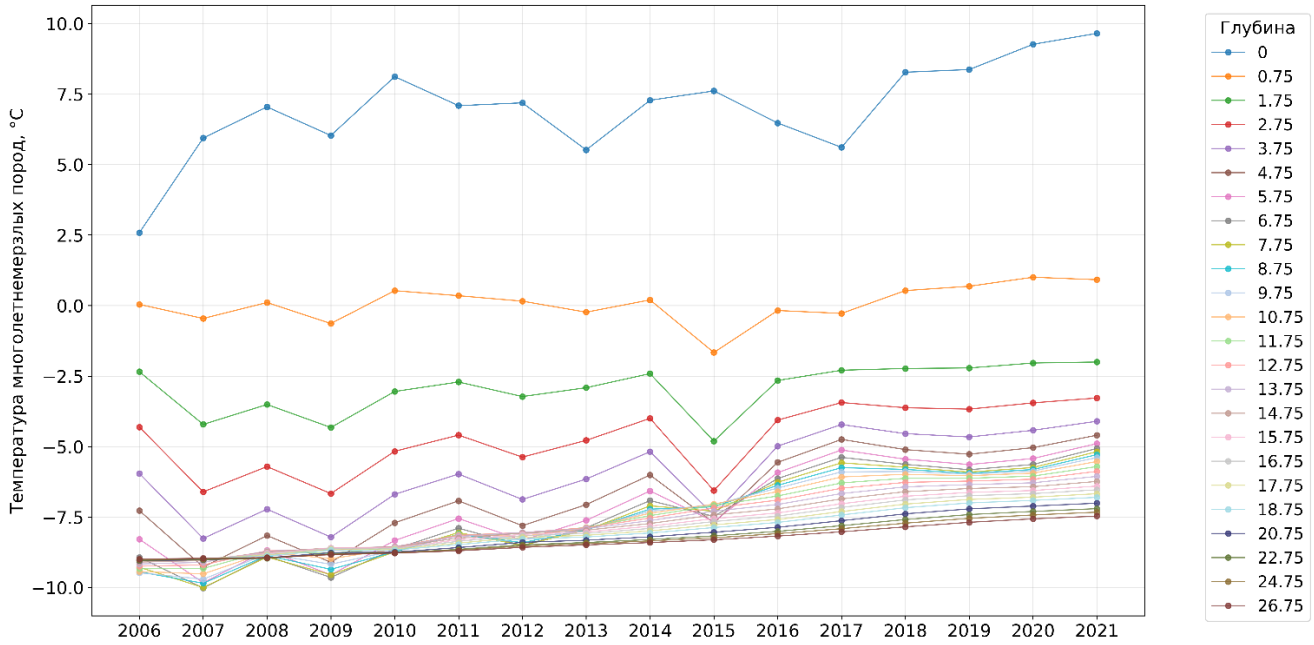


Рис. 1.18. Изменение средней температуры (июнь–сентябрь) мерзлоты на разных глубинах по данным скважины на о. Самойловский с 2006 по 2021 г.

Статистический анализ осредненных данных за июнь–сентябрь термометрической косы, установленной в скважине глубиной 26,75 м на о. Самойловский, демонстрирует общую значимую (коэффициент Спирмена 0,98, при *p*-уровень < 0,05) тенденцию к повышению температуры мерзлых пород на всех горизонтах, причем более высокие значения наблюдались в 2021 г. Без учета данных за 2006 г. (измерения начались 20 августа), величина тренда на поверхности составляет 1,71 °С/10 лет для периода 2007–2021 гг. Если на поверхности (глубина 0 м) наблюдаются флуктуации температуры (поверхностные горизонты более подвержены внутригодовым колебаниям температуры), то на глубинах 5 м и ниже отмечается статистически значимый многолетний рост температуры мерзлых пород, и этот тренд достигает максимума 3,47 °С/10 лет на глубине 6,75 м. На самом глубоком горизонте (26,75 м) темпы температурных изменений составляют 1,11 °С/10 лет.

Таким образом, климатические изменения могли привести к интенсификации термоэрозионных процессов дельтовых берегов, сложенных ММП, и повлиять на трансформацию стока воды и взвешенных наносов в рукавах дельты.

Выводы к главе 1

1. Дельта р. Лены является одной из наиболее быстро меняющихся территорий Арктики – скорость потепления за период открытой воды с 2000 по 2024 г. составляет +1,62 °С/10 лет, что вдвое превышает средние темпы по бассейну реки. Температура ММП на о. Самойловский за 2007–2020 гг. возросла на 1,0–4,2 °С/10 лет на всех горизонтах до глубины 26,75 м. Фиксируется статистически значимое увеличение объемов речного стока примерно на 12% с 1988 г. и удлинение безледного периода.

2. Сток воды и взвешенных наносов р. Лены хорошо изучен в замыкающем створе г/п Кюсюр, где накоплены данные с 1934 г. Среднемноголетний расход воды составляет 17 200 м³/с, годовой сток взвешенных наносов – 22,5 млн т.

3. Систематические измерения в истоках рукавов дельты велись Тиксинской ЦГМС с 1977 по 2007 г. и показали отсутствие изменений в перераспределении стока между главными рукавами. После 2007 г. регулярный мониторинг в рукавах прекращен, и около 97% водотоков дельты остаются не охваченными измерениями. Свыше 20 оценок годового стока взвешенных наносов в диапазоне величин от 11,7 до 27,4 млн т в год основаны исключительно на данных замыкающего створа и комплексно не учитывают трансформацию стока в дельте.

4. Дельта характеризуется полигенетическим строением. На ее территории расположены аллювиально-морские террасы разного возраста и останцы Ледового комплекса. Высокая льдистость отложений Ледового комплекса (>20% сегрегированного льда, жилы шириной до 20 м) определяет его особую уязвимость к термическому разрушению и создает предпосылки для усиления поступления взвешенных наносов в русловую сеть в условиях деградации ММП.

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

2.1. Граф-теоретический подход к моделированию распределения стока воды по рукавам

2.1.1. Обзор подхода RivGraph

Пространственные масштабы дельты Лены (32 тыс. км^2), а также ее труднодоступность и отсутствие мониторинговых натурных измерений с 2002 г. (в том числе синхронных [Syvitski et al., 2005]), которые проводились только в истоках главных рукавов, обусловливают необходимость применения дистанционных методов для комплексного изучения распределения стока воды в многочисленных дельтовых рукавах. Физически обоснованное гидродинамическое моделирование позволяет описать детальную картину распределения стока воды по рукавам даже в условиях приливных явлений [Alabyan, Lebedeva, 2018; Panchenko, Krylenko, Alabyan, 2024]. Однако настройка модели требует огромного количества входных данных (топография, батиметрия, уровни воды, скоростные поля, коэффициенты шероховатости), сложной калибровки и вычислительных ресурсов, что для обширной и труднодоступной дельты Лены невозможно.

В последние годы активно применяется подход RivGraph, позволяющий рассчитывать распределение стока в дельтах рек, представляя русловую сеть в виде направленного ациклического графа [Tejedor et al., 2015a, 2015b]. Граф $G = (\nu, \varepsilon)$ – это совокупность вершин $\nu = \{\nu_i\}$, где $i = 1, \ldots, N$, и ребер $\varepsilon = \{(uv)\}$, при этом $u,v \in \nu$, где (uv) означает, что ребро соединяет вершины u и v. То есть используются графы с узлами разветвления или слияния (вершинами – nodes) и соединяющими их водотоками (ребрами – links), которые, по сути, представляют собой элементарные участки рукавов между узлами разделения и/или слияния. Таким образом, многочисленные водотоки дельты анализируются как математический объект в виде списка вершин, отрезков рукавов и проток, связей между ними (рис. 2.1).

Этот подход реализован в библиотеке Python [Schwenk, Hariharan, 2021] и позволяет на основе данных дистанционного зондирования автоматически рассчитывать морфометрические характеристики проток и рукавов, а затем моделировать распределение стока в узлах разветвления [Dong et al., 2020; Edmonds et al., 2011; Hines, Piliouras, 2024]. Ключевое преимущество метода заключается в сочетании локальных гидравлико-морфометрических соотношений (например, связи между распределением ширины русел и долями расхода [Hariharan et al., 2022; Tejedor et al., 2017]) с учетом крупномасштабной связности всей дельтовой сети.

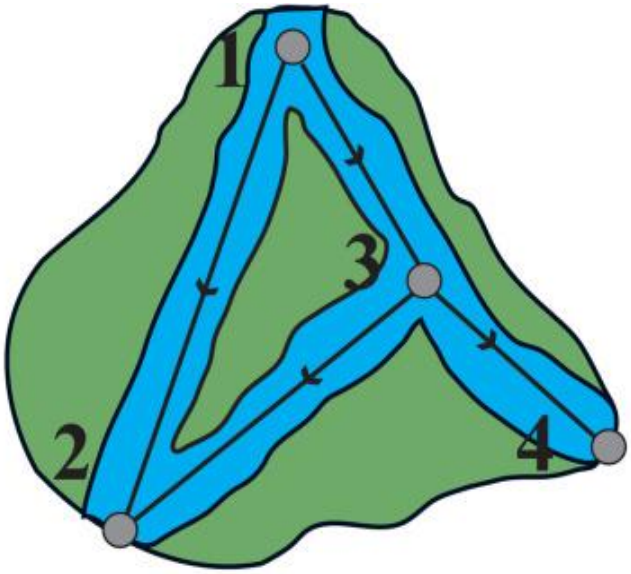


Рис. 2.1. Представление проток дельты в виде графа [Tejedor et al., 2015a]

Использование графо-теоретического подхода для задачи расчета распределения стока по рукавам требует разработки узлового соотношения, то есть правила, согласно которому сток будет делиться между рукавами. Обычно такие соотношения связывают расход воды (рассчитываемая величина) и входную переменную, по которой проводится расчет деления потока между рукавами. В качестве переменных могут выступать как данные, полученные во время полевых измерений [Tabata, Hickin, 2003] (например, площадь поперечного сечения, глубина, ширина, уклон, коэффициент Шези, расход воды выше по течению), так и характеристики (ширина, длина, падение и уклон водной поверхности), рассчитанные в ходе обработки данных дистанционного зондирования Земли [Dong et al., 2020].

Предложенный подход был успешно применен для исследования рек по всему миру [Dong et al., 2020; Hariharan et al., 2022].

С учетом большого количества проток и сложности русловой сети в работе применяется разработанный ранее метод RivGraph, представляющий совокупность автоматических пакетов Python [Schwenk, Hariharan, 2021; Schwenk, Piliouras, Rowland, 2020]. RivGraph позволяет автоматизированно строить граф русловой сети на основе бинарной маски воды. Создание бинарной маски воды на основе данных дистанционного зондирования представляется сложной задачей, для решения которой разработано большое количество подходов на основе расчета различных водных индексов [Feyisa et al., 2014; Fisher, Flood, Danaher, 2016b; Xu, 2006a; McFeeters, 1996].

В настоящей работе проведена разработка и адаптация комплексного подхода RivGraph для моделирования распределения стока воды по рукавам крупнейшей дельты Российской Арктики – дельты Лены с учетом ее особенностей. В работе впервые выполняется разработка узловых соотношений на основе интеграции данных многолетнего мониторинга в дельте Лены с

1981 г. и их верификация на основе измерений в 2022 и 2024 гг., проведенных с участием автора. Эти узловые соотношения становятся основой для расчета расходов воды в каждом узле разветвления многорукавной дельты в периоды спада половодья и межени. Интеграция дистанционных данных и граф-теоретического подхода открывает новые возможности восстановления расходов воды в каждой протоке и в каждом рукаве дельты вплоть до морского края для периода открытой воды.

2.1.2. Настройка, адаптация и калибровка модели RivGraph

Входными данными для представления дельты Лены в виде ориентированного графа с узлами разветвления или слияния и соединяющими их протоками служит бинарная маска русловой сети, для которой проводится автоматический расчет морфометрических характеристик (длина, ширина, извилистость, угол ответвления) в специализированном пакете Python [Schwenk, Hariharan, 2021]. Таким образом, создается список вершин, проток и связей между ними, которым соответствуют многочисленные рукава дельты.

На первом этапе создана бинарная маска дельты Лены на основе обработки спутниковых снимков Landsat. Для извлечения водной поверхности использовался индекс AWEI (Automated Water Extraction Index) [Feyisa et al., 2014], позволяющий с высокой точностью проводить дешифрирование по спутниковым снимкам Landsat. Подбор спутниковых снимков осуществлялся для двух периодов водного режима: спад половодья (при расходах воды в вершине дельты ~ 70 000 м^3/с с учетом времени добегания от г/п Кюсюр, равного двум дням), соответствующий повышенной водности, и межень (~ 20 000 м^3/с) с пониженной водностью.

Для условий повышенной водности подобрана серия спутниковых снимков Landsat 8–9 за период с 2019 по 2024 г. и проведена их склейка. Это связано с тем, что территорию дельты Лены невозможно покрыть снимками за одну дату. Вторым ограничением является облачность в данном регионе и скопление льда в русле. Поэтому проведена работа по подбору безоблачных спутниковых снимков (дата съемки соответствует расходам воды в вершине дельты ~ 70 000 м^3/с), склейка которых позволила покрыть всю дельту. Важно отметить, что такой подбор снимков описывает средние условия прохождения половодья в безледных условиях, что не вполне соответствует реальной обстановке в период повышенной водности.

Аналогичным образом подобраны снимки для периода пониженной водности: Landsat 8–9 за период август–сентябрь 2022–2023 гг.

Создание нескольких бинарных водных масок связано с учетом изменений уровней воды, которые приводят к значительным изменениям русловой сети дельты: больше половины водотоков теряют водообмен с основным потоком (рис. 2.2). Меняется также площадь водной поверхности: например, площадь бинарной маски только для водотоков дельты в условиях

повышенной водности составляет ~7140 км^2. Изменение расходов воды с 70 000 до 20 000 м^3/с приводит к сокращению площади на 40% (2837 км^2).

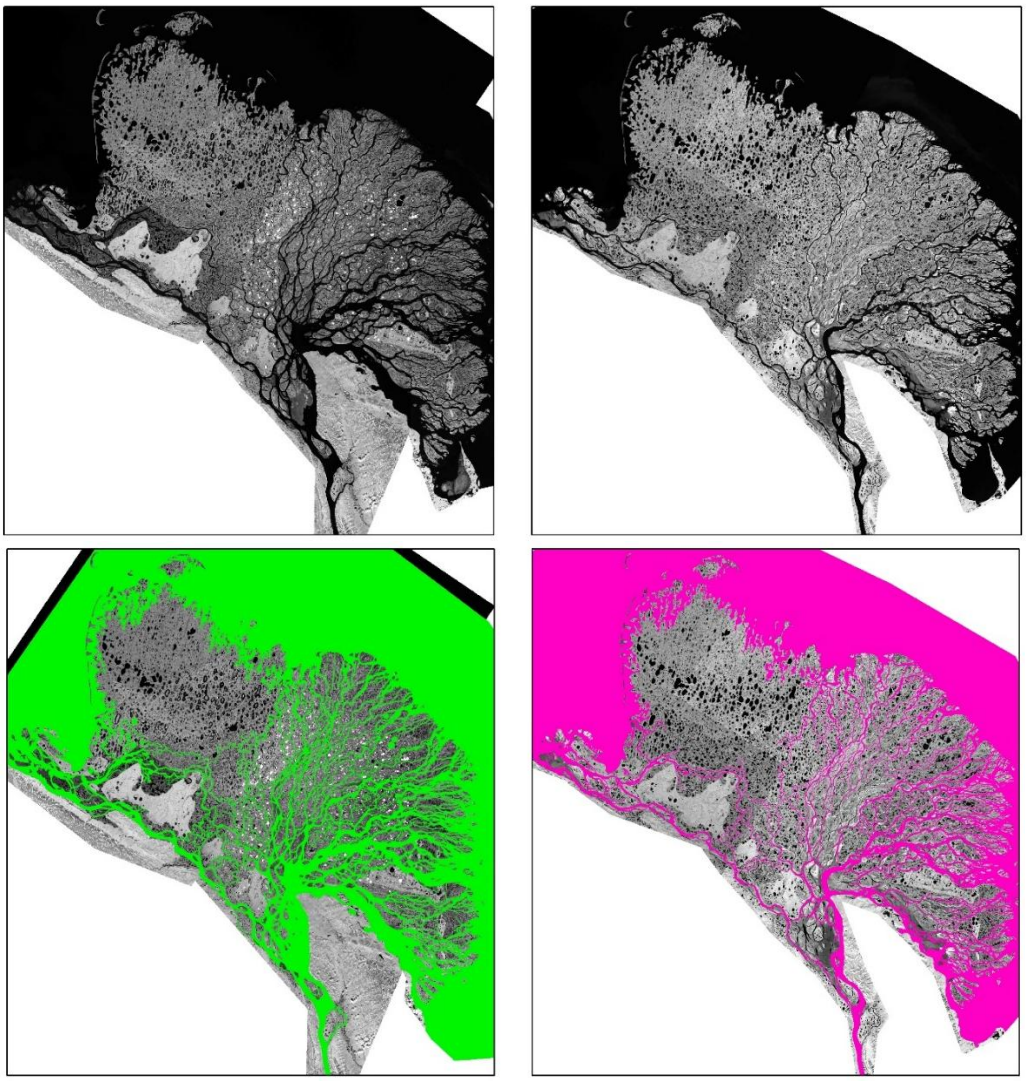


Рис. 2.2. Создание бинарных масок дельты Лены для условий повышенной (слева) и пониженной (справа) водности

Бинарные маски в растровом формате далее обрабатывались в библиотеке Rivgraph [Schwenk, Hariharan, 2021; Schwenk, Piliouras, Rowland, 2020]. Коротко процесс можно описать следующими этапами:

1) для геопривязанного бинарного изображения маски дельты проводится инициализация всех необходимых атрибутов класса .delta;

2) скелетизация маски – бинарная маска трансформируется в однопиксельную среднюю линию;

3) трансформация скелета в графовую структуру с выделением ребер или проток (link) и узлов разветвления и слияния (nodes) с присвоением каждому уникального номера связи;

4) обрезка (по береговой линии и вершине дельты) и очистка графа от «висячих» связей. На выходе получается чистая и релевантная сеть дельты, на основе которой выполняются последующие вычисления;

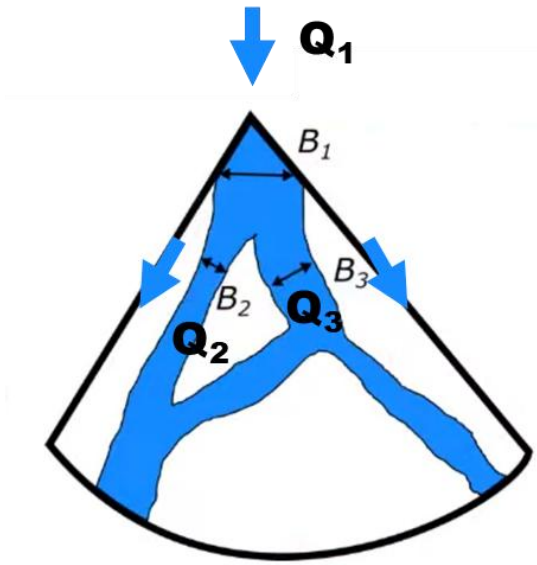
5) расчет морфометрических характеристик для ребер (длина, ширина и их средние и адаптированные величины); для узлов – определение типа узла ('b' – bifurcation, 'c' – confluence);

6) определение направления течения в каждом ребре.

Разработанные графовые схемы далее обрабатывались в виде списка в библиотеке Python путем написания программного кода для расчета распределения водного стока в каждом узле разветвления согласно разработанному узловому соотношению.

Подбор узлового соотношения проводился на основе интеграции данных многолетнего мониторинга в дельте Лены с 1981 г., а их верификация – с использованием экспедиционных измерений в 2022 и 2024 гг. Эти узловые соотношения стали основой для расчета расходов воды в каждом узле разветвления многорукавной дельты в периоды спада половодья и межени. Авторы исследования [Dong et al., 2020], рассчитывая распределение речного стока в дельте Селенги, в качестве переменных использовали данные, полученные во время полевых измерений (площадь поперечного сечения, глубина, ширина, уклон, коэффициент Шези, расход воды выше по течению), а также характеристики, рассчитанные в ходе обработки данных дистанционного зондирования Земли (ширина, извилистость). Однако доступный массив по дельте Лены в полной мере позволяет проводить разработку узловых соотношений на основе результатов измерений ширины и расходов воды. Численный расчет на основе связи ширины и расхода разработан и успешно применялся для исследования рек как в России [Руководство по расчету элементов…, 1973], так и по всему миру [Dong et al., 2020; Hariharan et al., 2022].

Для калибровки модели проведена интеграция свыше 311 измерений расходов воды в ходе экспедиций русловой партии МГУ в 1981 г. [Коротаев и др., 1990], мониторинга на устьевых постах Тиксинской ЦГМС с 1994 по 2002 г., данных экспедиций сотрудников кафедры гидрологии СПбГУ и ААНИИ в 2005 и 2016 гг. [Федорова и др., 2017; Fedorova et al., 2015b, 2015a]. Согласно установленному узловому соотношению отношение расходов воды в двух рукавах прямо пропорционально отношению средних значений ширины в степени 1,7. Полученное значение также согласуется с тем, что прописано в [Руководство по расчету элементов…, 1973]. То есть сток воды распределяется между двумя рукавами пропорционально средней ширине русла в степени 1,7. Графическая схема расчета приведена на рис. 2.3.



$$Q_2 = \frac{B_2}{B_2 + B_3} Q_1$$
$$Q_3 = \frac{B_3}{B_2 + B_3} Q_1$$
$$\rightarrow \quad \frac{Q_2}{Q_3} = \frac{B_2}{B_3} \quad \rightarrow \quad \frac{Q_2}{Q_3} = \left(\frac{B_2}{B_3}\right)^{1.7}$$

Рис. 2.3. Схема расчета распределения стока воды в узле разветвления с учетом эмпирического соотношения между шириной (B, м) и расходом (Q, м^3/с)

Для задания граничного расхода на входе в дельту использовались данные мониторинга Росгидромета и ArcticGRO в замыкающем створе р. Лены г/п Кюсюр с учетом времени добегания до вершины дельты (два дня), которое оценивалось путем построения графиков уровней связи между постами Кюсюр (замыкающий пост) и п. ст. им. Хабарова (уровневый пост, расположенный в истоке Быковской протоки). Стоит также отметить, что измерения уровней и расчет расходов воды на г/п Кюсюр Росгидрометом проводятся с пропусками, а данные ArcticGRO получены расчетным путем. После 2011 г. суточные расходы за период открытой воды не публикуются, а реальные измерения расходов воды не проводятся с 2003 г. [Третьяков и др., 2022]. На сегодняшний день возможен пересчет в среднесуточные расходы по кривой расходов, построенной авторами и опубликованной в [Magritsky et al., 2018]. Также установлено, что кривая расходов на посту Кюсюр характеризуется хорошей многолетней устойчивостью [Иванов, Пискун, Корабель, 1983; Магрицкий, 2001]. По данным авторов [Магрицкий и др., 2023], различие с данными ArcticGRO за время экспедиции в августе 2022 г. составляло до 4,5%.

2.1.3. Верификация разработанного алгоритма

Как отмечено в ряде работ [Dong et al., 2020; Hariharan et al., 2022], полевые измерения для верификации таких моделей часто отсутствуют, а расчеты по различным морфометрическим характеристикам для оценки распределения стока по-прежнему недостоверны. В связи с этим особую ценность представляют данные измерений экспедиций 2022 [Магрицкий и др., 2023] и

2024 гг. [Магрицкий, Прокопьева и др., 2026], собранные при личном участии автора и использованные для верификации разработанного алгоритма.

Методика верификации заключалась в следующем: из 44 измерений были отобраны 20, выполненные сравнительно синхронно (в пределах одних суток) с измерениями в Главном Русле у о. Столб (четыре серии синхронных измерений при *Q*вд от 16 000 до 31 250 м³/с). Все измерения охватывают период межени, поэтому для оценки точности использовалась графовая схема, калиброванная на этот период (при расходах в вершине дельты < 20 000 м³/с). Модельные запуски выполнялись с заданием в вершине дельты четырех измеренных расходов: 16 000, 18 860, 23 100 и 31 250 м³/с. Оценка точности проводилась путем сравнения смоделированных и измеренных расходов воды в истоках рукавов Быковская, Трофимовская, Оленёкская и протоках Туматского сектора.

Разработанная графовая модель дельты Лены показала высокую степень соответствия натурным данным. Коэффициент детерминации R^2, составляющий 0,96, критерий Нэша – Сатклиффа NSE, равный 0,95, свидетельствуют о том, что модель адекватно воспроизводит общую динамику изменения расходов воды в сложной системе дельтовых разветвлений (рис. 2.4).

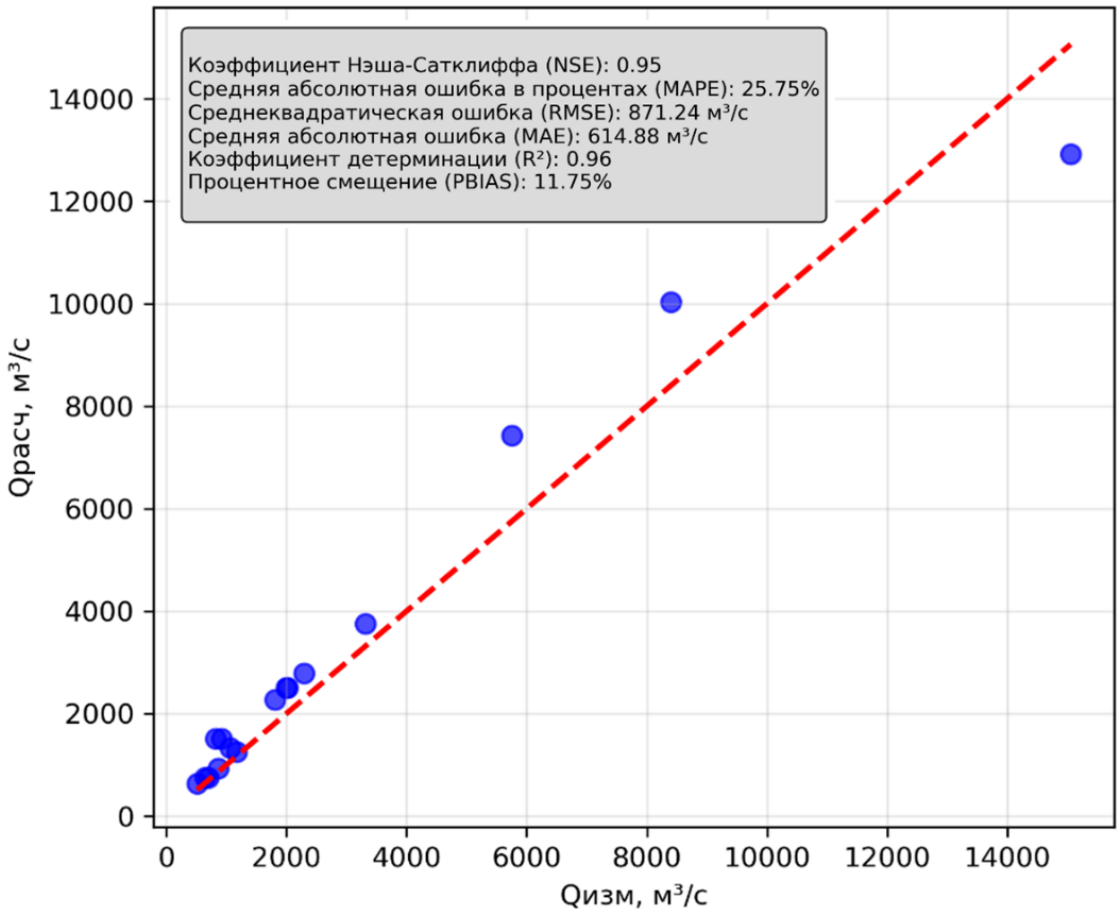


Рис. 2.4. Результаты верификации графовой модели распределения стока в дельте Лены: сравнение измеренных ($Q_{изм}$) и рассчитанных ($Q_{расч}$) расходов воды (красная пунктирная линия – полное соответствие (линия 1:1); значения ключевых статистических метрик приведены на врезке)

Детальный анализ смоделированных и измеренных величин (таблица 2.1) подтверждает общую высокую сходимость, но также выявляет закономерные расхождения, важные для дальнейшего развития работы над усовершенствованием модели. Наибольшие относительные ошибки характерны для малых водотоков. Также выявлено систематическое занижение смоделированных расходов для Трофимовской протоки и завышение – для остальных. Это объясняется тем, что Трофимовская протока – морфологическое продолжение Главного Русла Лены, в котором сток р. Лены концентрируется при выходе ее из «Ленской трубы». Это приводит к тому, что в алгоритме распределения воды между основными рукавами возникает систематическая ошибка. То есть в модельных расчетах доля стока, приходящегося на Трофимовскую протоку, ниже, чем в нее поступает на самом деле, и как следствие, в остальных протоках – выше. Во время экспедиции в 2022 г. расход воды в Трофимовской составил 15 060 м^3/с при расходе в створе «4.7 км выше о. Столб» Главного Русла 23 100 м^3/с. Расчетное значение по модели составило 12 550 м^3/с, то есть расхождение в 2 510 м^3/с для Трофимовской протоки составляет ~20%, в то время как полученная ошибка превышает измеренные расходы в 12 других створах. Этот недоучет стока в Трофимовской также проявляется в превышении модельных расчетов над измеренными в других частях дельты. Так, на ~1700 м^3/с завышены расходы в Быковской протоке (при $Q_{ВД}$ = 23 100 м^3/с и 31 250 м^3/с), что составляет ~20% от измеренного стока. При этом ошибка в отдельных частях дельты может достигать 50% (например, в истоке Туматской протоки при $Q_{ВД}$ = 18 860 м^3/с).

Средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) составляет 25,8%, систематическое смещение (PBIAS) –12%. Полученные оценки точности измерений соответствуют мировым аналогам (R^2 = 0,88–0,98 по [Dong et al., 2020]). Расхождения находятся в пределах неопределенности исходных данных, включая погрешности дешифрирования спутниковых снимков и выполнения натурных измерений расходов в условиях рассредоточения стока. Выявленные отклонения не отменяют общего качества модели, но задают направления для дальнейшей калибровки: уточнение морфометрических характеристик узлов разветвления с учетом средней глубины русла, длины, извилистости и угла ответвления.

Таким образом, проведенная верификация подтверждает воспроизводимость и достаточную точность разработанной графовой модели дельты Лены. Выявленные систематические отклонения (завышение расходов в малых рукавах и занижение в Трофимовской протоке) не отменяют общего высокого качества получаемых результатов, а указывают на конкретные направления для дальнейшей калибровки и развития этой модели. В первую очередь это уточнение морфометрических характеристик узлов разветвления с учетом средней глубины русла, длины, извилистости и угла ответвления.

Таблица 2.1. Сравнение измеренных и смоделированных значений для рукавов дельты Лены по данным измерений в 2022 и 2024 гг.

Водоток, створ	Дата	$Q_{изм}$, $м^3/с$	$Q_{мод}$, $м^3/с$	MAE, $м^3/с$	MAPE, %
при Q = 31 250 $м^3/с$ в Главном Русле (4,7 км выше о. Столб)					
Протока, огибающая о. Самойловский с юга	12.08.2022	1170	1252	82	6,5
Оленёкская протока (исток)		1060	1333	273	20,5
Туматская протока (исток)		2020	2504	484	19,3
Протока, огибающая о. Самойловский с севера		2000	2504	504	20,1
Общий вход в Оленёкскую и Туматскую протоки		3310	3756	446	11,9
Быковская протока (исток)		8400	10029	1629	16,2
при Q = 16 000 $м^3/с$ в Главном Русле (4,7 км выше о. Столб)					
Протока, огибающая о. Самойловский с юга, ЛБ	04.08.2024	511	640	129	20,2
при Q = 18 860 $м^3/с$ в Главном Русле (4,7 км выше о. Столб)					
Протока, огибающая о. Самойловский с севера, ЛБ	06.08.2024	920	1512	592	39,2
Туматская протока, исток, ЛБ		820	1512	692	45,8
Оленёкская протока, исток, ЛБ		696	756	60	7,9
Протока, огибающая о. Самойловский с юга, ЛБ		648	756	108	14,3
Общий вход в Оленёкскую и Туматскую протоки		1810	2268	458	20,2
при Q = 23 100 $м^3/с$ в Главном Русле (4,7 км выше о. Столб)					
Протока, огибающая о. Самойловский с юга, ЛБ	13.08.2024	862	928	66	7,1
Общий вход в Оленёкскую и Туматскую протоки		2290	2784	494	17,7
Быковская протока (исток)		5750	7433	1683	22,6
Трофимовская протока (исток)		15060	12922	138	6,5
Среднее		2958	3391	**724**	**23,5**

Примечание: MAE (Mean Absolute Error) – средняя абсолютная ошибка, MAPE (Mean Absolute Percentage Error) – средняя абсолютная процентная ошибка.

Принципиальная новизна и практическая значимость данного подхода для дельты Лены заключаются в следующем: калиброванная на натурных данных и верифицированная на независимом материале модель Rivgraph впервые позволяет рассчитать расходы воды в каждой протоке и рукаве дельты Лены вплоть до морского края для периода открытой воды. Это открывает новые возможности для значительного уточнения суммарного стока взвешенных

наносов в море Лаптевых. Получение данных о речном стоке в каждом узле разветвления является актуальной задачей, поскольку такие измерения для дельты Лены отсутствуют, а многолетние мониторинговые измерения охватывали лишь истоки четырех главных рукавов и участок Главного Русла, что составляет <1% общего числа проток дельты.

Следует отметить ограничения предлагаемого подхода, связанные с упрощениями графовой модели: 1) пропорциональное изменение площади поперечного сечения в зависимости от ширины русла, в то время как в дельте Лены это соотношение может изменяться в широких диапазонах [Магрицкий и др., 2023]; 2) отсутствие учета дополнительного притока и задержки воды на пойме и в озерах, то есть на всем участке дельты действует принцип сохранения массы, выражающийся как $Q_{\text{вершина дельты}} = \sum Q_{\text{устьевой створ}}$.

Область применимости методики ограничена: 1) периодом открытой воды (модель неприменима при наличии ледяных заторов и при наличии льда в русле); 2) верхними и средними участками рукавов, где не проявляется подпорное влияние моря, вызывающее расширение русел (рис. 2.5).

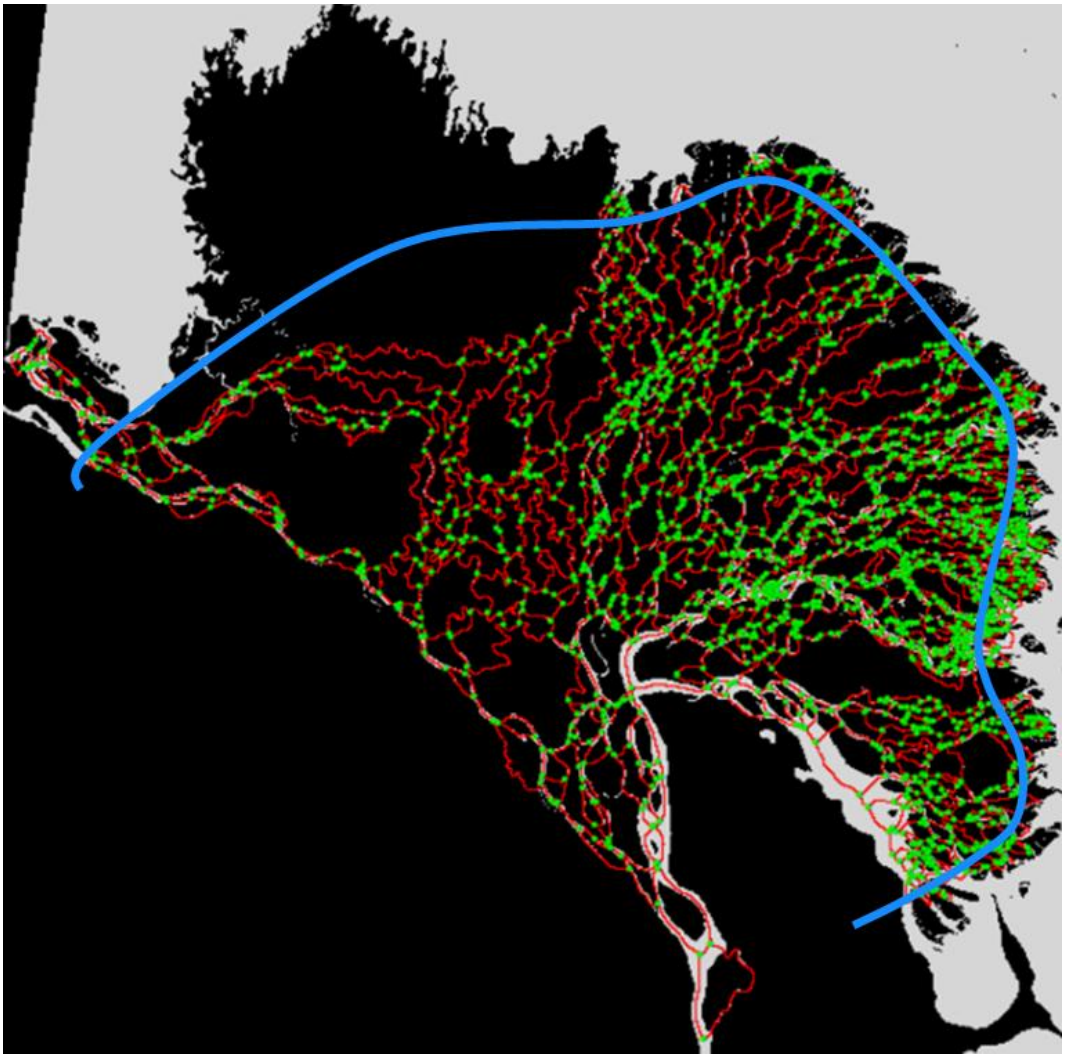


Рис. 2.5. Границы применимости модели Rivgraph

2.2. Дешифрирование концентрации взвешенных наносов по спутниковым снимкам

2.2.1. Опыт применения данных дистанционного зондирования для дешифрирования концентрации взвешенных веществ в воде

Изучение качества поверхностных вод с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) стало активно развиваться с начала 1970-х гг. Физической основой применения такого подхода является устойчивая связь между спектральной отражательной способностью водной поверхности и концентрацией находящихся в ней взвешенных веществ [Тарасов, 2019; Kirk, 1989]. Наличие органических (фитопланктон, продукты жизнедеятельности водных организмов) и неорганических веществ (минеральные частицы) влияет на отражательную способность [Mobley et al., 2004], повышая показатель преломления света, а также его поглощения [Myint, Walker, 2002]. То есть величина отраженного излучения водного объекта увеличивается при увеличении содержания взвешенных частиц, так как свет, падающий на воду, будет преломляться и рассеиваться, а не проникать внутрь толщи. Этот метод был доказан методом среднеквадратичных ошибок (RMSE) расчетных концентраций взвешенных наносов в диапазоне 10–20 мг/л [Mertes, Smith, Adams, 1993] для спутниковых систем Landsat, SeaWiFS, SPOT и MODIS.

Исследования показывают, что с ростом концентрации взвеси коэффициент спектральной яркости воды монотонно возрастает во всем видимом и ближнем инфракрасном (БИК) диапазонах. Однако чувствительность отклика неодинакова для волн разной длины (рис. 2.6), что показано в работе [Han, 1997], основанной на лабораторных экспериментах измерения отражательной способности в зависимости от концентрации взвеси и фитопланктона.

В голубой области спектра (450–520 нм) рост отражения с увеличением концентрации взвешенных наносов выражен слабо, в то время как в зеленой (520–600 нм) и особенно в красной (630–690 нм) и БИК (770–890 нм) областях он максимален [Тарасов, 2019; Han, 1997]. Эта особенность определяет выбор оптимальных спектральных каналов для решения конкретных задач.

При дешифрировании концентрации взвешенных наносов в водных объектах решающее значение имеют диапазон концентрации и морфометрические характеристики водного объекта. Для низких и средних концентраций (примерно до 100–150 мг/л) зависимость между отражением в красном и БИК каналах и концентрацией взвеси близка к линейной, что упрощает калибровку алгоритмов [Doxaran et al., 2002; Onderksek, 2007; Wang, Lu, Zhou, 2007]. При высоких концентрациях (>500 мг/л) зависимость становится нелинейной (степенной или экспоненциальной), а сигнал в красном канале может достигать насыщения, что требует

использования БИК-диапазона или различных комбинаций каналов [Eleveld et al., 2008; Potes, Costa, Salgado, 2012; Wang, Lu, 2010].

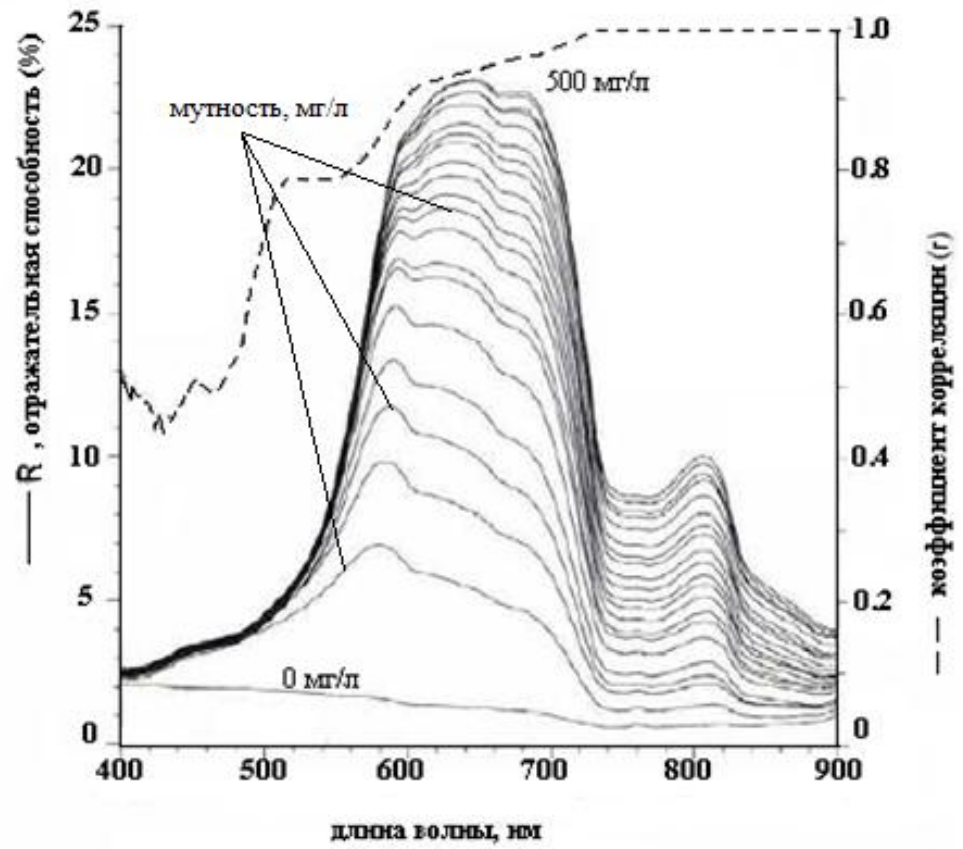


Рис. 2.6. Отражательная способность (*R*, %) волн электромагнитного спектра разной длины (нм) [Han, 1997]

Глубина водоема также накладывает существенные ограничения. При работе с мелкими, хорошо освещенными водными объектами (речные протоки, прибрежное мелководье) вклад отражения от дна может вносить значительную погрешность. В таких условиях предпочтение отдается БИК-каналу, где поглощение водой максимально и влияние дна минимизировано. Для глубоких водоемов, где дно не просматривается, могут эффективно использоваться зеленый и даже синий каналы, обеспечивающие большее проникновение в толщу воды [Лабутина, Сафьянов, 1980; Лабутина, Сафьянов, Шарлай, 1976].

Морфометрические характеристики водного объекта также служат ключевым критерием выбора спутниковых снимков, пространственное разрешение которых должно соответствовать масштабу объекта. Для мониторинга обширных морских и прибрежных районов применяются снимки низкого разрешения (например, MODIS, ~250–1000 м). Для исследования крупных рек требуются снимки среднего и высокого разрешения (Landsat, Sentinel-2, 10–30 м). Для изучения небольших водных объектов и ключевых районов крупных объектов используют снимки со сверхвысоким разрешением, например IKONOS, QuickBird, GeoEye-1 [Чалов, 2009], однако их использование часто ограничено стоимостью и малым архивом. В данной работе в качестве

основного источника данных выбраны снимки Landsat и Sentinel-2, что обусловлено их открытым доступом, глобальным покрытием, длительностью архивов (с 2000 и 2015 гг. соответственно) и периодичностью, достаточной для изучения сезонной и годовой динамики стока взвешенных наносов.

Подавляющее большинство оперативных алгоритмов оценки концентрации взвешенных наносов носят эмпирический характер. Они основаны на разработке статистической связи между измеренными *in-situ* значениями концентрации взвешенных наносов и спектральными характеристиками снимка (яркостью исходных каналов или их различными комбинациями – индексами) для конкретного водоема и момента времени. Такой подход обусловлен тем, что на формирование спутникового сигнала, помимо самой концентрации взвеси, влияет комплекс сопутствующих факторов: концентрация хлорофилла-а, содержание окрашенного органического вещества, крупность и состав взвеси.

Поэтому не существует универсального алгоритма, применимого для любых водных объектов. Успешные попытки создания региональных зависимостей, например, для прибрежных вод Европы, представлены в работе [Dogliotti et al., 2015]. Однако универсализация достигнута путем разработки единого уравнения, основанного на измерениях величин оптической мутности (в нефелометрических единицах NTU/FNU). Последующий пересчет НТУ в весовые концентрации (мг/л) возможен только при наличии устойчивой связи между двумя показателями, которая также имеет региональный характер [Промахова, Чалов, 2015].

Несмотря на сложности и ограничения, метод демонстрирует высокую эффективность для мониторинга как морских (воды I типа) [Babin et al., 2003] и прибрежных районов (воды II типа) [Chen, Hu, Muller-Karger, 2007], так и для крупных рек (воды III типа) [Чалов, Тарасов, Чалова, 2021; Chalov et al., 2025; Chalov, Prokopeva, 2022; Park, Latrubesse, 2014] и устьевых областей [Cao et al., 2022; Chalov, Bazilova, Tarasov, 2017; Chalov, Prokopeva, Habel, 2021; Dogliotti et al., 2015; Doxaran et al., 2002; Doxaran, Froidefond, Castaing, 2002]. Работы для крупнейшей р. Амазонки на основе данных MODIS показали возможность построения долгосрочных временных рядов с высокой точностью (R^2 = 0,92) и выявили четкие пространственно-временные закономерности распределения концентрации взвешенных наносов [Park, Latrubesse, 2014]. Для Лены разработана модель на основе архива Landsat, позволившая с высокой точностью проводить ретроспективную динамику взвешенного вещества на среднем и нижних участках [Чалов, Тарасов, Чалова, 2021; Chalov, Prokopeva, 2022]. Важное направление изучения устьевых областей – оценка влияния макрофитов на оптические характеристики [Volpe, Silvestri, Marani, 2011].

Однако анализ литературных данных выявляет существенный пробел. Подавляющее большинство исследований сфокусировано либо на отдельных участках крупных рек выше устьевых областей, либо на морском побережье. Комплексные работы, посвященные

трансформации взвешенного вещества внутри арктических многорукавных дельт, отсутствуют. Специфика трансформации стока взвешенных наносов внутри устьевой области заключается в пространственной неоднородности оптических условий, связанных как с изменением характеристик взвеси, так и со сменой вод III типа на воды II типа, из-за чего использование алгоритмов, разработанных для среднего или нижнего участка Лены [Chalov, Prokopeva, 2022] или прибрежной части моря Лаптевых [Копелевич и др., 2018], невозможно.

Таким образом, существующий опыт подтверждает принципиальную возможность количественной оценки стока взвешенных наносов по спутниковым данным, однако необходимо учитывать ограничения применимости любых алгоритмов и проводить тщательную калибровку путем разработки региональных алгоритмов. Для дельты Лены как для ключевого объекта, определяющего сток взвешенных наносов в море Лаптевых, такая калибровка до сих пор не проводилась. Поэтому на основе уникального массива экспедиционных работ и подспутниковых измерений концентрации взвешенных наносов в дельте Лены (2022 г.) и спутниковых снимков Landsat 8-9 и Sentinel-2 проведена калибровка и разработка регионального спутникового алгоритма с оценкой точности алгоритма по данным полевых измерений в 2024 г., с участием автора исследования.

2.2.2. Разработка региональных спутниковых моделей концентрации взвешенных наносов

Для дельты Лены расчет зависимости концентраций от коэффициента отражения проводился на основе сопоставления спутниковых снимков и полевых данных. Для вывода зависимости использовались снимки Landsat (программа NASA/USGS) с пространственным разрешением 30 м и Sentinel-2 (программа Copernicus, ESA) с разрешением 10 м. Для разработки модели использовались доступные безоблачные спутниковые снимки за период проведения экспедиционных исследований. Однако из-за высокой облачности доступными были снимки только за 16 августа 2022 г. Полевые работы в дельте Лены проводились с 9 по 16 августа 2022 г., но для вывода зависимости использовались данные за 13, 14 и 15 августа (рис. 2.7). Данное допущение возможно, так как уровни воды за эти промежутки оставались постоянными.

Методика определения концентрации взвешенных наносов заключается в пересчете характеристик отражения водной поверхности, отображаемых на космических снимках. Калибровка значений отражающей способности водной поверхности в пикселе спутникового изображения проводилась путем сопоставления полевых данных об измеренных концентрациях взвешенных наносов и значений коэффициентов отражений снимка спутниковой системы Landsat 9 и Sentinel-2 на участок дельты Лены от 16 августа 2022 г.

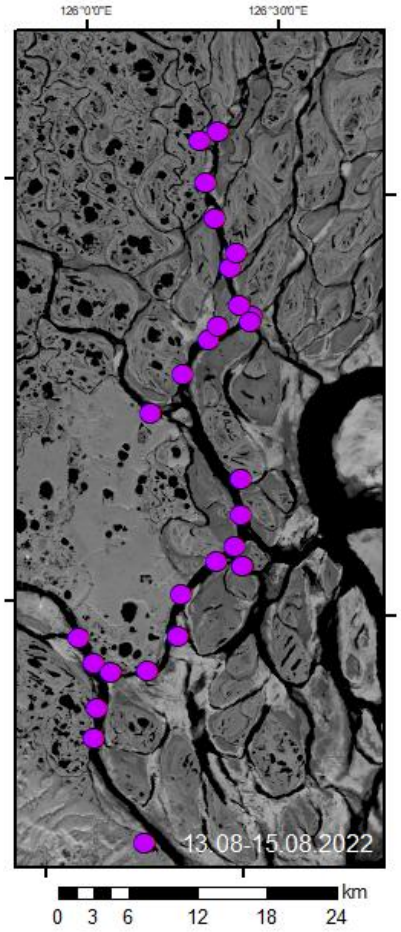


Рис. 2.7. Точки отбора проб воды на определение концентраций взвешенных наносов в августе 2022 г. для создания региональной зависимости *SSC* = *f*(ρ)

Выбранные снимки прошли радиометрическую калибровку (для перевода сырых значений Digital Numbers в значения отражения на верхней границе атмосферы Top of the Atmosphere) и атмосферную коррекцию SIAC: перевод из Top of the Atmosphere (TOA) в Bottom of the atmosphere (BOA) подробно описан в разделе 2.2.4. Все процедуры по предварительной обработке применялись с помощью встроенных алгоритмов Google Earth Engine. Путем сопоставления средних коэффициентов отражения в диаметре 90 м вокруг точки и значений измеренной концентрации взвешенных наносов в точке получены следующие зависимости типа *SSC* = *f*(ρ) для снимков Sentinel-2 (формула 1) и Landsat 9 (формула 2):

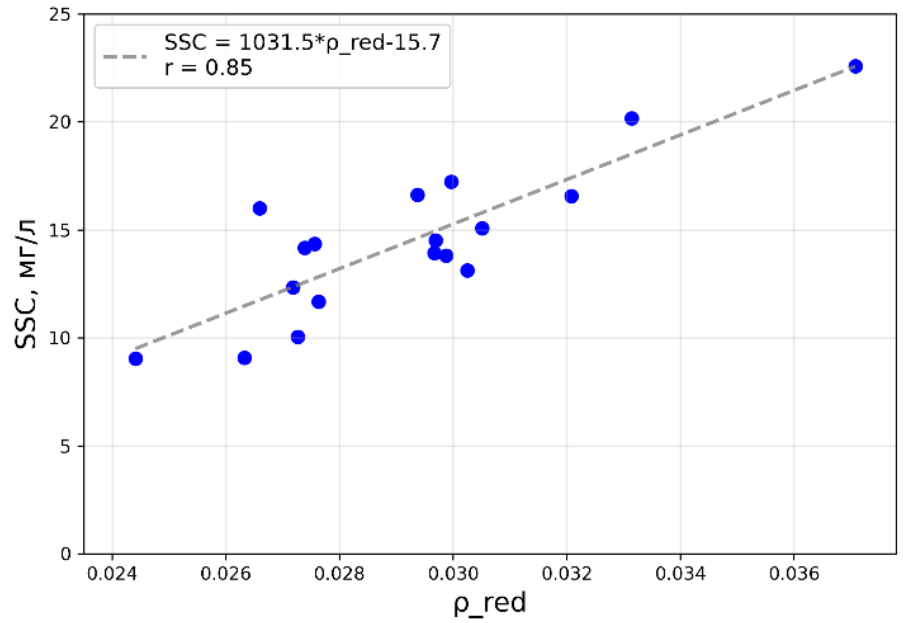
$$SSC = 1031{,}5 * \rho_{red} - 15{,}7 \quad (1)$$

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

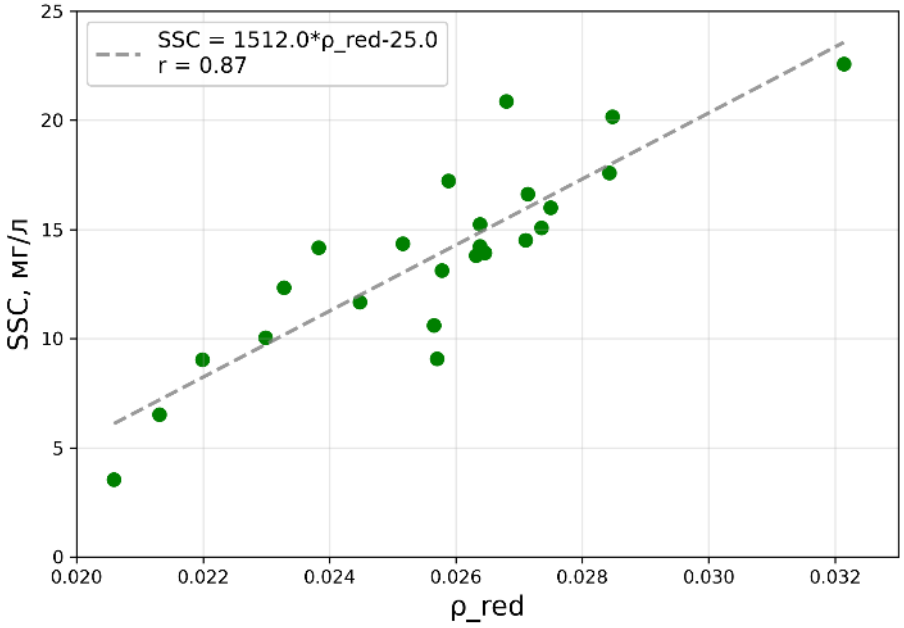
где *SSC* – концентрация взвешенных наносов (мг/л), ρ_{red} – коэффициент отражения на нижней границе атмосферы (BOA) в красном канале.

Полученные региональные зависимости (рис. 2.8) доказывают хорошую связь концентраций взвешенных наносов и коэффициентов отражения для красного диапазона спутниковых снимков. Диапазон изменения концентрации взвешенных наносов для разработки

дистанционной модели составил от 9,04 до 22,6 мг/л (для снимка Sentinel-2) и 3,55 до 22,6 мг/л (для снимка Landsat 9), а диапазон изменения средневзвешенной крупности наносов – от 14,0 мкм до 16,6 мкм.



(А)



(Б)

Рис. 2.8. График зависимости концентрации взвешенных наносов от коэффициента отражения для дельты Лены в 2022 г. по результатам обработки спутниковых снимков Sentinel-2(А) и Landsat 9 (Б)

2.2.3. Верификация разработанных моделей

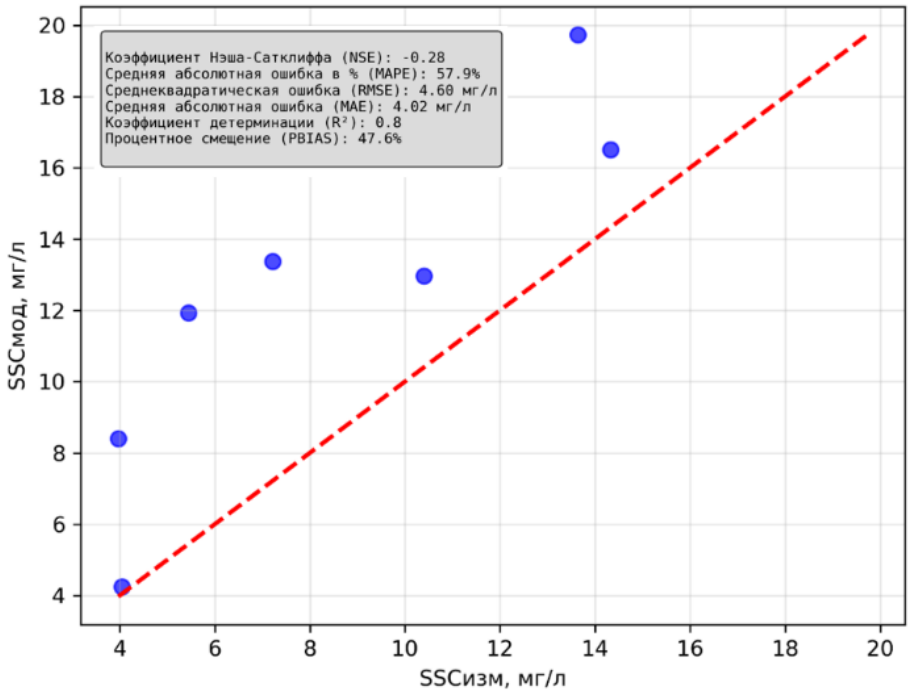
Верификация и оценка точности моделирования концентрации взвешенных наносов проводилась путем сравнения результатов моделирования с измеренными значениями в ходе экспедиции в дельту Лены в августе 2024 г. За период с 3 по 16 августа отобрано 95 проб воды,

из которых 68 в приповерхностном горизонте (на глубинах 0–0,5 м). Особенностями наблюдений в августе 2024 г. стало то, что первая часть измерений пришлась на аномально низкие расходы воды, отмечающиеся здесь в период летне-осенней межени. Также во время экспедиции уровни воды повысились в среднем на 1 м, что привело к значительному росту расходов воды (на 42–68% на различных участках дельты) в течение короткого временного интервала. Также вследствие высокой облачности, наблюдавшейся в течение всего периода экспедиции, единственный доступный спутниковый снимок получен 15 августа 2024 г., уже после завершения основной программы отбора проб воды. В целях синхронизации данных с пролетом спутника в этот день дополнительно отобрана одна проба воды в районе о. Самойловский. Таким образом, для верификации зависимостей также использованы данные, полученные 13–14 августа в Быковской, Трофимовской и Туматской протоках, что создает методологические ограничения.

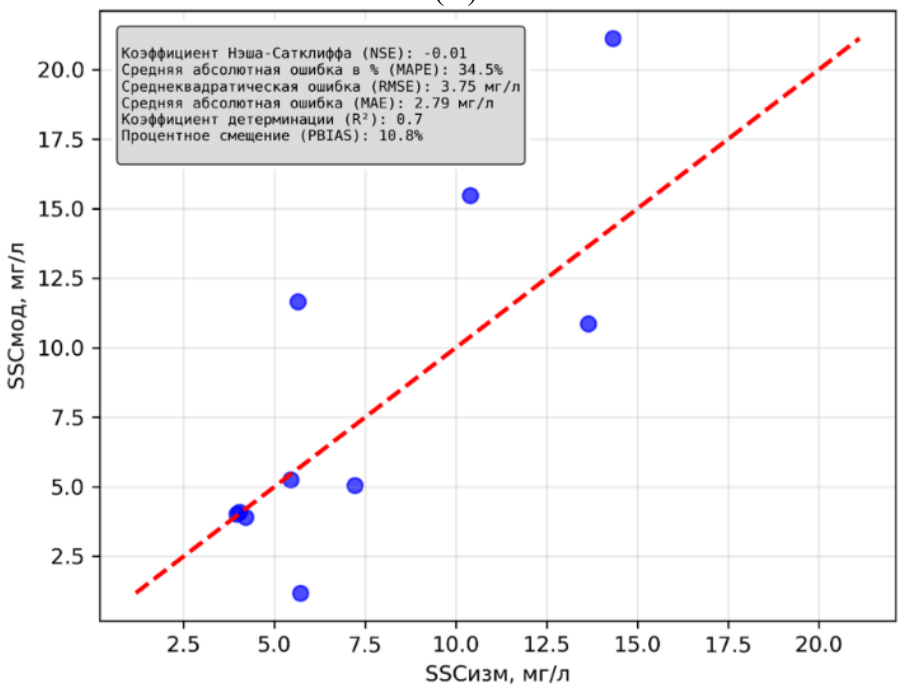
Для количественной оценки точности использован комплекс статистических метрик: критерий Нэша – Сатклиффа (NSE), средняя абсолютная ошибка в процентах (MAPE), среднеквадратическая ошибка (RMSE), средняя абсолютная ошибка (MAE), коэффициент детерминации (R^2) и процентное смещение (PBIAS). Результаты сопоставления измеренных и смоделированных значений представлены на рис. 2.9.

Полученные результаты демонстрируют удовлетворительную точность моделей в условиях анализа низкой концентрации взвешенных наносов, характерной для межени. Для алгоритма, основанного на данных Sentinel-2, коэффициент детерминации R^2 составил 0,80, что указывает на удовлетворительное соответствие общей тенденции изменений, однако значение коэффициента Нэша – Сатклиффа (–0,28) свидетельствует о недостаточной точности модели в количественном воспроизведении абсолютных значений. Средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) достигает 58%, а систематическое смещение (PBIAS) составляет +47,6%, что означает устойчивую тенденцию к завышению оценок примерно в полтора раза относительно измеренных значений.

Для модели на основе данных Landsat отмечаются несколько лучшие показатели: при схожем коэффициенте детерминации (R^2 = 0,70) значения метрик точности оказались существенно выше. Коэффициент Нэша – Сатклиффа близок к нулю (–0,01), что хотя и не достигает удовлетворительного порога (> 0,5), указывает на меньшую систематическую ошибку. Средняя абсолютная процентная ошибка составила 34,5%, что почти вдвое ниже, чем для Sentinel-2, а систематическое смещение уменьшилось до +10,8%, что уже соответствует удовлетворительному уровню согласно общепринятым критериям.



(А)



(Б)

Рис. 2.9. Результаты верификации региональных спутниковых моделей определения *SSC* в дельте Лены: сравнение измеренных ($SSC_{изм}$) и смоделированных ($SSC_{мод}$) значений для снимка Sentinel-2 (А) и Landsat (Б)

Основной источник погрешности – временной лаг между отбором проб (13–14 августа) и спутниковой съемкой (15 августа) (таблица 2.2), а также изменчивость уровней воды. За двое суток расходы воды в главных протоках дельты увеличились на десятки процентов, что неизбежно привело к изменению концентрации взвешенных наносов. Синхронные подспутниковые наблюдения (включающие одну пробу, отобранную 15 августа в районе о. Самойловский) демонстрируют минимальную относительную ошибку (MAPE = 6,09% для

Sentinel-2 и 2,77% для Landsat). Ранее проведенная верификация моделей дистанционного определения концентрации взвешенных наносов для среднего и нижнего течения р. Лены показывает более высокую точность (MAPE до 15% и MAE до 3 мг/л) [Chalov, Prokopeva, 2022] при совпадении даты спутникового снимка и подспутниковых наблюдений. Дополнительный фактор, влияющий на высокие значения ошибок, – экстремально низкий диапазон измеряемых концентраций (3,97–14,3 мг/л), в котором даже незначительные абсолютные расхождения приводят к высоким значениям относительных ошибок.

Таблица 2.2. Смоделированные значения концентрации взвешенных наносов по зависимости (формулы 1 и 2) для участка дельты Лены за период с 13 по 15 августа 2024 г. для спутниковых снимков Sentinel-2 и Landsat

Sentinel-2					
Дата подспутниковых измерений	Дата спутниковой съемки	$SSC_{изм}$, мг/л	$SSC_{мод}$, мг/л	MAE, мг/л	MAPE, %
13.08.2024	15.08.2024	7,22	13,4	6,16	85.3
13.08.2024		10,4	13,0	2,57	24,7
13.08.2024		14,3	16,5	2,17	15,2
14.08.2024		5,45	11,9	6,48	119
14.08.2024		3,97	8,40	4,43	112
14.08.2024		4,04	4,25	0,21	5,17
15.08.2024		13,6	19,7	6,09	44,6
Среднее		8,44	12,45	4,02	58,0
Landsat					
Дата подспутниковых измерений	Дата спутниковой съемки	$SSC_{изм}$, мг/л	$SSC_{мод}$, мг/л	MAE, мг/л	MAPE, %
13.08.2024	15.08.2024	7,22	5,06	2,15	29,8
13.08.2024		10,4	15,5	5,08	48,8
13.08.2024		14,3	21,1	6,79	47,3
14.08.2024		5,71	1,18	4,52	79,2
14.08.2024		5,65	11,7	6,00	106
14.08.2024		5,45	5,26	0,19	3,51
14.08.2024		3,97	4,02	0,05	1,38
14.08.2024		4,20	3,91	0,29	6,96
14.08.2024		4,04	4,10	0,06	1,45
15.08.2024		13,6	10,9	2,77	20,3
Среднее		7,46	8,27	2,79	34,5

Таким образом, результаты проведенной оценки точности моделирования концентрации взвешенных наносов по данным дешифрирования спутниковых снимков подтверждают принципиальную возможность использования спутниковых данных для мониторинга стока взвешенных наносов в дельте Лены, но выявляют существенные ограничения, связанные с

временной изменчивостью гидрологического режима и экстремально низкими фоновыми концентрациями в период межени. Для повышения точности количественных оценок необходима разработка сезонных зависимостей с учетом изменений уровней воды и организации синхронных (в день съемки) подспутниковых натурных измерений. Полученные результаты являются основой для дальнейшего совершенствования методов дистанционной оценки стока взвешенных наносов в арктических дельтах с учетом их специфического гидрологического режима.

2.2.4. Алгоритм обработки спутниковых снимков

Разработка алгоритма дешифрирования космических снимков осуществлялась в программных средах ArcGIS и QGIS. Впоследствии разработанный спутниковый алгоритм интегрирован в облачную платформу для геопространственного анализа данных Google Earth Engine. Доступ к системе и управление осуществлялись через интерфейс прикладного программирования (API). Для обработки спутниковых снимков написан сценарий (программный код) обработки данных в интерактивной среде разработки на JavaScript API.

Процесс обработки снимков осуществлялся в два этапа:

I этап

В первую очередь для получения качественных результатов снимки за разные даты и с разных датчиков (TM, ETM+, OLI/TIRS) требуют предварительной обработки по устранению искажений, возникающих вследствие технических причин и природных факторов. Так называемое эталонирование снимков позволяет анализировать и сравнивать данные в пределах одной сцены, а также за разные временные промежутки.

Для качественных результатов для каждого снимка проводились: радиометрическая калибровка, необходимая для работы с равнозначными значениями яркости на серии разновременных снимков, и атмосферная коррекция, направленная на исключение влияния дымки, что сказывается на значениях яркости [Hadjimitsis, Clayton, Hope, 2004].

Радиометрическая коррекция выполнялась для разных съемочных систем для того, чтобы получить равнозначные значения яркости на серии разновременных космических снимков. Необходимость проведения радиометрической коррекции связана с тем, что снимки, полученные с одного спутника, имеют очень схожие параметры и не требуют радиометрической коррекции, однако такая коррекция необходима при анализе снимков, полученных с различных спутниковых систем, имеющих определенный датчик. Также блики на водной поверхности, волнение, различный угол съемки, условия освещенности влияют на отражательную способность водного объекта, что создает дополнительную неоднородность для дешифрирования концентрации взвешенных наносов [Mobley, 1999]. При космической съемке влияние некоторых факторов учитывается при выборе времени съемки. Большинство спутников проводит съемку ближе к

полудню по местному времени для того, чтобы снизить влияние освещенности и наклона солнечных лучей.

Для выполнения радиометрической калибровки использовалось руководство, содержащее информацию о калибровочных коэффициентах для датчиков Landsat TM, ETM+ и OLI/TIRS [Chander, Markham, Helder, 2009].

С помощью радиометрической калибровки проводилось преобразование «сырых значений» DN (Digital Numbers) в физические единицы – значения спектральной энергетической яркости, получаемые спектральным датчиком излучения Lλ (at-sensor spectral radiance) на спутнике. Важным преимуществом платформы Google Earth Engine является наличие радиометрически скорректированной базы данных снимков Landsat в значениях TOA.

Атмосферная коррекция проводилась для исключения влияния атмосферной дымки, повышенной концентрации аэрозолей в воздухе и других явлений, влияющих на искажение яркостных значений пикселей одинаковых объектов [Hadjimitsis, Clayton, Hope, 2004]. Искажение атмосферой сигнала может достигать 90%, поэтому без применения процедуры атмосферной коррекции, при использовании серий снимков, одни и те же объекты на разных снимках будут иметь разную яркость.

Для проведения атмосферной коррекции, необходимой для работы с временными рядами, использовался метод Sensor Invariant Atmospheric Correction (SIAC) [Yin et al., 2018]. В его основе лежат данные продуктов MODIS MCD43 BRDF, необходимые для получения изображения поверхности Земли в высоком разрешении. Для ввода поправок на состояние атмосферы используются данные ECMWF CAMS в сочетании с моделью 6S [Yin, Lewis, Gómez-Dans, 2022]. Атмосферные параметры используются для коррекции коэффициентов отражения TOA и получения скорректированных с учетом атмосферы значений BOA. В ходе применения данного метода значения отражения на верхней границе атмосферы (TOA) пересчитывались в значения отражения на поверхности Земли (BOA).

II этап

Далее проводилась последовательная обработка откалиброванных (рис. 2.10-I) и откорректированных (рис. 2.10-II) снимков.

1. Переход от значений коэффициентов отражения к физическим величинам концентрации взвеси в воде осуществлялся путем ввода формулы (1 или 2), связывающей коэффициент отражения и *SSC*. Расчет проводился с использованием снимка в красном спектре (рис. 2.10-III).

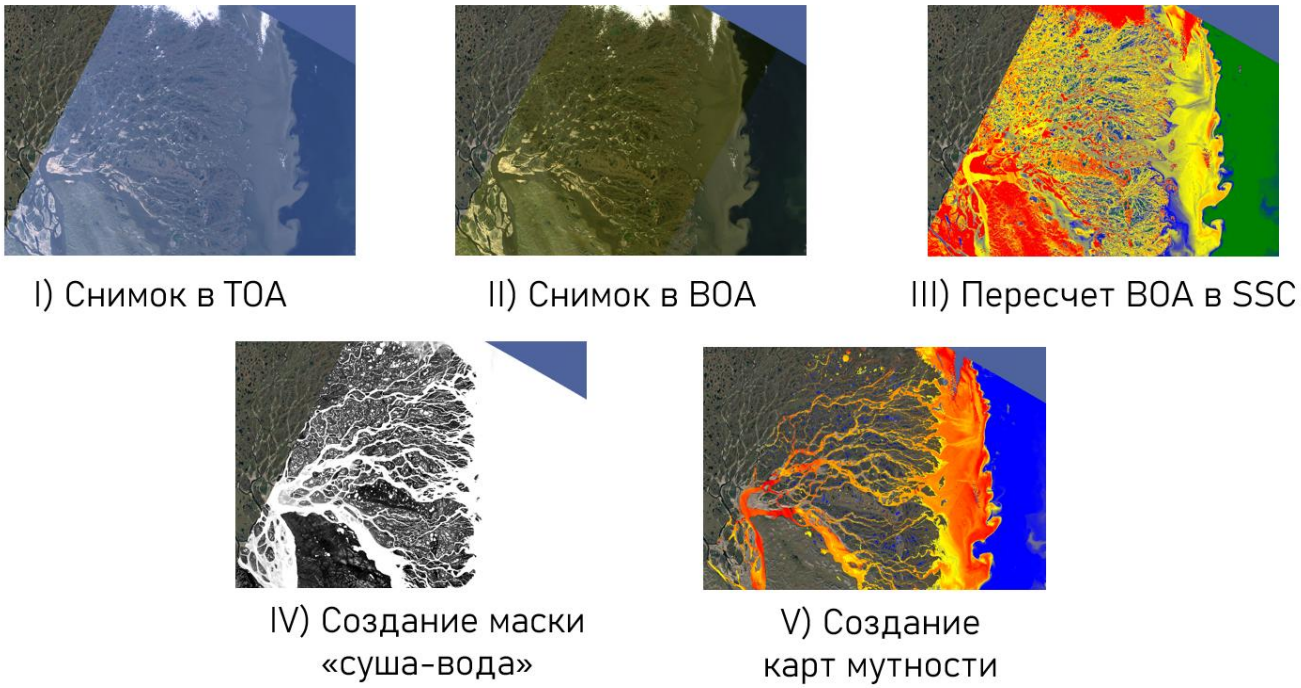


Рис. 2.10. Схема этапов дешифрирования спутниковых снимков на примере снимка Landsat 8 от 15 июня 2019 г. для территории дельты Лены

2. Создание слоя с атрибутивными данными пересчитанных значений на водной поверхности и на поверхности суши с целью удаления абстрактных значений. Для этого создавалась маска для каждого снимка путем расчета индекса NDWI, по которому проводилось разбиение на два слоя – вода и суша. На выходе было получено следующее изображение, где одним оттенком изображается водная поверхность, а вторым – поверхность суши (рис. 2.10-IV).

3. Полученный слой со значениями *SSC* обрезался по маске «вода–суша». В результате создавались карты распределения *SSC* – основной слой для дальнейших расчетов (рис. 2.10-V).

4. По полученному слою рассчитывались средние значения концентрации взвеси по различным участкам расчета продольного изменения стока взвешенных наносов. Таким образом, получены достоверные осредненные значения концентрации взвешенных наносов по потоку на каждом из участков.

2.2.5. Расчет продольного изменения стока взвешенных наносов

Концентрация взвешенных наносов в магистральных рукавах рассчитывалась по значениям, осредненным для полигонов, расположенных в соответствующих частях дельты: в вершине дельты и в магистральных рукавах: Быковская, Трофимовская, Туматская, Оленёкская (рис. 2.11). Участки расчета выделены в пределах дельтовой области на отдалении от МКД с целью минимизировать влияние сгонно-нагонных явлений со стороны моря.

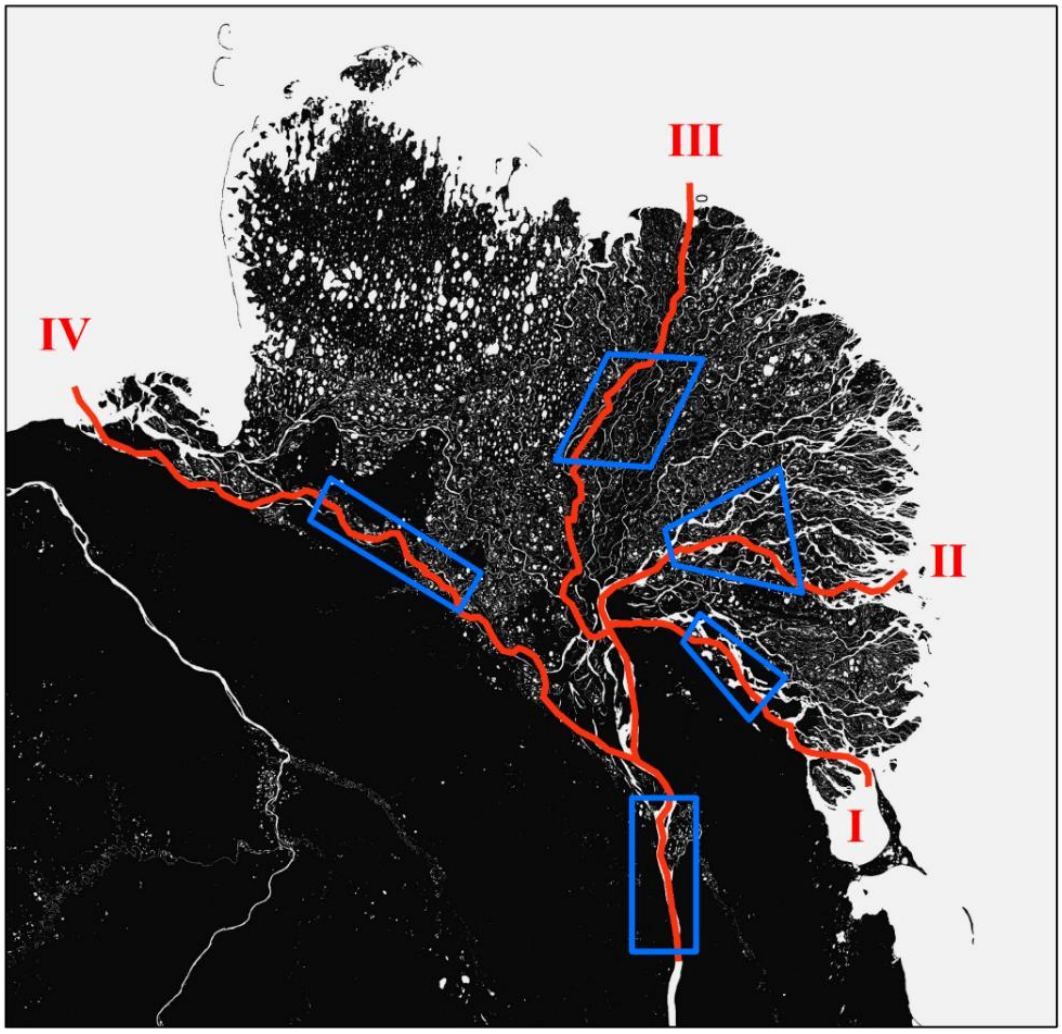


Рис. 2.11. Схема дельты р. Лены. Исследуемые магистральные рукава: I – Быковская, II – Трофимовская, III – Туматская, IV – Оленёкская

Для оценки продольных изменений стока взвешенных наносов в пределах дельты строились продольные профили изменения концентрации взвеси в воде. Изменение концентрации взвешенных наносов (ΔSSC, %) в магистральных рукавах относительно вершины дельты рассчитывалось по формуле:

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

где ΔSSC – относительное изменение концентрации взвешенных наносов (%), $SSC_{\text{МР}}$ – концентрация взвешенных наносов в магистральном рукаве (мг/л), $SSC_{\text{ВД}}$ – концентрация взвешенных наносов в вершине дельты (мг/л).

Отдельно рассматриваются ситуации положительных значений ΔSSC, соответствующих продольному увеличению концентрации взвешенных наносов от вершины дельты к магистральному рукаву, и отрицательных ΔSSC, соответствующих продольному уменьшению концентрации взвешенных веществ.

Для расчета расходов взвешенных наносов использованы результаты обработки данных акустического доплеровского профилографа течений, полученных в ходе экспедиционных исследований сотрудников географического факультета МГУ. Задействованы эмпирические зависимости вертикального распределения концентрации взвеси [Иванов, 2022], основанные на 76 измерениях, выполненных прибором River Ray 600 kHz на реках Терек, Обь, Колыма, Дон, Кубань, Енисей, Селенга с диапазонами изменения расходов воды от 3 до 105 799 м^3/с (глубина от 2 до 65 м, шириной от 9 до 3091 м. Использованная зависимость основана на обработке 219 046 вертикалей для семи рек с учетом допущения о гомогенности вертикального распределения концентрации взвеси, где концентрация наносов обусловлена лишь факторами гравитации и движущей силы потока, и с анализом только минеральных частиц (r = 0,98):

$$SSC_{\text{mean}} = 13{,}857 + 1{,}016 \cdot SSC_{sur}, \quad (4)$$

где SSC_{mean} – средняя концентрация взвеси по вертикали (мг/л), а SSC_{sur} – поверхностная концентрация взвеси (мг/л). Детали базы данных и процесса разработки зависимости (4) приведены в [Иванов, 2022].

Таким образом, значения поверхностной *SSC* на участках расчета пересчитаны в средние значения *SSC* по вертикали. Расход взвешенных наносов (*R*) вычислялся как произведение средней SSC_{mean} по вертикали на расход воды (*Q*) на участке:

$$R = Q * SSC_{mean} \quad (5)$$

Расходы воды на участках расчета осредненных значений концентрации взвешенных наносов брались в соответствии с изменчивостью распределения стока воды по рукавам в зависимости от расхода воды в вершине дельты согласно методике, приведенной в главе 2.1, и результатами ее применения в главе 3.

Годовой сток взвешенных наносов в море Лаптевых с учетом трансформации в рукавах дельты рассчитан на основе осреднения доступного массива данных по расходам взвешенных наносов за отдельные месяцы: июнь, июль, август и сентябрь. Сток за период ледостава оценивался на основе многолетнего мониторинга на г/п Кюсюр и «4,7 км выше о. Столб»: в период межени подо льдом проходит ~5% годового стока взвешенных наносов.

В ходе выполнения работы проанализирована трансформация стока взвешенных наносов в Быковской, Трофимовской, Туматской и Оленёкской протоках за период открытой воды, то есть с июня по октябрь за 2000–2024 гг. (рис. 2.12). Из-за большого размера дельты Лены собрано всего 130 снимков Landsat с 2000 по 2024 г. (на 97 дат) с изменением *Q* в вершине дельты от 16 100 до 96 600 м^3/с и 150 снимков Sentinel с 2017 по 2024 г. (на 97 дат) с изменением *Q* в вершине дельты от 10 900 до 106 000 м^3/с. Снимки охватывают в основном только участки Главного Русла, Быковской и Трофимовской проток дельты Лены. Имеется небольшое количество снимков для Оленёкской и Туматской проток, что связано с особенностями траекторий движения спутника и

неблагоприятными погодными условиями на этой широте в период с июня по сентябрь – многие снимки не подлежат обработке из-за высокой облачности (тень от облаков дает ложные значения отражения от поверхности).

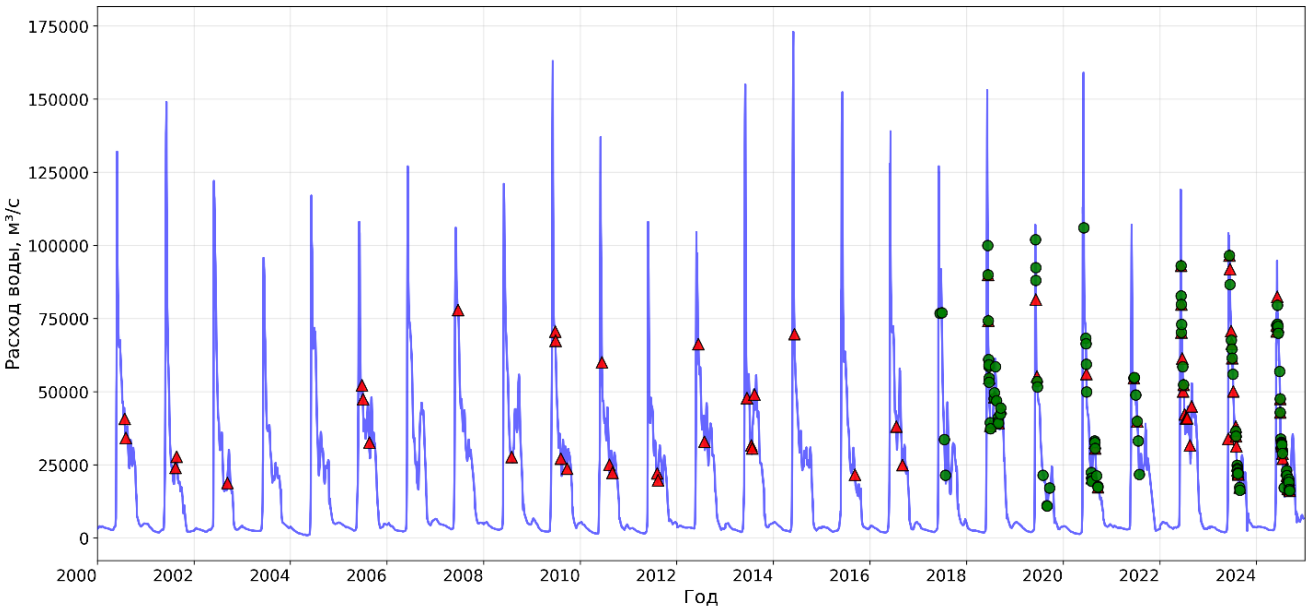


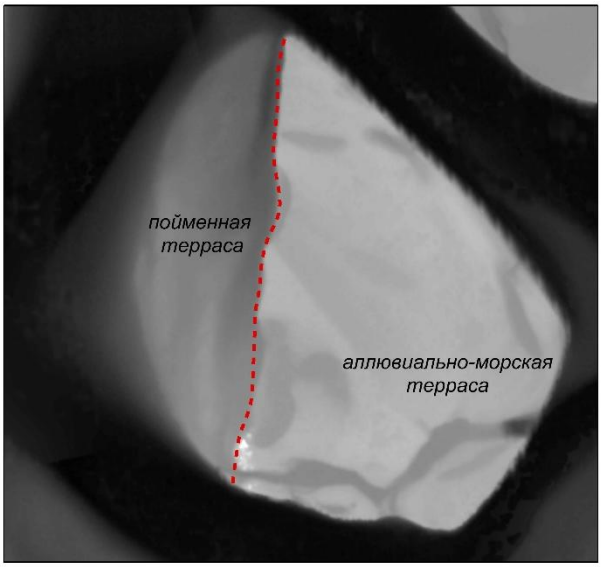
Рис. 2.12. Ход расходов воды по г/п Кюсюр и спутниковые данные (красные треугольники – снимки Landsat, зеленые круги – снимки Sentinel), полученные за период с 2000 по 2024 г.

2.3. Оценка плановых переформирований и расчет поступления наносов

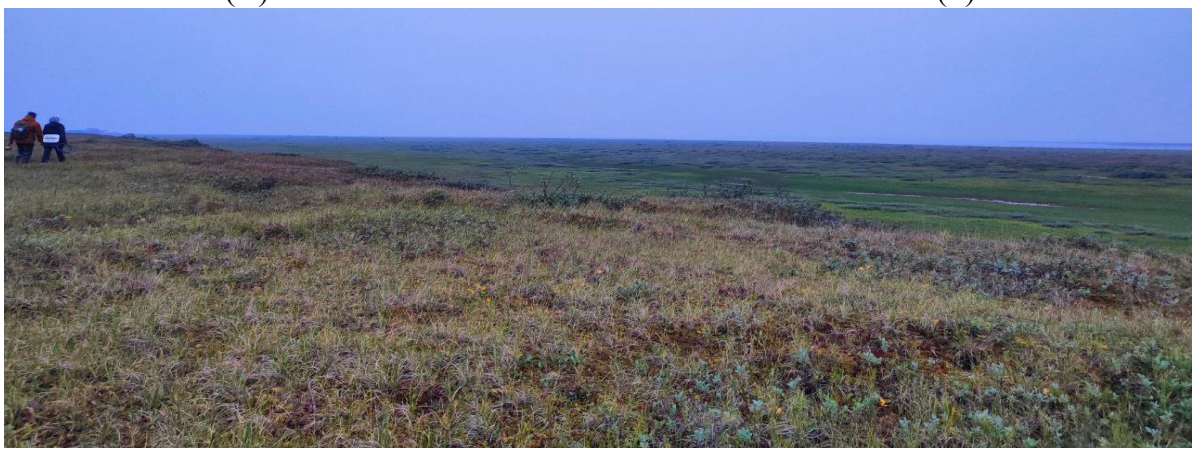
Русловой режим дельты р. Лены изучался в ходе анализа интенсивности разрушения мерзлых берегов аллювиально-морской террасы (рис. 2.13-Д), которые являются источником поступления взвешенных наносов. Из анализа исключены участки пойменной террасы (рис. 2.13-Г), которая ежегодно затопляется при прохождении половодья и паводков (рис. 2.13).



(А)



(Б)



(В)



(Г) (Д))

Рис. 2.13. Снимок о. Самойловский в естественных цветах (А) и на ЦМР (Б) с выделением границы (В) между пойменной (Г) и аллювиально-морской террасой (Д)

Анализ проводился на основе сопоставления серий спутниковых снимков. Для изучения многолетних горизонтальных переформирований использовались следующие спутниковые снимки:

1) KeyHole программы «Corona» за 1964 г. (рис. 2.14-А). Особенность данной спутниковой съемки – отсутствие геопространственной привязки и одноканальная съемка с высоким пространственным разрешением 1 м, а также то, что для открытого пользования доступна лишь часть снимков [Dashora, Lohani, Malik, 2007]. Всего к пространственной основе вручную

привязано (как минимум по 40 контрольным точкам) 35 стереопар за период с 13 по 17 июля 1964 г.;

2) Landsat 7 за 2000 г. (рис. 2.14-Б). Преимущество этих данных в их открытом доступе и в том, что они получены мультиспектральными сканерами, что позволяет применять к ним автоматические методы дешифрирования. Однако ограничением является их грубое пространственное разрешение – 30 м. Всего в работе было использовано четыре снимка за период с 18 по 27 июля 2000 г.;

3) Sentinel-2 с высоким (10 м) пространственным разрешением в мультиспектральном диапазоне (рис. 2.14-В). Всего для покрытия всех проток дельты Лены использовано восемь снимков, полученных 8–9 июля 2024 г. Подбор снимков осуществлялся таким образом, чтобы можно было охватить больший доступный период с начала осуществления съемки до последних лет. Также важно то, чтобы снимки описывали один период водности и характеризовали смежные условия по уровням или расходам воды. Для сопоставления снимков использовались расходы воды по г/п Кюсюр, предоставляемые ресурсом ArcticGRO. Рассматриваемые снимки характеризуют спад половодья, что позволяет дешифрировать очертания береговой бровки для анализа русловых переформирований.

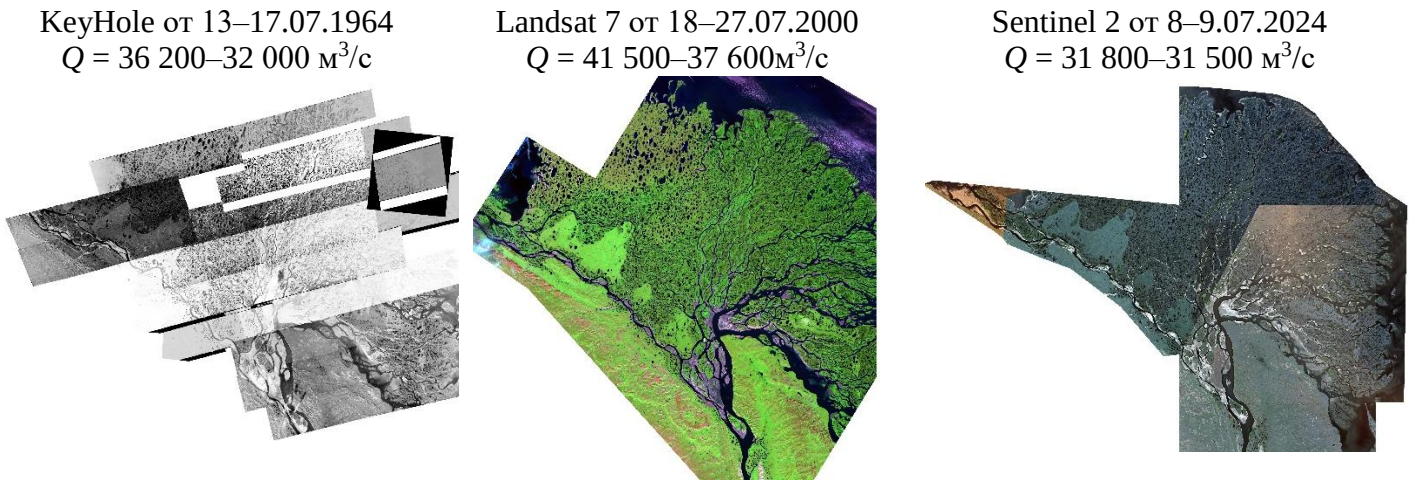


Рис. 2.14. Спутниковые снимки, используемые в анализе русловых деформаций

Таким образом, период, охваченный в анализе, составил 60 лет (с 1964 по 2024 г.), с разбивкой на два подпериода: условно до начала климатических изменений – 1964–2000 гг. и активных климатических изменений – 2000–2024 гг.

Обработка спутниковых снимков проводилась двумя способами: ручная оцифровка береговой линии и полуавтоматическая контролируемая классификация с созданием обучающих выборок. Дешифрирование проводилось в ArcGIS 10.8 при помощи встроенных инструментов Arc Toolbox.

Использование ручной оцифровки – наиболее точный метод определения положения береговой линии, особенно в условиях разделения двух типов поверхности, которые в одноканальной съемке (снимки KeyHole черно-белые) становятся практически неразличимыми. Существенный недостаток – трудо- и времязатратность метода. Таким образом, вручную оцифровано свыше 800 островов и коренных берегов, суммарная береговая длина которых составляет >11 800 км. Для сопоставления и ретроспективного анализа плановых переформирований вручную обработаны спутниковые снимки Sentinel 2 за 2024 г. В общей сумме в работе ручным способом оцифровано ~23 600 км береговой линии (таблица 2.3).

Таблица 2.3. Характеристика оцифрованных вручную участков дельты Лены

Участок	Площадь участка, км^2	Длина русла, км	Длина оцифрованных берегов (за один год), км	Длина оцифрованных берегов (всего), км	Число линейных объектов, шт.
Трофимовская	4733	3593	3537	7073	285
Быковская	2389	1454	1744	3488	149
Туматская	7048	3242	5487	10 973	332
Оленёкская	1441	521	665	1329	38
Главное Русло	899	369	392	785	16
Сумма по дельте	16 510	9179	11 824	23 649	820

Для решения задач оценки темпов отступания берегов для больших территорий существуют различные алгоритмы и наборы последовательностей автоматической обработки мультиспектральных спутниковых снимков. Разработанные многочисленные методики и индексы автоматического определения положения водной поверхности [Fisher, Flood, Danaher, 2016a] основаны на разнице в отражательной способности различных типов земной поверхности при разной длине волны – их точность для отдельных индексов MNDWI [Xu, 2006b] и AWEIsh [Feyisa et al., 2014] может достигать 5% [Laonamsai et al., 2023; Liu et al., 2022; Zhou et al., 2017]. Тем не менее в условиях большого диапазона величин отражательной способности воды, связанной с наличием отмелей, а также осложняемых влиянием морских вод и высоким диапазоном изменения концентрации взвешенных наносов, данные методики показывают неудовлетворительный результат при применении их для дельты Лены. Использование базы данных GSWE – Global Surface Water Explorer [Pekel et al., 2016], созданной на основании обучаемой классификации коллекции снимков Landsat 5, 7 и 8 с 1984 г. по настоящее время (для большей части территории России – с 1999 г.) на основе системы распределенных вычислений Google Earth Engine [Gorelick et al., 2017], также невозможно, так как съемка этой территории началась лишь с 1999 г., а доступных снимков для статистически значимых результатов недостаточно для этого периода. С другой стороны, решение задачи оценки русловых

переформирований в данной работе связано не столько с выделением водной поверхности, сколько с учетом особенностей дельты – разделения двух поверхностей различных типов берегов.

Оптимальным методом учета разрушения высокольдистых берегов для дельты Лены стало применение обучаемой классификации растровых отображений. Полуавтоматическим методом проведена обработка спутниковых снимков Landsat 7 за 2000 г. и Sentinel 2 за 2024 г. для их сопоставления.

Алгоритм обработки спутниковых снимков был реализован в ArcMap 10.8. На первом этапе созданы растровые композиты (RGB), позволяющие визуально контрастно выделить два типа островов дельты: для снимков Landsat 7 таким стала комбинация каналов ShortWaveInfraRed2 (Band 7), NearInfraRed (Band 4), Green (Band 2) – эта комбинация дает изображение, близкое к естественным цветам, но в то же время позволяет анализировать различные типы растительности. Для Sentinel-2 использованы каналы Red (Band 4), Green (Band 3), Blue (Band 2) – комбинация «естественные цвета».

Далее на основе каждого растрового композита создавалась серия обучающих выборок (training sample), характеризующих такие поверхности, как водная поверхность, подводные отмели, песчаные отмели, аллювиально-морская терраса, пойменная терраса. Далее при помощи инструмента Maximum Likelihood Classification созданы слои, содержащие в каждом пикселе растра определенный присвоенный класс.

Классифицированные растры за 2000 г. объединялись (при помощи инструмента Combine) с аналогичными растрами за 2024 г., то есть каждой уникальной комбинации входных значений присваивается уникальное выходное значение.

Таким образом, из многообразия полученных слоев были идентифицированы те, которые на снимке 2000 г. представлены отложениями, свойственными аллювиально-морской террасе, а на снимке 2024 г. представляют собой водную поверхность. Эти участки дешифрируются как разрушенные в ходе термоэрозии, термоденудации или механического воздействия водного потока.

Полученный растровый слой был переведен в полигональный для дальнейшей работы с ним. Вручную проведена оценка достоверности расположения участков разрушения, то есть рассматривались только участки вдоль русла, исключая изменения береговой линии озер, расположенных на пойме и террасе. Таким образом получен полигональный слой, содержащий только полигоны береговых разрушений за период с 2000 по 2024 г. (рис. 2.15). По нему в дальнейшем проводились расчеты.

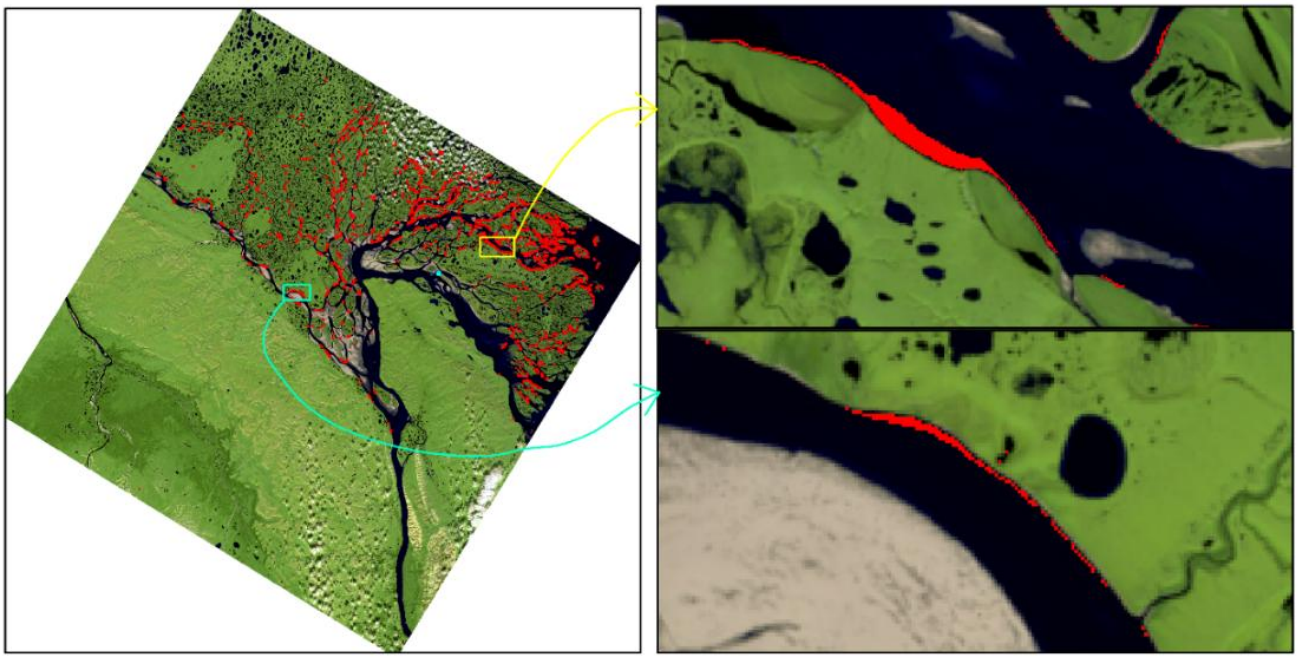


Рис. 2.15. Результат идентификации отступивших берегов

Отдельным блоком анализа климатически обусловленных переформирований стал анализ периодов 1964–2000 и 2000–2024 гг. на отдельных 49 ключевых участках (рис. 2.16).

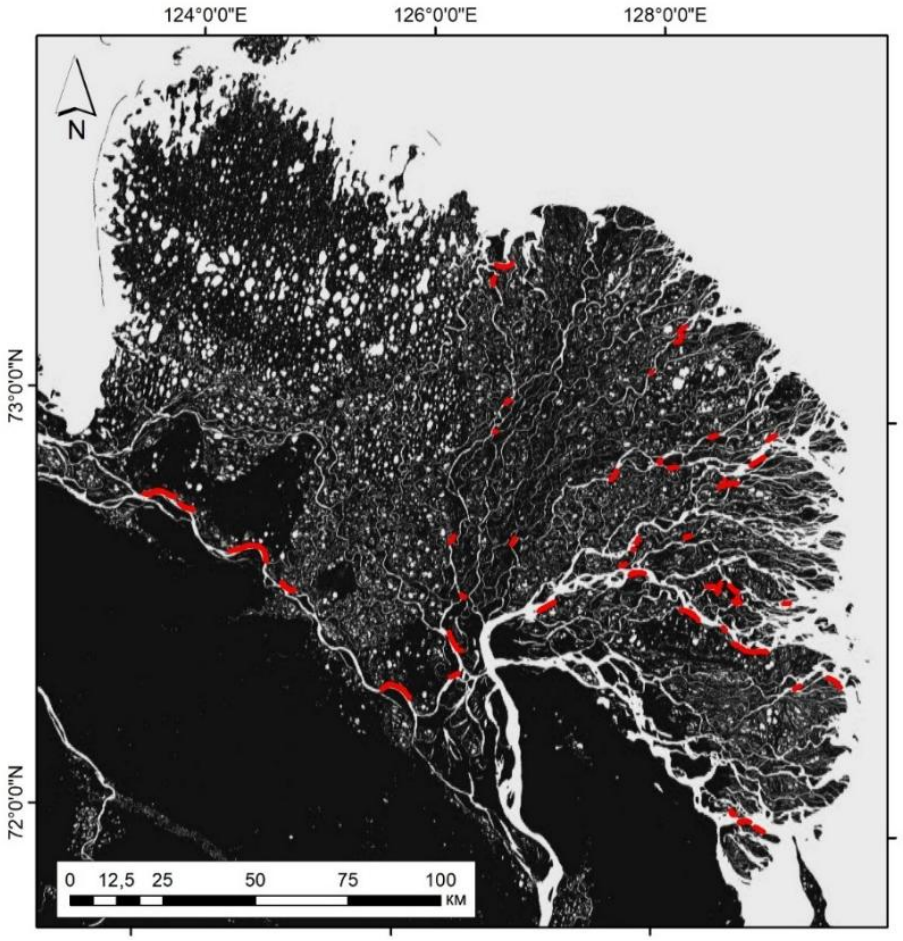
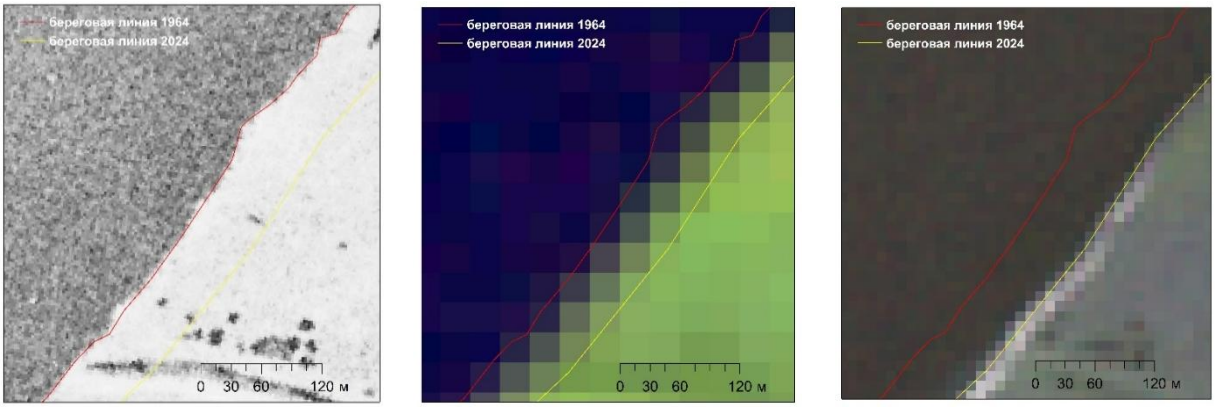


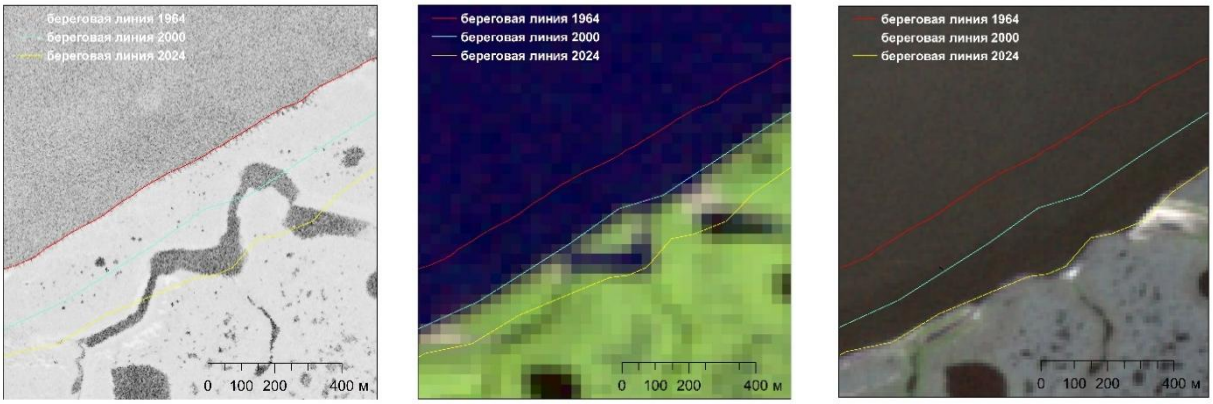
Рис. 2.16. Ключевые участки дельты, по которым проводилось сравнение темпов горизонтальных переформирований за периоды 1964–2000 и 2000–2024 гг.

Ручная оцифровка береговой линии за 2000 г. проведена только на участках максимальных переформирований, где точность этой оценки выходит за пределы пространственного разрешения снимков (рис. 2.17-Б). Для этого вручную оцифрована береговая линия на спутниковых снимках Landsat 7, пространственное разрешение которых составляет 30 м. Однако ручная оцифровка с допустимой точностью представляется невозможной для большей части дельты из-за низкого пространственного разрешения снимков Landsat и малого (24 года) периода (рис. 2.17-А).



Подложка снимок KeyHole 1964 | Подложка снимок Landsat 2000 | Подложка снимок Sentinel 2024

(А)



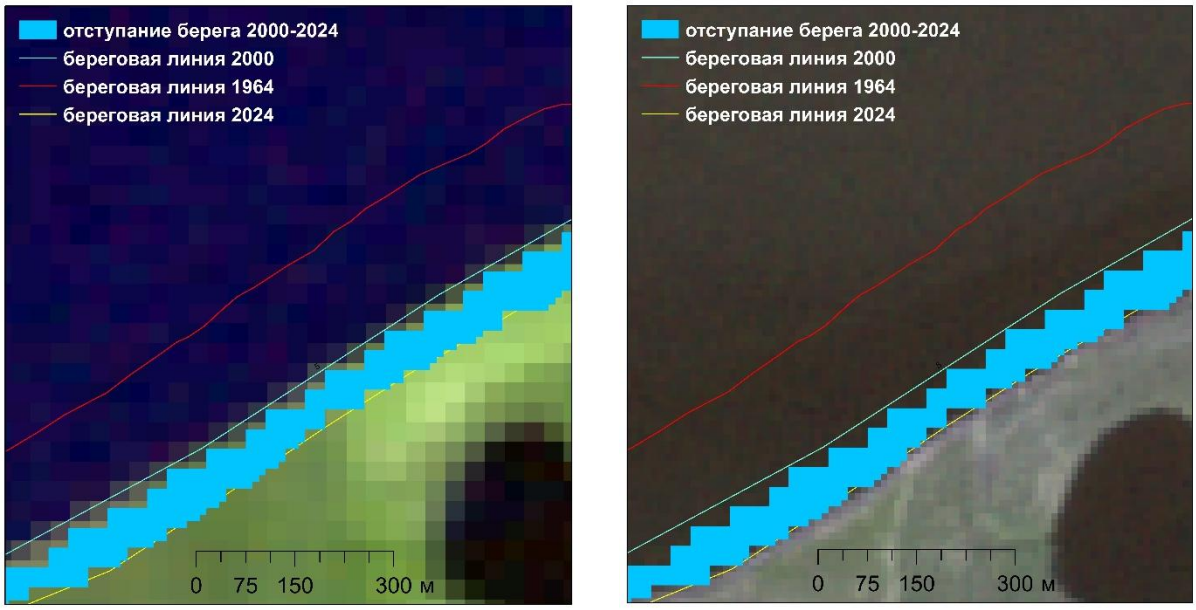
Подложка снимок KeyHole 1964 | Подложка снимок Landsat 2000 | Подложка снимок Sentinel 2024

(Б)

Рис. 2.17. Расположение береговой линии острова в Трофимовской протоке с 1964 по 2024 г. на снимках различного пространственного разрешения: (А) участок, где оцифровка береговой линии за 2000 г. на спутниковом снимке Landsat 7 невозможна, (Б) участок, где оцифровка возможна

С учетом всех допущений и точности двух различных методов количественная оценка русловых переформирований за 1964–2000 гг. проведена путем вычитания суммарных участков горизонтальных переформирований для всей дельты и по секторам, полученных за 1964–2024 гг. (ручной метод), и суммарных значений для всей дельты и по секторам, полученных за 2000–2024 гг. (полуавтоматический метод) (рис. 2.18). Визуально подтверждается также и то, что точность

полуавтоматического метода занижает истинные значения суммарных площадей разрушения за счет грубой обрезки по пикселям.



Подложка снимок Landsat 2000 г. Подложка снимок Sentinel 2024 г.

Рис. 2.18. Расположение береговой линии острова в Трофимовской протоке с 1964 по 2024 г. на снимках различного пространственного разрешения

Для оценки стока взвешенных наносов, поступающего за счет разрушений берегов ($W_{русл}$, т в год), использовалась средняя плотность отложений для дельты Лены, принятая как 270 кг/м^3. Отложения аллювиально-морской террасы преимущественно состоят из переслаивающихся растительных остатков и минеральной части (алевритов, доля которых составляет до 10–15%) [Большиянов и др., 2013; Григорьев, 1993]. С учетом того, что плотность алевритов составляет 2700 кг/м^3, а также с учетом содержания растительных остатков и льда объемная доля минеральной части в среднем по дельте 10%. Полученное значение согласуется с рассчитанной величиной, установленной ранее для отложений, слагающих берега дельты Лены [Fuchs et al., 2020]. Значения высот берегов получены с использованием цифровой модели рельефа ArcticDEM [Morin et al., 2016; Porter et al., 2018] вручную путем расчета максимальной (на береговом уступе) и минимальной (уровень водной поверхности принимается постоянным) высотной отметки в буферных зонах на полигонах разрушенных берегов за исследуемые периоды. Таким образом, формула расчета массы наносов, поступающих в результате русловых деформаций, имеет вид:

$$W_{русл} = S_{раз} * \rho_{отл} * h_{бер}, \quad (6)$$

где $S_{раз}$ – площадь разрушенного берега, м^2; $\rho_{отл}$ – плотность отложений, кг/м^3; $h_{бер}$ – высота берега, м.

Анализ пространственных различий проводился на основе регулярной сетки, которая была получена на основе русловой сети дельты при применении инструмента Create Fishnet. Для этого

вручную была оцифрована русловая сеть дельты, на основе которой буферными зонами размечена регулярная сетка. Размеры регулярной сетки составляют 5 км на 5 км.

Расчет площади разрушений и объема поступающей минеральной части внутри каждой ячейки сетки проводился в два этапа: изначально полигональный слой плановых переформирований при помощи инструмента Intersect (вычисляет геометрическое пересечение входных объектов) обрезался по границам сетки, а далее при помощи Spatial Join (соединяет атрибуты одного объекта с другим на основе пространственного соотношения. Целевые объекты и объединенные атрибуты из объектов объединения записываются в выходной класс объектов) проводилось объединение слоя регулярной сетки и уже обрезанного слоя размывов, площадь которых суммировалась внутри ячейки.

В условиях многочисленных проток и рукавов дельты расчет интенсивности площадных и объемных характеристик разрушений сложен, поэтому введен показатель, который рассчитывался как суммарная площадь разрушенного берега внутри ячейки. Так этот показатель позволяет проводить пространственный анализ интенсивности русловых переформирований.

Таким образом, разработана и апробирована комплексная методика анализа русловых переформирований, сочетающая ручную оцифровку береговой линии (для снимков KeyHole и современных снимков Sentinel-2) и полуавтоматическую контролируемую классификацию (для снимков Landsat и Sentinel.). Комбинация методов позволила компенсировать недостатки отдельных подходов: трудоемкость ручного дешифрирования и ограничения автоматических алгоритмов в условиях высокой пространственной неоднородности арктической дельты. Предложенный алгоритм расчета выноса наносов вследствие плановых переформирований, включающий учет геоморфологических особенностей дельты и корректировку объемной доли минеральной части с учетом содержания растительных остатков и льда, позволяет количественно оценить вклад разрушения берегов в общий сток взвешенных наносов, что важно для понимания развития эрозионно-аккумулятивных процессов в арктических дельтах в условиях климатических изменений.

Выводы к главе 2

1. Разработан и адаптирован граф-теоретический подход RivGraph для расчета распределения стока воды по рукавам дельты Лены. На основе 311 натурных измерений (1981–2024 гг.) впервые для данного объекта получено узловое соотношение «ширина–расход» со степенным показателем 1,7. Верификация на независимых данных 2022 и 2024 гг. показала высокую точность: R^2 = 0,96, NSE = 0,95, MAPE = 25,8%. Выявлено систематическое занижение расходов в Трофимовской протоке (~20%) вследствие ее морфологической роли как продолжения

Главного Русла, что задает направление для дальнейшей калибровки. Модель применима в период открытой воды для верхних и средних участков рукавов вне зоны морского подпора.

2. Разработаны региональные спутниковые алгоритмы оценки концентрации взвешенных наносов на основе линейной зависимости от коэффициента отражения в красном канале для Sentinel-2 и Landsat 8–9. Калибровка выполнена по данным экспедиции 2022 г., верификация – 2024 г. Для Landsat получена удовлетворительная точность (R^2 = 0,70, MAPE = 34,5%, PBIAS = +10,8%); основной источник погрешности — временной лаг между отбором проб и датой спутниковой съемки. Алгоритмы реализованы в Google Earth Engine; за 2000–2024 гг. обработано 280 снимков.

3. Разработана методика количественной оценки плановых береговых переформирований на основе сопоставления снимков трех эпох: KeyHole 1964 г. (~1 м), Landsat 2000 г. (30 м) и Sentinel-2 2024 г. (10 м). Ручной оцифровкой обработано свыше 800 островов (>23 600 км береговой линии); для периода 2000–2024 гг. применена полуавтоматическая обучаемая классификация. Масса наносов от береговых разрушений рассчитывается по площади деформаций, высоте берегового уступа (ArcticDEM) и скорректированной плотности отложений (270 кг/м³ с учетом льда и растительных остатков). Показано, что автоматический метод систематически занижает площади разрушений вследствие ступенчатой пиксельной границы, что учитывается при интерпретации результатов.

Глава 3. Закономерности распределения стока воды по рукавам дельты Лены

3.1. Морфометрические характеристики совокупности дельтовых рукавов и проток

Автоматизированное построение графовых моделей на основе масок водной поверхности позволило впервые получить количественные оценки сезонной изменчивости морфометрических характеристик для большинства элементов русловой сети дельты Лены для условий летне-осенней межени (при Q в вершине дельты ~20 000 м³/с) и спада половодья (~70 000 м³/с). Анализ данных выявил контрастные межсезонные изменения гидрографических и морфометрических параметров русловой сети дельты (таблица 3.1).

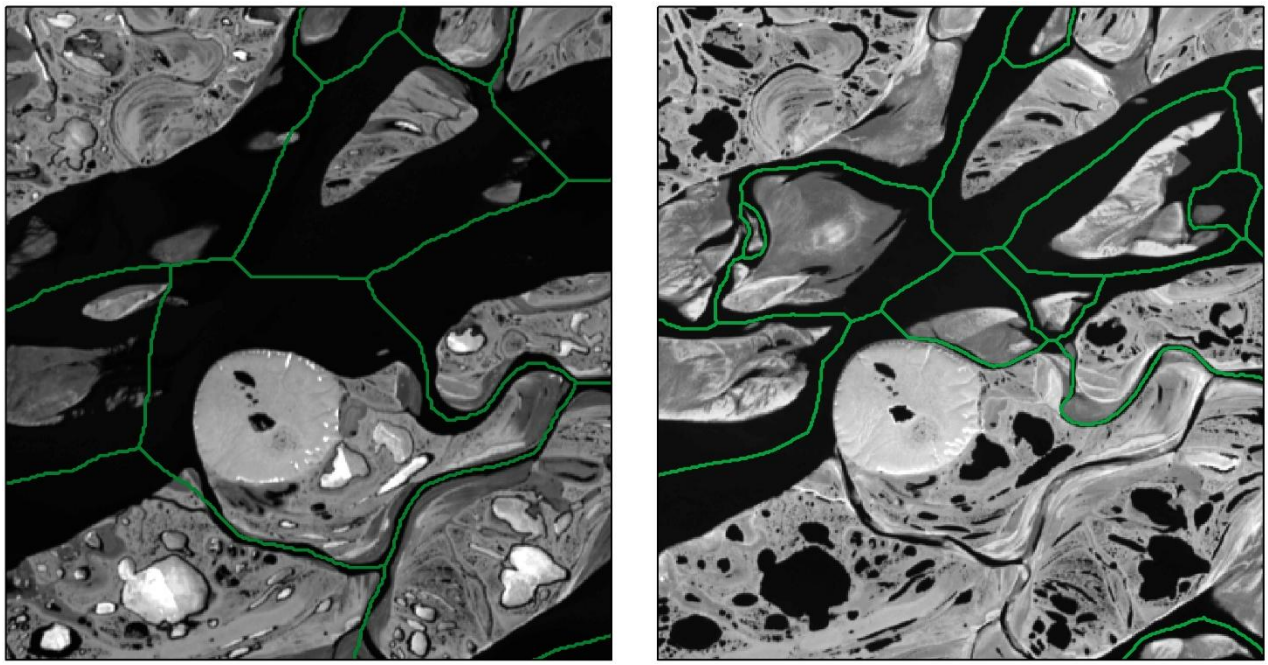
Таблица 3.1. Сравнительные морфометрические характеристики графа русловой сети дельты Лены

Характеристика	Межень	Спад половодья
Общие параметры русловой сети		
Площадь водной поверхности (F), км^2	4300	7140
Количество водотоков (N_L)	2045	1571*
Количество узлов (N_V)	1318	1018
Количество устьевых створов (N_O)	113	82
Количество узлов слияния (N_C)	603	470
Количество узлов бифуркации (N_B)	715	548
Коэффициент рекомбинации ($a = N_C/N_B$)	0,84	0,86
Густота русловой сети (L_{sum}/F)	1,48	1,02
Связность сети ($2* N_L/N_V$)	2,85	2,95
Характеристика рукавов		
B_{mean}, км	0,64	1,08
B_{median}, км	0,42	0,61
B_{max}, км	4,35	10,6
B_{min}, км	0,06	0,08
L_{mean}, км	3,11	4,63
L_{max}, км	78,3	50,4
L_{min}, км	0,03	0,08
L_{sum}, км	6350	7270

*~500 водотоков исключаются из структуры русловой сети за счет затопления осередков.

В межень русловая сеть дельты Лены становится более дробной и разветвленной. При сокращении площади водной поверхности количество рукавов и узлов возрастает на 30%, а число устьевых створов на морском крае дельты – на 38%. 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

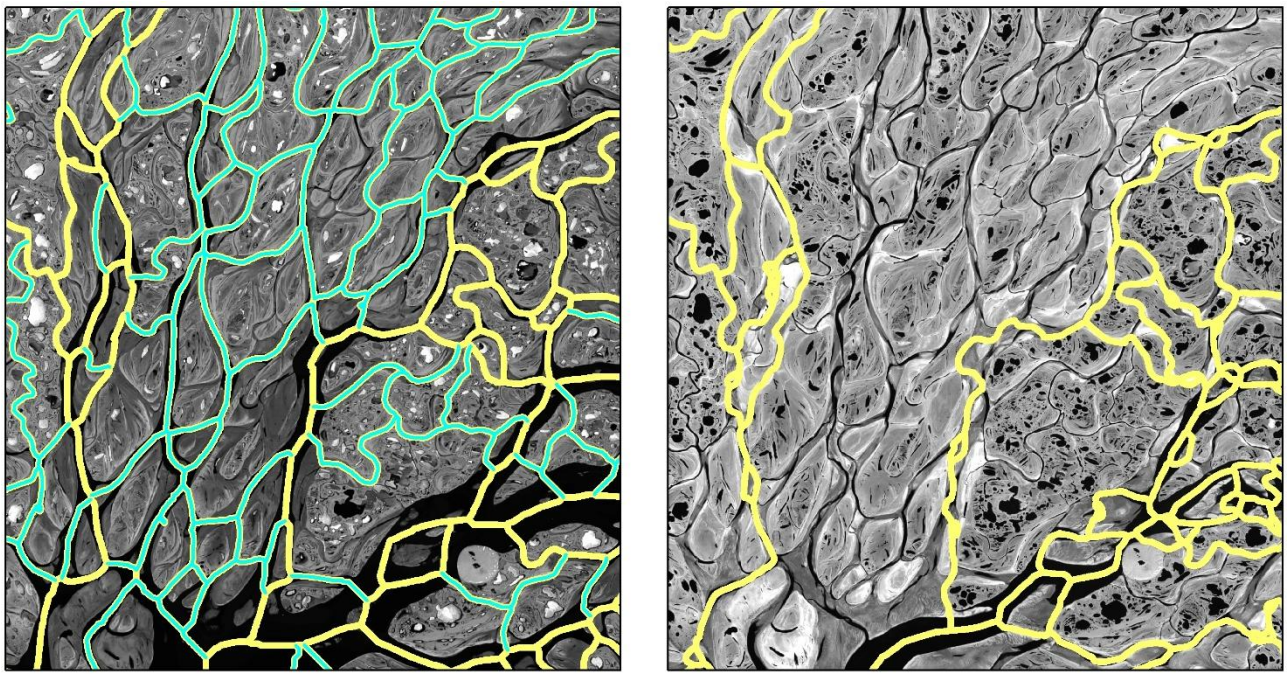
демонстрирует то, что затопленные в половодье осередки и слившиеся протоки становятся дешифрируемы в межень. Коэффициент рекомбинации ($a = N_C/N_B$) при этом изменяется незначительно (0,84–0,86), что свидетельствует о сохранении общей структуры сети: число узлов бифуркации и слияния растет пропорционально. Например, на участке Трофимовской протоки в районе о. Сардах в половодье из 20 активных направлений стока (рис. 3.1-А) 5 проток в межень теряют связь с основным руслом, но образуются дополнительно 15 направлений стока, связанные с делением потока осередковыми разветвлениями (рис. 3.1-Б).



(А) (Б)

Рис. 3.1. Развитие осередковых разветвлений в Трофимовском узле: на спутниковом снимке Landsat на период спада половодья (А) и межени (Б). Зеленые линии – часть графовой схематизации русловой сети

В половодье происходит обратный процесс – по мере подъема уровней воды осередки и низкие острова затопляются, а потоки соседних рукавов и секторов сливаются, таким образом, идет сосредоточение потока в едином русле (рис. 3.1-А). В результате морфологически обособленные в межень элементы русловой сети перестают фиксироваться как самостоятельные водотоки, общая разветвленность сети снижается, а число устьевых створов на морском крае дельты сокращается, что также связано с затоплением осередков в нижних частях рукавов. В Туматском секторе в период повышенной водности затопление отмелей и низких островов обеспечивает наличие гидравлической связи малых проток с основным руслом. Снижение разветвленности сети в целом обусловлено, таким образом, затоплением морфологических элементов, которые, наоборот, формируют ее структуру в межень (рис. 3.2).



(А) (Б)

Рис. 3.2. Процесс «обсыхания» проток Туматского сектора: на спутниковом снимке Landsat на период спада половодья (А) и межени (Б). Желтые линии – часть графовой схематизации русловой сети, голубые – неактивные связи в межень

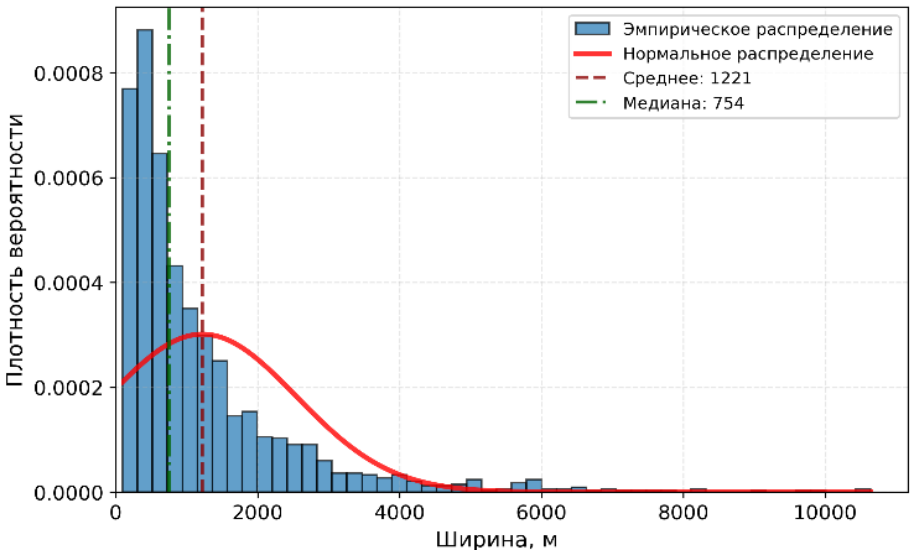
Рассчитанные в таблице 3.1 количественные показатели строения русловой сети подтверждают асимметричный характер трансформации. Во-первых, условная густота русловой сети, под которой в настоящей работе понимается сумма длин водотоков на единицу водной поверхности, возрастает в межень на 50% (с 1,02 до 1,48 км/км^2). То есть при сокращении водной поверхности сеть становится более густой на единицу площади. Во-вторых, рассчитывался показатель связности сети. Он оценивается через среднюю степень узла – показатель, заимствованный из теории графов и характеризующий среднее число рукавов, сходящихся в одном узле сети. Вычисляется как $2*N_L/N_V$, где N_L – число рукавов, N_V – число узлов, а множитель 2 учитывает, что каждый рукав соединяет два узла. Согласно табл. 1, связность сети снижается незначительно – на 3,4% (с 2,95 до 2,85). Это отражает разрыв гидравлических связей в малых протоках. В-третьих, 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).

Сезонные колебания водности влияют на разветвленность русловой сети дельты Лены, при этом главные рукава и узлы их бифуркации и слияния сохраняются вне зависимости от фазы гидрологического режима. Такое изменение структуры сети дельтовых рукавов и проток обеспечивает сохранение транспортирующей (или пропускной) способности дельты при значительном снижении водности.

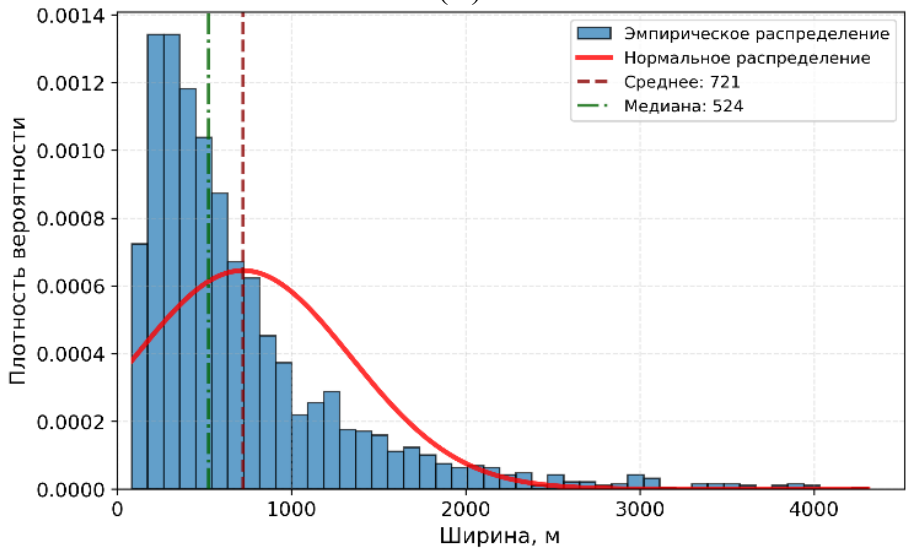
Сезонные изменения ширины и длины рукавов согласуются с перестройкой структуры русловой сети. Средняя ширина (B_{mean} рассчитывалось как медианное значение средних ширин всех рукавов) уменьшается в межень в 1,5 раза (с 1,08 до 0,64 км), максимальная (B_{max}) – в 2,4 раза (с 10,6 до 4,35 км), что отражает снижение водности и разделение русловых потоков осередками и островами.

Статистический анализ распределения B_{mean} относительно B_{median} демонстрирует его явное отличие от нормального (согласно тесту Шапиро – Уилка при p-value < 0,001) (рис. 3.3). Для обоих сезонов характерна выраженная правосторонняя асимметрия (коэффициент асимметрии 2,15–2,74), то есть сеть дельтовых рукавов характеризуется 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 (рис. 3.3) в качестве границы между двумя классами принято медианное значение ширины: в половодье оно составляет 754 м, в межень – 524 м.

Сезонная изменчивость статистических характеристик распределения B_{mean} свидетельствует о различной реакции рукавов разной ширины на изменение водности. Медиана распределения (характеризующая типичный рукав сети) сокращается с 754 до 524 м в (1,4 раза). Математическое ожидание, в большей мере отражающее вклад наиболее широких рукавов, снижается значительнее, с 1221 до 721 м (в 1,7 раза). Следовательно, сезонное сужение русел наиболее выражено в магистральных рукавах, тогда как ширина многочисленных малых проток изменяется в меньшей степени.



(А)



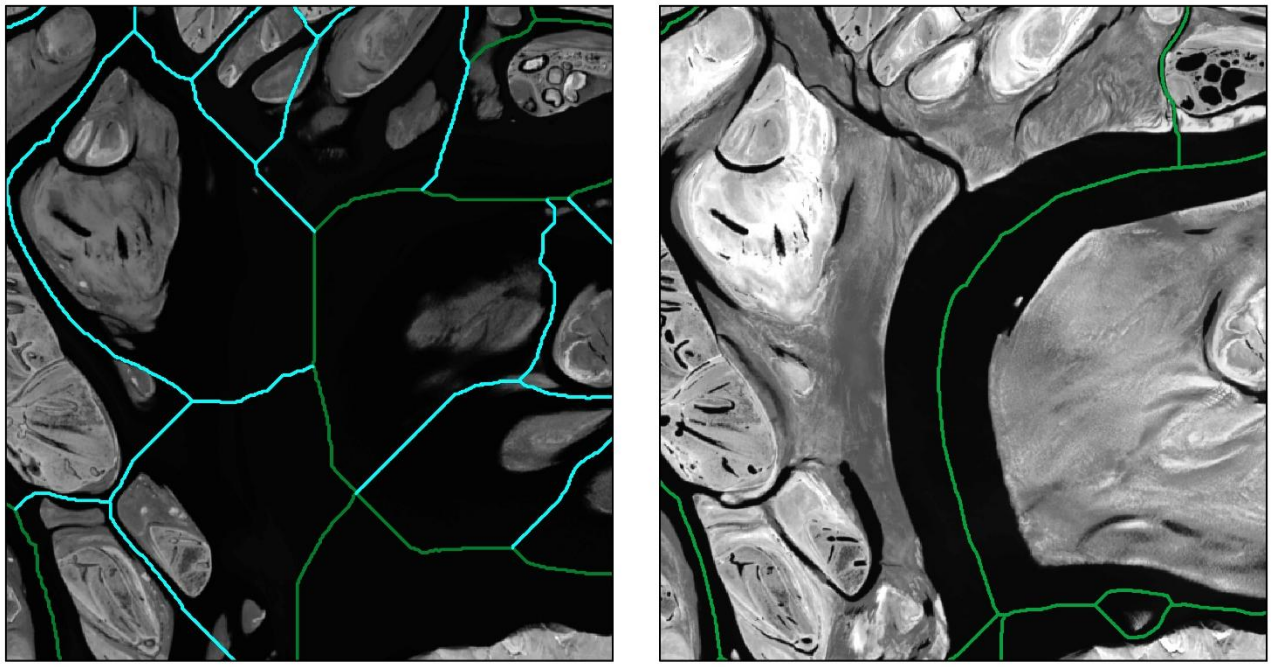
(Б)

Рис. 3.3. Гистограммы распределения средней ширины русел на спаде половодья (А) и в межень (Б)

В половодье (рис. 3.3-А) асимметрия возрастает на 27%, эксцесс – почти вдвое. Магистральные рукава расширяются за счет затопления пойм с большей величиной, чем малые протоки, что увеличивает разницу между описанными ранее двумя классами системы рукавов. В межень (рис. 3.3-Б) система становится статистически более однородной благодаря массовому развитию осередковых разветвлений и проток малой ширины.

Сезонные изменения длины рукавов носят более сложный характер и косвенно отражают перестройку морфометрии сети дельтовых рукавов. В настоящей работе под длиной водотока понимается его протяженность между смежными узлами бифуркации или слияния. Средняя длина проток сокращается в межень на 33%, что связано с развитием осередковых разветвлений и ростом числа узлов в сети: основной поток, разделяясь на множество мелких проток, формирует более короткие пути. Однако максимальная длина увеличивается на 55% – с 50,4 км в половодье до 78,3 км в межень. Это может свидетельствовать о сохранении транзитной функции наиболее

крупных рукавов при одновременном уменьшении длины вторичных проток, теряющих водообмен с основным руслом. Ярким примером удлинения проток служит верхнее течение Трофимовской протоки у о. Столб и ниже (рис. 3.4). В период повышенной водности пойменная терраса затопляется и расширяется, тем самым питая малые вторичные протоки Туматского и Трофимовского секторов. При падении уровней воды их связь с основным руслом теряется – количество отходящих связей уменьшается, что приводит к общему удлинению некоторых рукавов.



(А) (Б)

Рис. 3.4. Концентрация потока в едином русле Трофимовской протоки и процесс уменьшения количества рукавов вследствие потери водообмена между малыми протоками на спутниковом снимке Landsat на период спада половодья (А) и межени (Б). Зеленые линии – часть графовой схематизации русловой сети, голубые – неактивные связи в межень

Полученные морфометрические оценки служат основой для расчета распределения стока, рассматриваемого в разделе 3.2, где ширина рукава/протоки является прямой входной переменной в узловых соотношениях модели.

3.2. Распределение стока воды в периоды повышенной и пониженной водности

Полученные в разделе 3.1 количественные оценки сезонного изменения структуры русловой сети (увеличение густоты при снижении связности в межень, гистограммы распределения ширины) (рис. 3.3) служат ключом к интерпретации пространственной и сезонной изменчивости распределения стока в дельтовых рукавах.

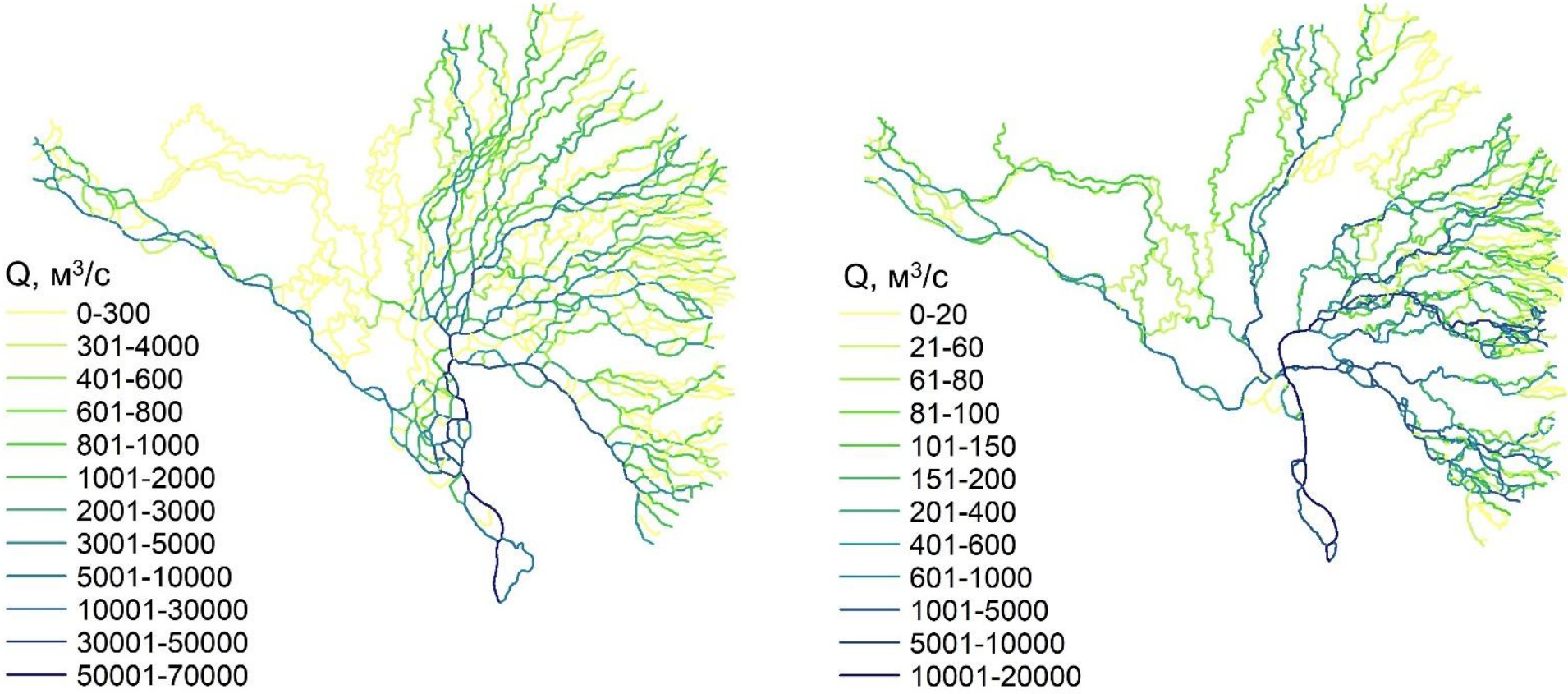
Общая пространственная картина для двух ключевых гидрологических фаз представлена на картах распределения абсолютных расходов (рис. 3.5) и долей от общего стока (%), поступающего в вершину дельты (рис. 3.5).

В период спада половодья (рис. 3.5-А, 3.6-А) при расходе воды в вершине дельты ~70 000 м^3/с увеличение уровней воды и затопление осередков, отмелей и низкой поймы обеспечивают прохождение воды по всем четырем секторам, включая малые поперечные протоки. Широкие затопленные русла обеспечивают прохождение основного стока воды, что отражается в формировании большего числа магистральных рукавов (рис. 3.6-А).

Основной сток в привершинной части распределяется между Главным Руслом и активной только при расходах воды >45 000 м^3/с Булкурской протокой, которая обеспечивает сток воды в Оленёкской протоке (~13% в вершине дельты). В основном узле разветвления у о. Столб сток поступает в Быковскую протоку (28%), которая на протяжении 100 км течет в относительно прямолинейном русле и лишь в нижней части разветвляется на многочисленные рукава, из которых сток распределяется по двум крупнейшим протокам, впадающим в залив Неелова. Также у о. Столб бóльшая часть стока поступает в Трофимовскую протоку (50%) и примерно на 25–30 км от истока разделяется по трем основным рукавам: Сардахская (10%), Большая и Малая Трофимовская (10%), а также Бурчах-Уэсэ (20%). В северном направлении основной сток концентрируется в сети параллельно направленных проток системы Большой Туматской (9%). В период повышенной водности активизируются малые протоки, благодаря чему сток свободно перераспределяется между секторами.

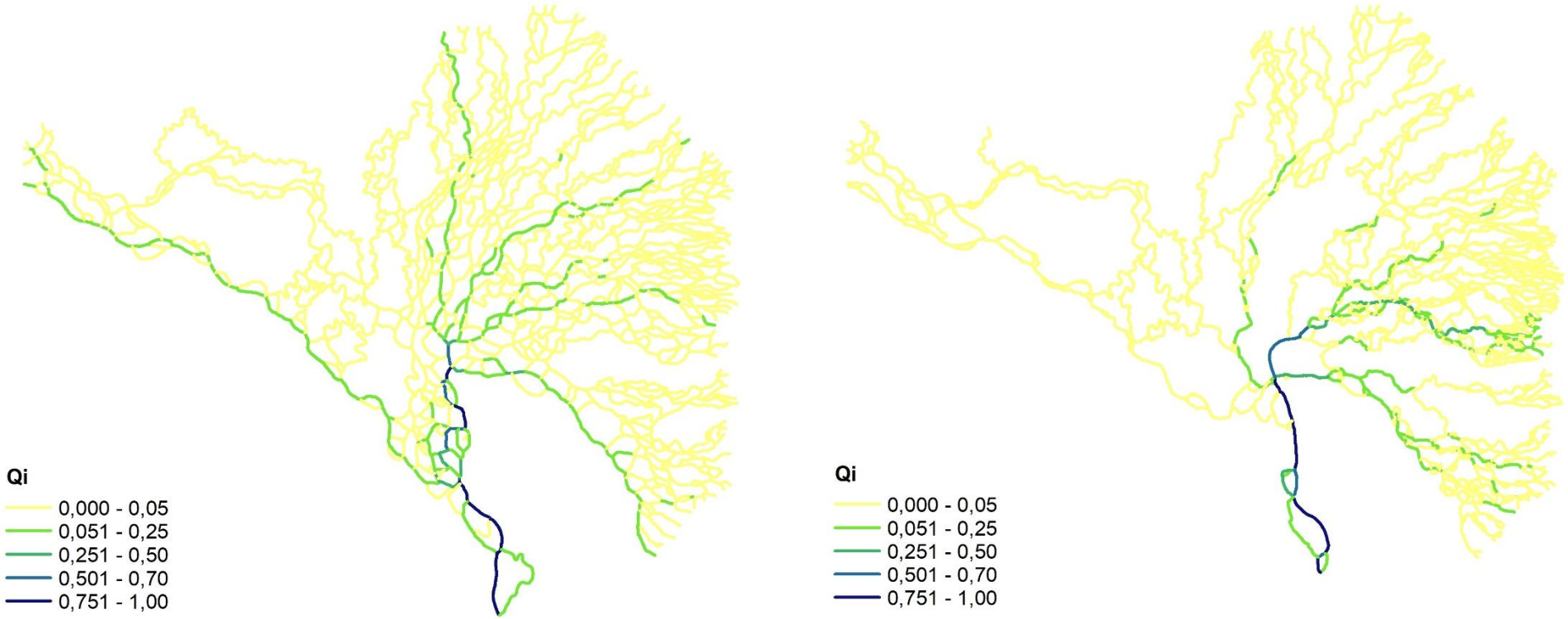
В межень (рис. 3.5-Б, 3.6-Б) при расходе воды в вершине дельты ~20 000 м^3/с закономерности значительно меняются. Спад уровней воды приводит к резкой концентрации стока в восточном направлении и меньшей роли проток западного и северного направления. Несмотря на кратное деление потока в ходе развития осередковых разветвлений, основной сток концентрируется в ограниченном числе наиболее глубоких и широких русел, что визуально выражается в более высоких значениях относительного расхода воды (Q_i) 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.

Сезонная изменчивость распределения стока воды между секторами дельты Лены проявляется в существенном перераспределении долей суммарного стока при смене гидрологических фаз. В половодье высокие уровни обеспечивают распределение стока между всеми элементами русловой сети и устьевыми створами рукавов секторов.



(А) (Б)

Рис. 3.5. Расходы воды (*Q*) в рукавах дельты Лены при *Q* в вершине дельты в период спада половодья 70 000 м^3/с (А) и в межень 20 000 м^3/с (Б)



(А) (Б)

Рис. 3.6. Распределение относительного расхода воды (Q_i) в рукавах дельты Лены при Q в вершине дельты в период спада половодья 70 000 м^3/с (А) и в межень 20 000 м^3/с (Б)

Оценка распределения стока для двух условий водности выполнена путем анализа количества устьевых створов, через которые осуществляется поступление речных вод в море Лаптевых (таблица 3.2). Сравнение характеристик стока на входе в дельту (вершина) и на выходе из нее (устьевые створы) выявляет сложную пространственную трансформацию, различную для периодов межени и спада половодья.

Таблица 3.2. Сравнительные характеристики устьевых створов основных секторов дельты

Сектор	Межень (при Qвд ~ 20 000 м^3/с)				Спад половодья (при Qвд ~ 70 000 м^3/с)			
	n	ΣQ, м^3/с	Q_{mean}, м^3/с	Q_{max}, м^3/с	n	ΣQ, м^3/с	Q_{mean}, м^3/с	Q_{max}, м^3/с
Трофимовский	50	12 046	241	2658	30	26 511	884	5765
Быковский	27	5687	211	1406	21	17 433	830	4418
Туматский	27	1406	52	419	23	16 022	697	4396
Оленёкский	8	910	114	318	6	9893	1649	4436
Арынский	1	87	87	87	2	140	70	118

Примечание: n – количество устьевых створов; ΣQ – суммарный расход через все устьевые створы сектора; Q_{mean} – средний расход на устьевых створах сектора; Q_{max} – максимальный расход среди устьевых створов сектора.

В межень общее количество устьевых створов, через которые сток поступает в море Лаптевых, увеличивается на 38% (с 82 до 113), что является прямым следствием деления основного потока на многочисленные осередковые разветвления при падении уровней воды. В результате средний расход на устьевых створах уменьшается в 4,8 раза (с 854 до 178 м³/с). В половодье отмечается обратная закономерность: меньшему количеству створов соответствуют значительно большие средние расходы. Это объясняется затоплением осередков и концентрацией потока в наиболее глубоких и широких руслах. Единственным исключением является Арынская протока, где, напротив, теряется связь части рукавов с основным потоком, и сток в море осуществляется через одну магистральную протоку.

Процентное распределение стока на устьевых створах значительно меняется в зависимости от того, что происходит в привершинной части дельты у о. Столб. Если для периода межени объемы речного стока в море Лаптевых соответствуют тому, что поступает в истоки рукавов, то на спаде половодья за счет перетоков между поперечными протоками суммарный сток в устьевых створах и истоках может значительно отличаться. Так, доля сектора Трофимовских проток в общем речном стоке в море Лаптевых уменьшается до 38%, в то время как у о. Столб в Трофимовскую протоку поступает 58%. Значительно возрастает доля суммарного стока через протоки Туматского сектора (в истоке Туматской посчитать входной расход невозможно, так как сток формируется за счет бокового притока из Трофимовских проток, что затрудняет оценку расхода на входе). Доля суммарного стока на устьевых створах

для сектора Быковских проток также снижается с 28 до 25% по сравнению с истоком рукава. Это связано с тем, что в средней части сектора сток может перетекать в Трофимовскую протоку. В пределах сектора Оленёкских проток распределение меняется в пределах 1% и может быть связано с перетоками из Арынской протоки.

Таким образом, в межень, когда малые протоки теряют связь с основным руслом, распределение стока становится более концентрированным в магистральных рукавах: сток, поступающий в вершину рукавов, в основном и выносится через их устьевые створы. Однако внутри каждого сектора сток дробится на множество мелких рукавов из-за осередковых разветвлений.

Устойчивость выявленных закономерностей распределения стока подтверждается данными натурных измерений расходов воды в истоках главных рукавов, выполненных в 2022 и 2024 гг. с участием автора диссертации, а также сопоставлением с опубликованными литературными данными. Распределение стока между Трофимовским, Быковским, Туматским и Оленёкским секторами в истоках рукавов остается стабильным при сопоставимых значениях расхода воды в вершине дельты. Определенная изменчивость зафиксирована на уровне отдельных узлов разветвления внутри Трофимовского сектора, где активное развитие русловых процессов оказывает влияние на распределение стока между протоками второго и третьего порядка. Однако на уровне главных рукавов эти внутрисекторные перестройки не приводят к значимому изменению долей стока, поступающих в каждый сектор. Это позволяет считать полученные оценки репрезентативными для характеристики распределения стока воды в дельте Лены в целом.

Количественная оценка распределения стока для двух условий водности проанализирована для 20 крупнейших устьевых створов, которые в сумме аккумулируют более 70% общего стока, поступающего в вершину дельты (рис. 3.7). Анализ рукавов по основным секторам дельты также позволяет выявить четкую динамику между сезонами. Так, в половодье распределение стока между протоками и рукавами четырех основных секторов равномерное (рис. 3.7-А), что проявляется в количестве устьевых створов: 7 из 20 крупнейших относятся к Трофимовскому, 6 – к Быковскому, 4 – к Туматскому и 3 – к Оленёкскому секторам.

В межень распределение становится резко асимметричным (рис. 3.7-Б). Абсолютное доминирование переходит к Трофимовскому и Быковскому секторам, на которые приходится девять и восемь из крупнейших створов соответственно. Именно в этих рукавах происходит концентрация стока. Это свидетельствует о распределении стока в пользу двух крупнейших магистральных рукавов и утрате роли западного (Оленёкского) и северного (Туматского) направлений при понижении стока. Таким образом, сток в море Лаптевых через Туматский

сектор осуществляется лишь по двум устьевым створам, а Оленёкская протока представлена лишь одним створом, в котором концентрируется поток.

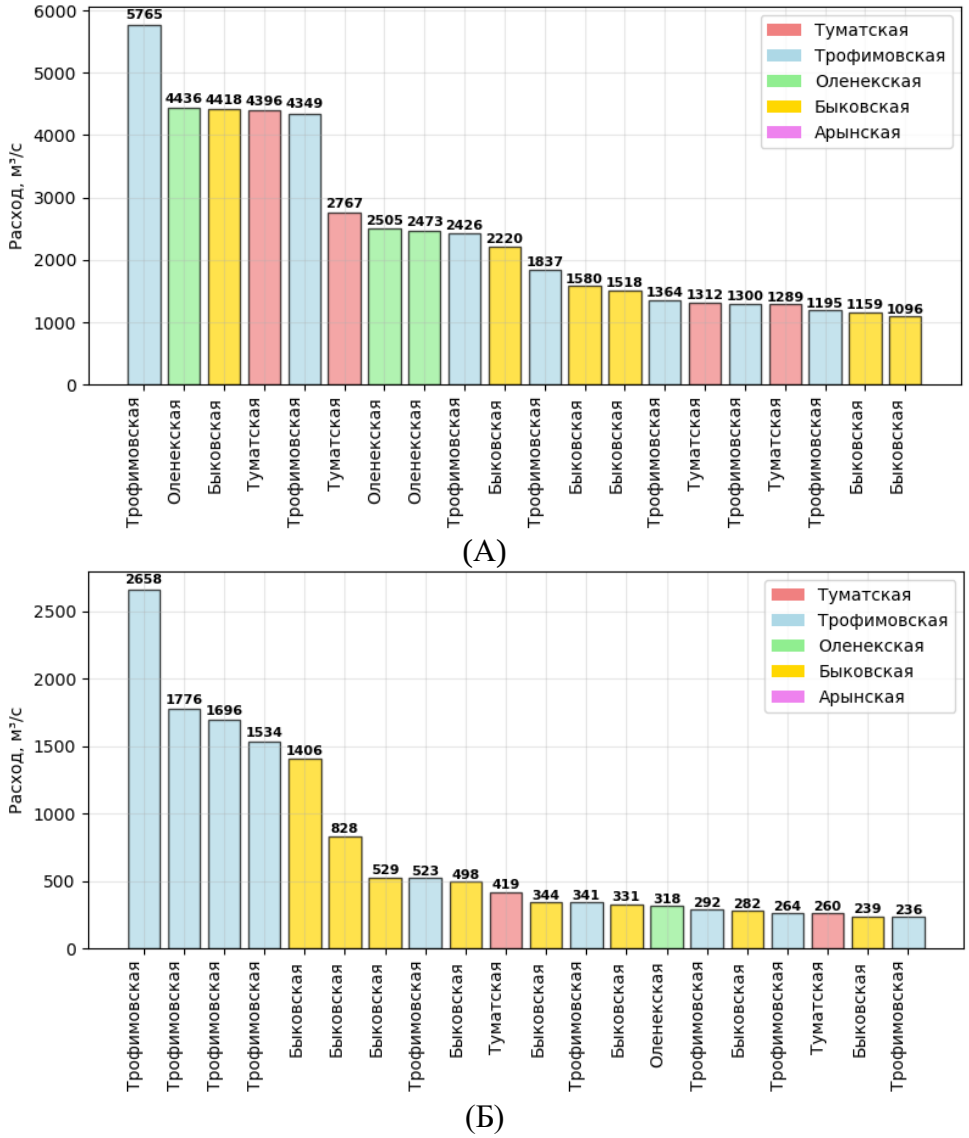


Рис. 3.7. Количество ключевых устьевых створов (крупнейшие 20 по расходу воды) в основных секторах дельты Лены для периодов спада половодья (А) и межени (Б) (створы отобраны по критерию суммарного транзита примерно ~70% общего стока)

Особым фактором, способным нарушать модельные оценки в начале половодья, является ледовый режим. Сток воды в дельтах арктического побережья в значительной степени осложнен сохранением на протяжении большей части года ледового и снежного покрова, а также наличием многолетнемерзлых пород в русле, дельтовых аккумулятивных отложениях и на водосборе [Overeem, Nienhuis, Piliouras, 2022]. Отдельные участки русла (особенно расширение Главного Русла от о. Тит-Ары до второго главного узла разветвления у о. Столб) и крупных проток могут быть забиты льдом, ограничивающим сток воды (рис. 3.8). Такие ледовые явления, как заторы, могут создавать временные, но значимые локальные изменения в распределении стока, которые могут не соответствовать смоделированным значениям для

условий прохождения половодья. Это подчеркивает необходимость учета фаз ледового режима при валидации и калибровке моделей распределения стока для арктических дельт.

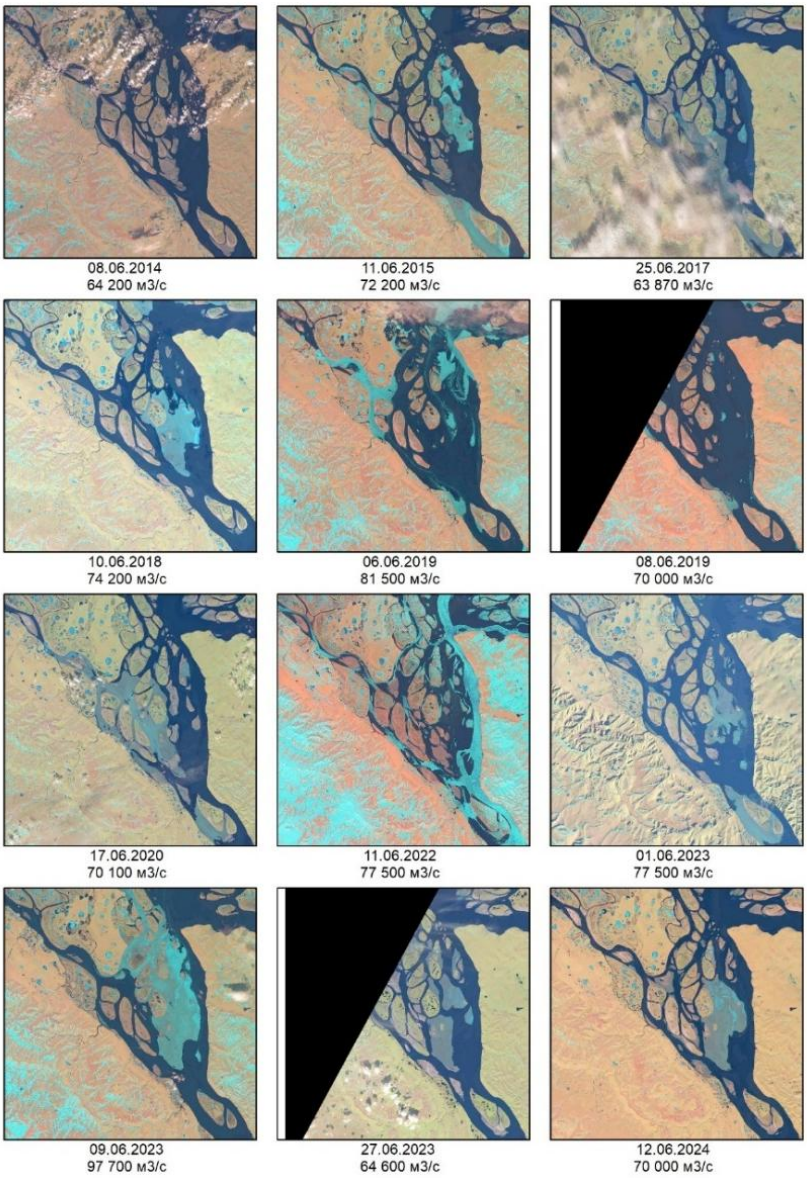


Рис. 3.8. Условия прохождения половодья и ледохода на участке Главного Русла от о. Тит-Ары до второго узла разветвления у о. Столб

С другой стороны, анализ ледовой обстановки в расширении Главного Русла от о. Тит-Ары до о. Столб показывает, что преимущественно малые протоки оказываются забиты льдом, а также на некоторых участках прослеживаются локальные районы, где вероятно промерзание протоки до дна и установление припая. В таком случае лед может оставаться на одном месте даже в период прохождения ледохода, тем самым снижая роль центральной части дельты в распределении стока между секторами дельты. Анализ спутниковых снимков также показывает, что стремительное уменьшение расходов воды в половодье приводит к тому, что

малые протоки в этой части дельты активно теряют водообмен с Главным Руслом и перестают участвовать в распределении стока между рукавами при Q в вершине дельты <50 000 м^3/с.

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.

Полученные закономерности установлены впервые для дельты Лены на основе систематического анализа всей русловой сети с использованием графовой модели, охватывающей более 2000 рукавов и проток. В отличие от предшествующих работ, основанных на измерениях в отдельных точках или отдельных рукавах, настоящий подход позволяет количественно описать пространственное распределение стока по всей дельте одновременно и для двух контрастных гидрологических фаз. Устойчивость результатов, подтвержденная натурными измерениями и литературными данными, делает полученные оценки пригодными для использования в качестве основы при расчете стока взвешенных наносов, что реализовано в главе 4.

Выводы к главе 3

1. Впервые получена полная морфометрическая характеристика русловой сети дельты для двух контрастных фаз. При переходе от половодья (площадь водной поверхности 7140 км^2, 1571 рукав) к летне-осенней межени (4300 км^2, 2045 рукавов) площадь водной поверхности сокращается на 40%, тогда как число водотоков и узлов возрастает на 30%, а число устьевых створов – на 38%. Густота сети в межень возрастает на 50% при незначительном снижении связности (–3,4%), это говорит о том, что адаптация русловой системы к снижению водности идет преимущественно через усложнение внутренней структуры – водотоки, обеспечивающие транзит от вершины дельты к устьевым створам, при этом сохраняются.

2. Выявлено статистически значимое правостороннее распределение ширины водотоков (асимметрия 2,15–2,74, эксцесс 5,79–10,2) для обоих сезонов, количественно подтверждающее наличие двух морфометрически различимых классов элементов русловой сети: многочисленных распределительных проток малой ширины и немногочисленных магистральных рукавов, осуществляющих основной сток воды и взвешенных наносов.

Сезонное сужение русел наиболее выражено в магистральных рукавах: среднее значение ширины сокращается в 1,7 раза (с 1221 до 721 м), тогда как медиана – в 1,4 раза.

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 истоках рукавов (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 период пониженной водности до 88% суммарного стока сосредоточивается в восточных рукавах.

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

4.1. Многолетняя изменчивость с 2000 по 2024 г. и сезонные особенности с 2017 по 2024 г.

Анализ спутниковых снимков Landsat и Sentinel выявил существенную пространственную неоднородность в распределении концентрации взвешенных наносов от вершины дельты (о. Тит-Ары) по ее основным магистральным рукавам. Наряду с характерным для устьев рек продольным уменьшением концентрации взвешенных наносов фиксируются многочисленные случаи увеличения концентрации взвешенных наносов, что свидетельствует о наличии локальных источников поступления наносов внутри дельты.

Обработка многолетнего ряда данных Landsat за 2000–2024 гг. показывает, что продольное изменение концентрации взвешенных наносов (ΔSSC) характеризуется большим размахом колебаний: величина ΔSSC варьирует от –88% до +172% (рис. 4.1, таблица 4.1). Столь значительный диапазон указывает на высокую интенсивность трансформации стока взвешенных наносов в дельтовых рукавах, где эрозионно-аккумулятивные процессы отличаются существенной пространственно-временной изменчивостью.

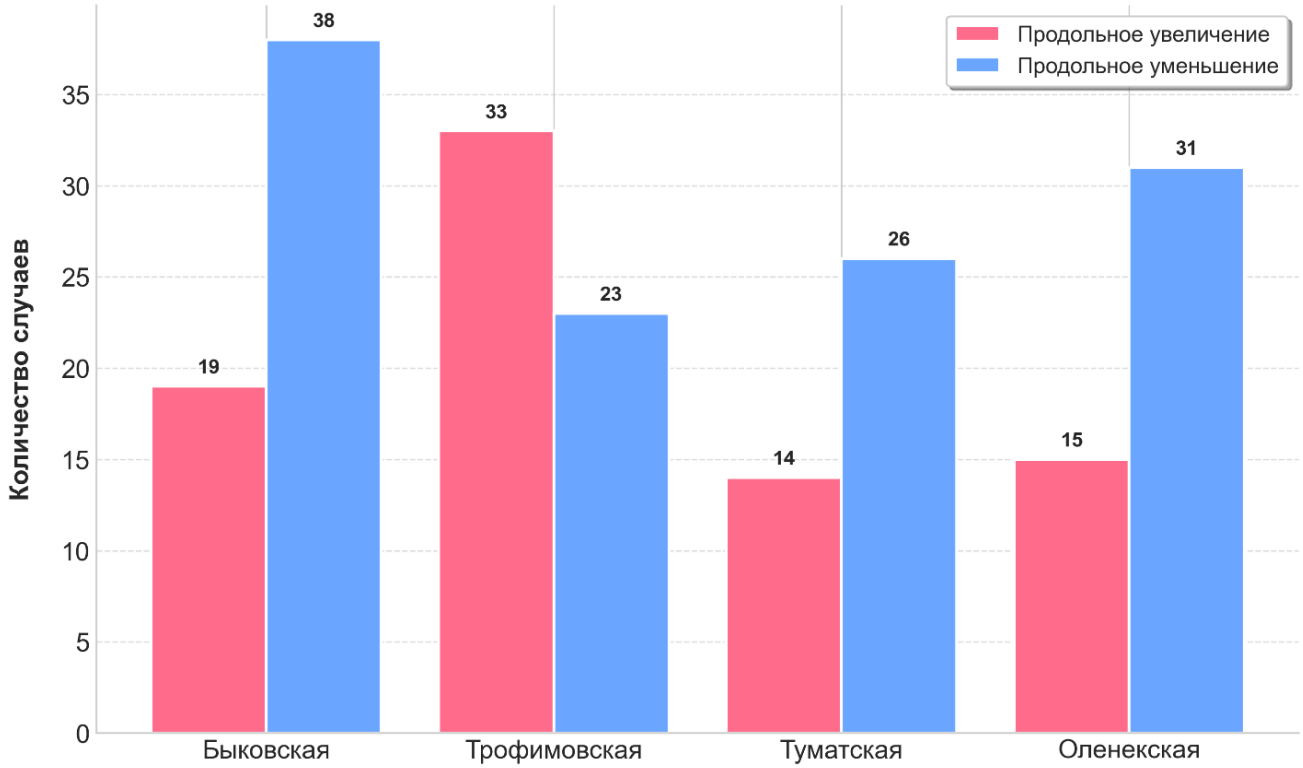


Рис. 4.1. Соотношение случаев с продольным увеличением и уменьшением концентрации взвешенных наносов по данным обработки спутниковых снимков Landsat с 2000 по 2024 г.

Таблица 4.1. Характеристики изменения концентрации взвешенных наносов по главным рукавам дельты Лены за 2000–2024 гг. по данным Landsat

Название рукава	ΔSSC_{mean}, %	ΔSSC_{max}, %	ΔSSC_{min}, %	Число изученных ситуаций		
				$\Delta SSC > 0$	$\Delta SSC < 0$	Всего
Быковская	–13,3	+79,5	–88,1	19	38	57
Трофимовская	+13,4	+172	–67,6	33	23	56
Туматская	–14,2	+133	–87,0	14	26	40
Оленёкская	–13,5	+73,9	–67,6	15	31	46

Наиболее значительные отличия демонстрирует Трофимовская протока – крупнейший по водности рукав дельты. Здесь преобладают ситуации с продольным увеличением концентрации взвешенных наносов ($\Delta SSC > 0$): 33 случая из 56 (59%). Среднее продольное изменение концентрации взвешенных наносов (ΔSSC_{mean}) составляет +13,4%, а максимальное зафиксированное увеличение достигает 172% – более чем двукратный рост концентрации взвешенных наносов на протяжении рукава. Это свидетельствует о наличии активных источников наносов внутри дельты и интенсивных эрозионных процессах на данном участке. Детальный анализ факторов, определяющих формирование стока взвешенных наносов в дельте (гидрологический режим, метеорологические параметры, русловой режим и др.), представлен в главе 5.

В остальных трех крупных рукавах – Быковской, Туматской и Оленёкской – наблюдается принципиально иная картина. На протяжении всего исследуемого периода здесь доминируют процессы аккумуляции, выражающиеся в снижении концентрации взвешенных наносов вниз по течению ($\Delta SSC < 0$). Суммарно по этим трем протокам зафиксировано 95 случаев уменьшения концентрации взвешенных наносов против 48 случаев увеличения. Средние значения ΔSSC изменяются от –14,2 до +13,4%, однако максимальные значения в отдельных ситуациях могут достигать +172% (Туматская).

Преобладание случаев продольного уменьшения концентрации взвешенных наносов в указанных рукавах обусловлено комплексом морфологических и гидравлических причин. В секторах Оленёкской и Туматской проток сосредоточено наибольшее количество нешироких и неглубоких ответвлений, которые теряют связь с основной сетью при падении уровней воды в межень (подробнее в главе 3). Кроме того, здесь происходит максимальное уменьшение уклона водной поверхности и, как следствие, падение транспортирующей способности потока вследствие большей протяженности рукавов. Так, в Быковской протоке перепад высот на 100 км составляет 1 м (по топографическим картам), тогда как в Оленёкской протоке то же изменение высоты происходит на расстоянии 200 км, что способствует более интенсивной аккумуляции наносов.

Анализ данных Sentinel за 2017–2024 гг. в целом подтверждает выявленные закономерности (рис. 4.2, таблица 4.2). Трофимовская протока сохраняет устойчивое преобладание роста концентрации взвешенных наносов – 49 случаев из 68 (72%). Вместе с тем значения ΔSSC в Туматской и Оленёкской протоках по данным Sentinel также переходят в область положительных значений: ΔSSC_{mean} составляет +15,8 и +12,7% соответственно, тогда как по Landsat для этих рукавов фиксировались отрицательные средние значения. При этом общий размах значений сохраняется высоким: от –70,6 до +139%. Единственный рукав, сохраняющий устойчивое преобладание случаев продольного уменьшения концентрации взвешенных наносов по обоим источникам данных, – Быковская протока (42 случая из 70, или 60%).

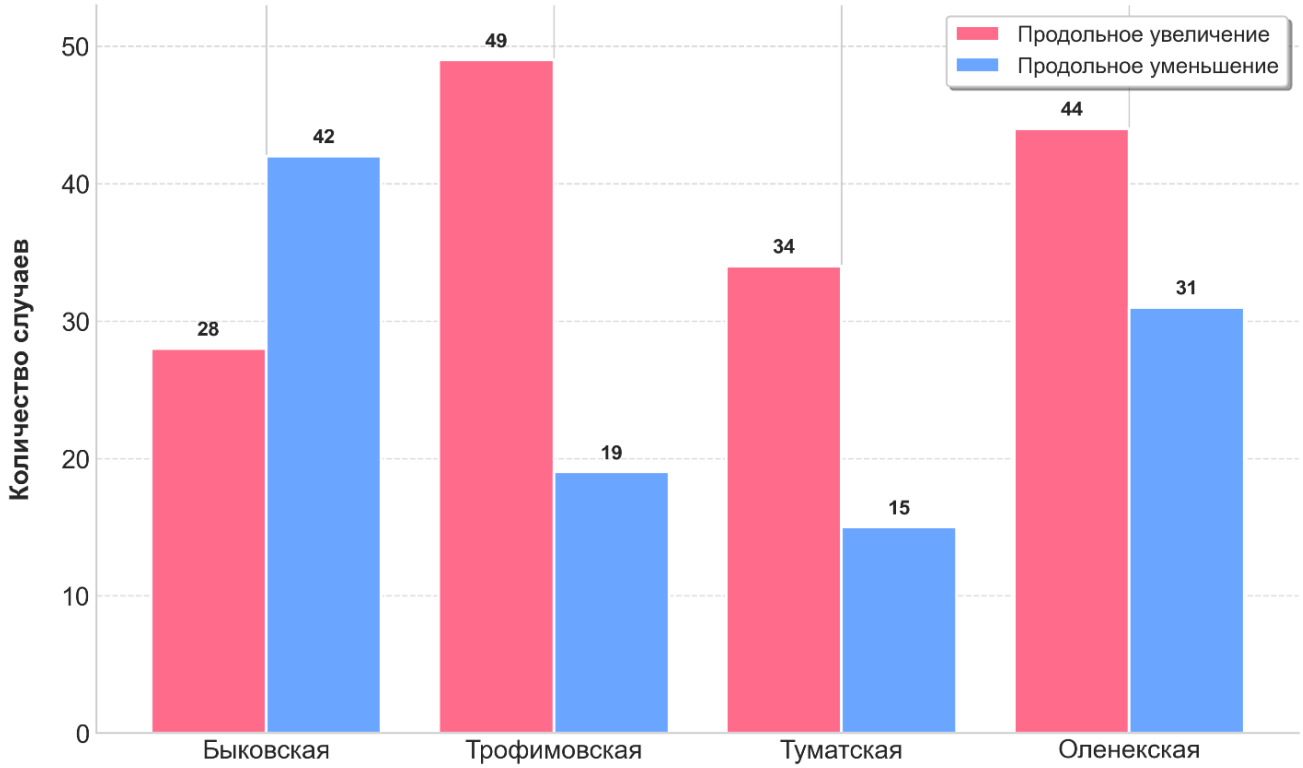


Рис. 4.2. Соотношение случаев с продольным увеличением или уменьшением концентрации взвешенных наносов по данным обработки спутниковых снимков Sentinel с 2017 по 2024 г.

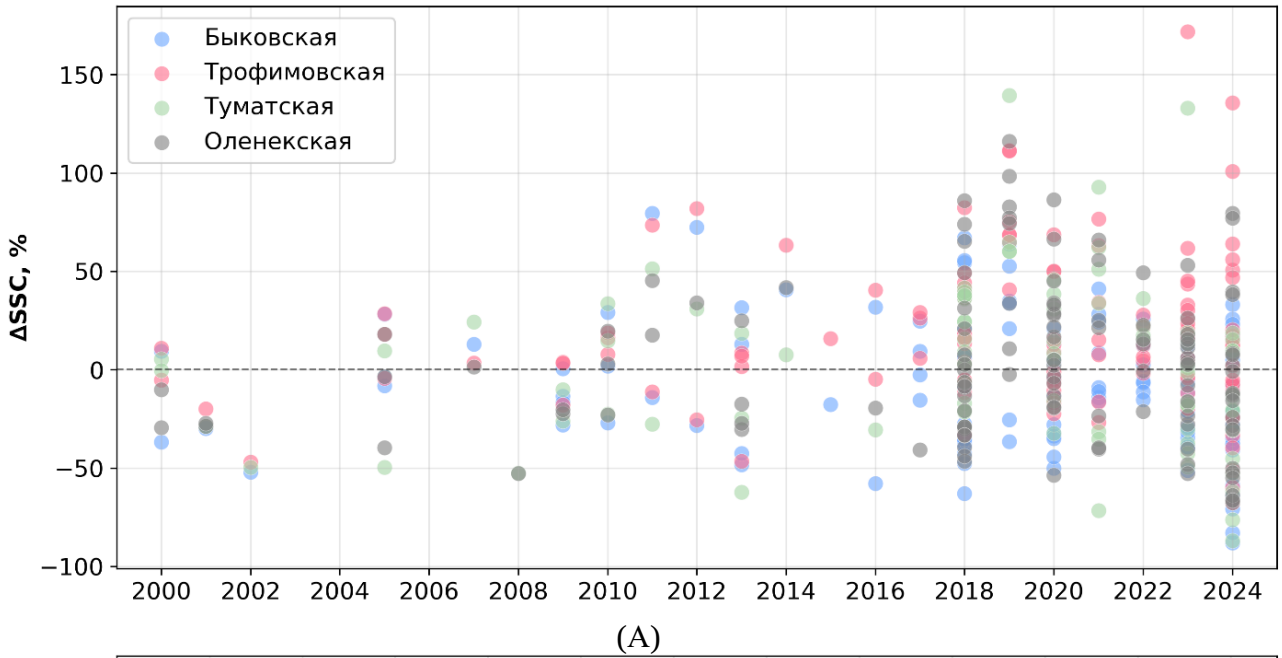
Таблица 4.2. Характеристики изменения концентрации взвешенных наносов по главным рукавам дельты Лены за 2017–2024 гг. по данным Sentinel

Название рукава	ΔSSC_{mean}, %	ΔSSC_{max}, %	ΔSSC_{min}, %	Число изученных ситуаций		
				$\Delta SSC > 0$	$\Delta SSC < 0$	Всего
Быковская	–5,37	+63,9	–70,6	28	42	70
Трофимовская	+20,7	+111	–59,8	49	19	68
Туматская	+15,8	+139	–61,9	34	15	49
Оленёкская	+12,7	+116	–66,5	44	31	75

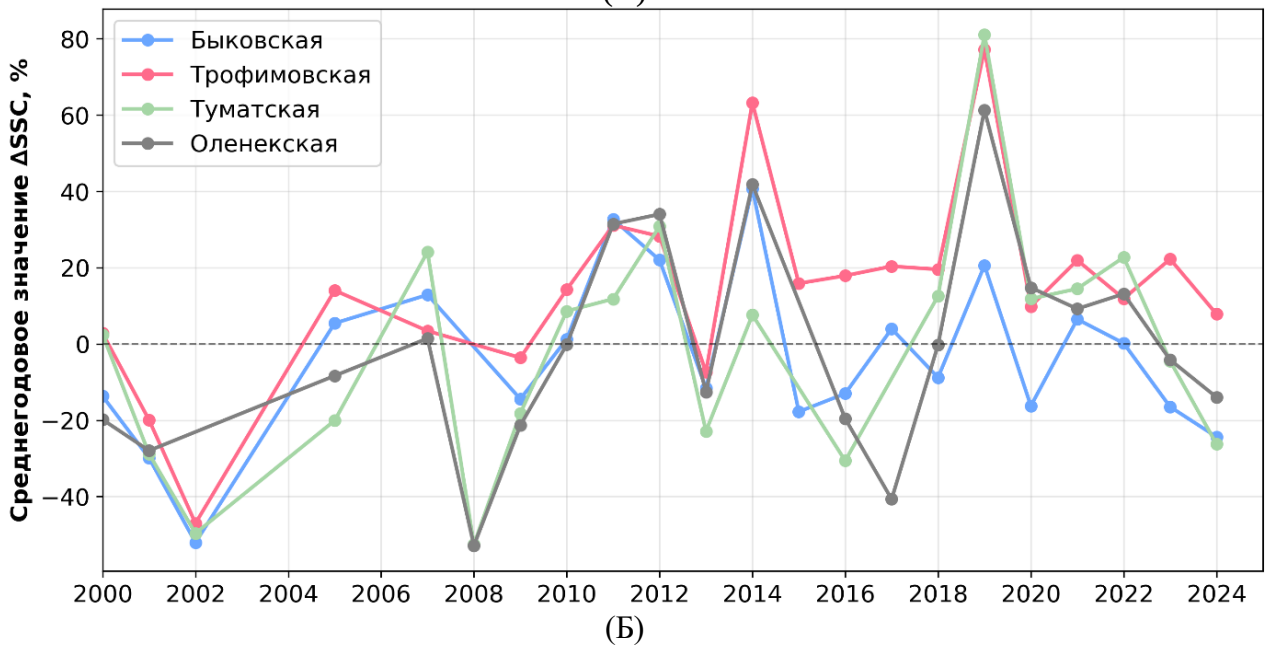
Выявленные расхождения между двумя спутниковыми системами объясняются прежде всего различиями в их временном разрешении: в среднем на год приходится ~12 безоблачных снимков Sentinel против трех снимков Landsat, что может влиять на детальность получаемых результатов. Большее число наблюдений позволяет Sentinel лучше охватить эпизоды активного увеличения концентрации взвешенных наносов за счет развития эрозионно-аккумулятивных процессов, которые могут занимать лишь несколько дней и не попадать в редкую выборку Landsat. Тем не менее общие закономерности сохраняются: крупнейшая Трофимовская протока характеризуется преобладанием процессов увеличения концентрации взвешенных наносов, и только в Быковской протоке сохраняются ситуации преобладания продольного уменьшения ($\Delta SSC < 0$).

Для оценки направленности многолетних изменений построен совмещенный график по данным Landsat и Sentinel, на котором отражены значения ΔSSC (%) по годам (рис. 4.3-А). Следует учитывать, что данные распределены по годам неравномерно: за 2003, 2004 и 2006 гг. наблюдения отсутствуют, ряд лет представлен лишь одним-двумя измерениями, а наиболее полно охвачен период 2017–2024 гг. Каждое измерение обозначено точкой, цвет которой соответствует измерению в определенной протоке; горизонтальная пунктирная линия, проходящая через ноль, разделяет области преобладания положительных значений ΔSSC, которым соответствуют ситуации продольного увеличения концентрации взвешенных наносов, и отрицательных – продольное уменьшение концентрации взвешенных наносов.

Дополнительно проведено осреднение всех доступных данных по результатам обработки снимков Landsat и Sentinel (рис. 4.3-Б) по годам. В 2011–2012 и 2018–2022 гг. во всех рукавах доминируют положительные аномалии, особенно выраженные в Трофимовской и Оленёкской протоках. Годы с доминированием отрицательных значений: 2000–2002, 2005, 2008, 2009, 2013, 2016, 2017, 2023–2024. Тем не менее большой разброс сохраняется практически каждый год. В 2024 г. практически во всех рукавах фиксируются экстремально низкие значения (до –88% в Быковской), тогда как в Трофимовской протоке сохраняется их сильный разброс. Заметная особенность последнего десятилетия – увеличение размаха колебаний после 2018 г.: как положительные, так и отрицательные пики становятся более экстремальными, что может свидетельствовать об усилении контрастности эрозионно-аккумулятивных процессов. Окраска точек по месяцам показывает, что максимальные значения чаще приходятся на июль–август, хотя в отдельные годы (например, в 2019 г.) высокие показатели фиксировались и в сентябре.



(А)



(Б)

Рис. 4.3. Многолетние колебания относительного изменения концентрации взвешенных наносов (Δ*SSC*, %) по протокам: по данным спутниковых снимков Landsat и Sentinel (А) и осредненные значения за год (Б)

Для оценки направленности и значимости многолетних изменений среднегодовых значений Δ*SSC* применен ранговый коэффициент корреляции Спирмена (ρ). Положительные значения ρ указывают на тенденцию к росту интенсивности продольного увеличения концентрации взвешенных наносов, отрицательные – к снижению (то есть к продольному уменьшению). Результаты анализа представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Результаты оценки статистической значимости многолетних трендов Δ*SSC* по рукавам (по коэффициенту Спирмена)

Рукав	ρ	p-уровень значимости
Быковская	+0,012	0,960
Трофимовская	+0,464	0,034
Туматская	+0,334	0,150
Оленёкская	+0,347	0,133

Примечание: жирным шрифтом выделены статистически значимые значения (при $p < 0,05$).

Статистически значимый положительный тренд ($p < 0,05$) выявлен только для Трофимовской протоки, где ρ = +0,464 свидетельствует о достоверном увеличении интенсивности продольного увеличения концентрации взвешенных наносов за период с 2000 по 2024 г. В Быковской протоке тренд отсутствует (ρ близок к нулю), что указывает на относительную стабильность эрозионно-аккумулятивного и преобладание транзитного режима транспорта взвешенных наносов. Для Туматской и Оленёкской проток прослеживается слабая положительная тенденция увеличения интенсивности продольного изменения концентрации взвешенных наносов, однако она не достигает уровня статистической значимости (при $p < 0,05$) вследствие высокой межгодовой изменчивости и ограниченного числа наблюдений.

Для проверки гипотезы о связи между гидрологическим режимом и интенсивностью трансформации взвешенных наносов проведен анализ зависимости Δ*SSC* от расхода воды (*Q*) в вершине дельты по всей базе данных за 2000–2024 гг. В отличие от межгодового анализа, использование данных по отдельным датам позволяет существенно увеличить объем выборки и выявить закономерности, сглаживаемые при годовом осреднении.

Результаты расчета рангового коэффициента корреляции Спирмена между *Q* и Δ*SSC* по каждому рукаву представлены в таблице 4.4. Статистически значимая положительная связь выявлена для Быковской (ρ = +0,217, $p = 0,014$, $n = 125$) и Оленёкской (ρ = +0,254, $p = 0,005$, $n = 98$) проток: в периоды высоких расходов воды Δ*SSC* в этих рукавах смещается в положительную область, то есть режим транспорта взвешенных наносов переходит из аккумулятивного в эрозионный (или ослабевает аккумуляция). Для Туматской протоки корреляция слабая и статистически незначимая (ρ = +0,144, $p = 0,177$). Трофимовская протока отличается режимом транспорта взвешенных наносов: коэффициент корреляции здесь практически равен нулю (ρ = +0,007, $p = 0,939$), что свидетельствует о том, что трансформация стока взвешенных наносов не зависит от расходов воды. Иными словами, в Трофимовской протоке при любых гидрологических условиях наблюдается продольное увеличение стока взвешенных наносов, связанное с активным развитием эрозионных процессов.

Таблица 4.4. Результаты оценки статистической значимости связи среднесуточных расходов воды (Q) и ΔSSC по рукавам (по коэффициенту корреляции Спирмена)

Рукав	ρ	p-уровень значимости
Быковская	0,217	0,014
Трофимовская	0,002	0,986
Туматская	0,144	0,177
Оленёкская	0,254	0,005

Также рассмотрены средние значения ΔSSC в различных диапазонах расхода воды (рис. 4.4). В период пиковых расходов (Q > 75 000 м³/с), соответствующих пику и спаду половодья, продольное увеличение концентрации взвешенных наносов фиксируется во всех без исключения рукавах: в Быковской среднее ΔSSC составляет +17,8%, в Трофимовской – +26,7%, в Туматской – +17,4%, в Оленёкской – +40,4%. Таким образом, в период максимальных расходов воды в соотношении эрозионно-аккумулятивных процессов преобладает эрозионная составляющая, т. е. мощный поток обладает достаточной транспортирующей и размывающей способностью, чтобы вовлекать в движение отложения разрушенных годом ранее берегов и русел по всей разветвленной сети рукавов. По мере спада уровня воды и перехода к меженным условиям (Q < 25 000 м³/с) Быковская протока устойчиво возвращается к аккумулятивному режиму (ΔSSC составляет –14,0%), тогда как в Трофимовской сохраняются положительные значения (+18,1%), что также свидетельствует о том, что сток воды не является определяющим в режиме транспорта взвешенных наносов.

Особого внимания заслуживает сравнение двух маловодных лет, 2019 и 2024, которые при схожих диапазонах расходов воды демонстрируют контрастный характер трансформации стока взвешенных наносов. В 2019 г. в условиях низкой летней межени (при Q ~10 900–11 000 м³/с) в конце августа во всех рукавах зафиксированы рекордные положительные значения ΔSSC: +139% в Туматской, +116% в Оленёкской, +111% в Трофимовской, +64% в Быковской. В 2024 г. при сопоставимых расходах воды в августе–сентябре картина противоположная: повсеместно экстремально отрицательные значения (до –88% в Быковской, –77% в Туматской, –67% в Оленёкской). Принципиальное различие между этими годами не объясняется расходом воды – оба года маловодны. Следовательно, формирование режима трансформации взвешенных наносов определяется иными факторами: температурным режимом, интенсивностью термоэрозии берегов, ветровыми условиями и другими факторами. Детальный анализ этих факторов и их относительного вклада представлен в главе 5.

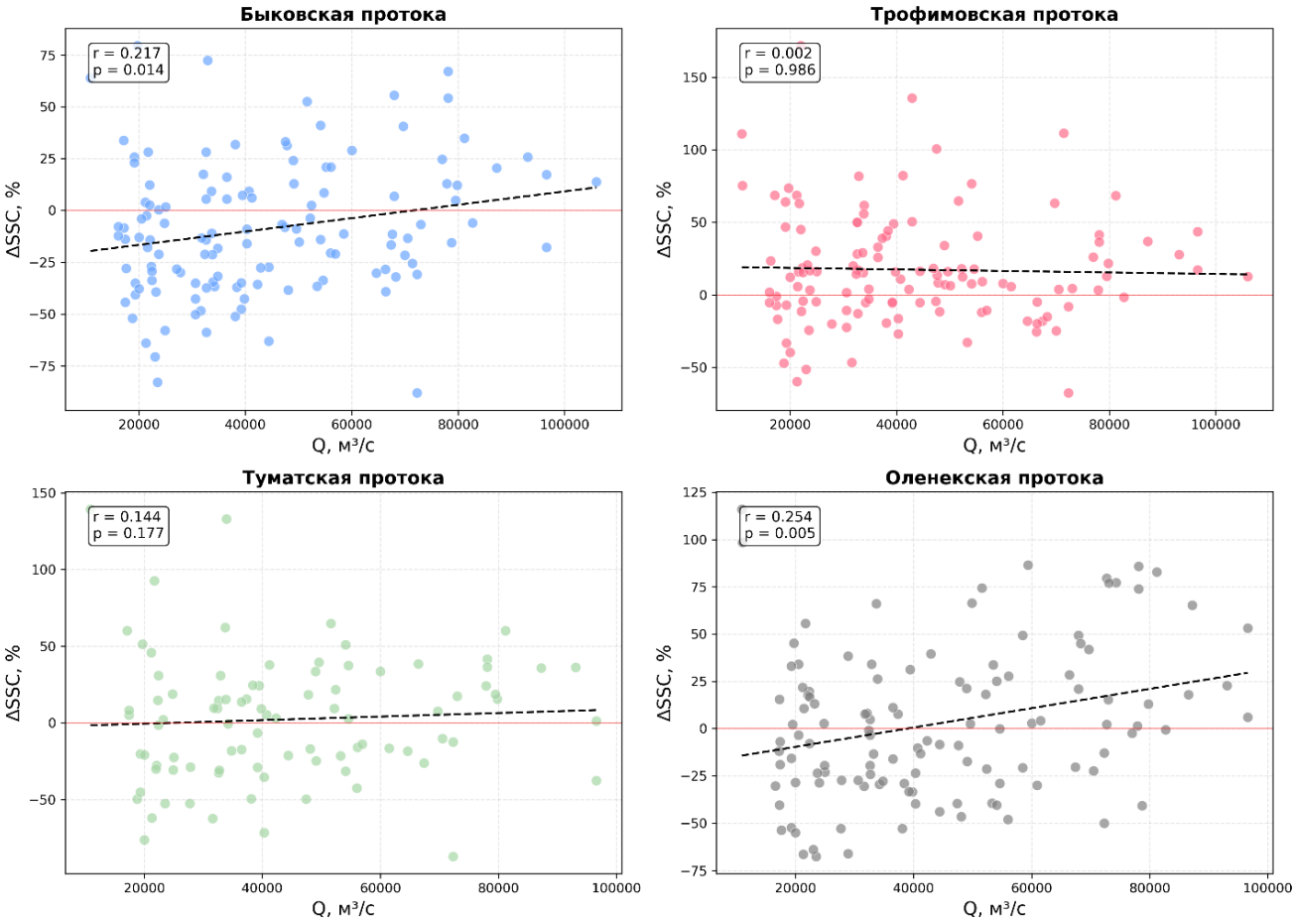


Рис. 4.4. Распределение продольных изменений концентрации взвешенных наносов (ΔSSC, %) в зависимости от расходов воды (Q, м^3/с) по рукавам дельты

Таким образом, расход воды – основная переменная при расчетах расходов взвешенных наносов, определяющая сток большей части взвешенных наносов в море Лаптевых, однако он не определяет закономерности режима трансформации взвешенных наносов в дельте Лены. Его роль наиболее выражена в экстремальные периоды – при пиковых расходах в половодье, когда высокая транспортирующая способность потока обеспечивает транспорт наносов и развитие эрозионных процессов во всех рукавах. Однако в меженный период решающими становятся другие факторы, различный вклад которых и определяет столь контрастные ситуации, как в 2019 и 2024 гг.

Проведено сравнение выявленных закономерностей с особенностями транспорта взвешенных наносов в дельтах, расположенных вне арктической зоны. Сопоставление режимов трансформации взвешенных наносов в дельтах Лены и Колымы, с одной стороны, и Селенги и Верхней Ангары, с другой, выявляет принципиальное различие между дельтами рек южной и северной частей Северо-Восточной России.

В дельтах южных рек северо-восточной части России – Селенги и Верхней Ангары – в периоды высоких расходов воды доминируют процессы аккумуляции: мощный поток

затопляет пойму, пойменные озера и прибрежные заросли макрофитов, которые резко снижают транспортирующую способность потока, осаждая взвешенные наносы на равнинной пойме. В межень, напротив, наблюдается развитие русловой эрозии и ремобилизации ранее аккумулированной взвеси, что приводит к продольному увеличению концентрации взвешенных наносов. Таким образом, зависимость ΔSSC от Kq (относительные расходы воды, рассчитанные как отношение расхода воды за дату получения снимка к среднегодовому расходу воды) в южных дельтах носит отрицательный характер, то есть чем выше расход воды, тем интенсивнее аккумуляция (рис. 4.5).

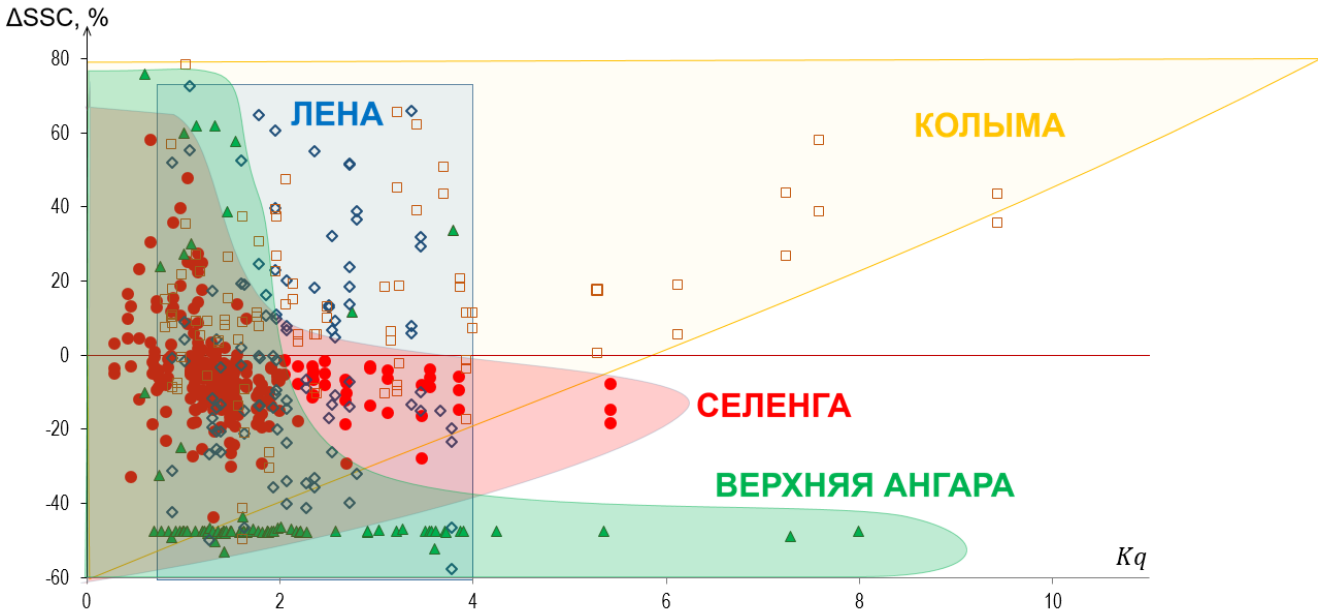


Рис. 4.5. Распределение ΔSSC в зависимости от относительных расходов воды (Kq) для дельт рек Лена, Колыма, Селенга и Верхняя Ангара

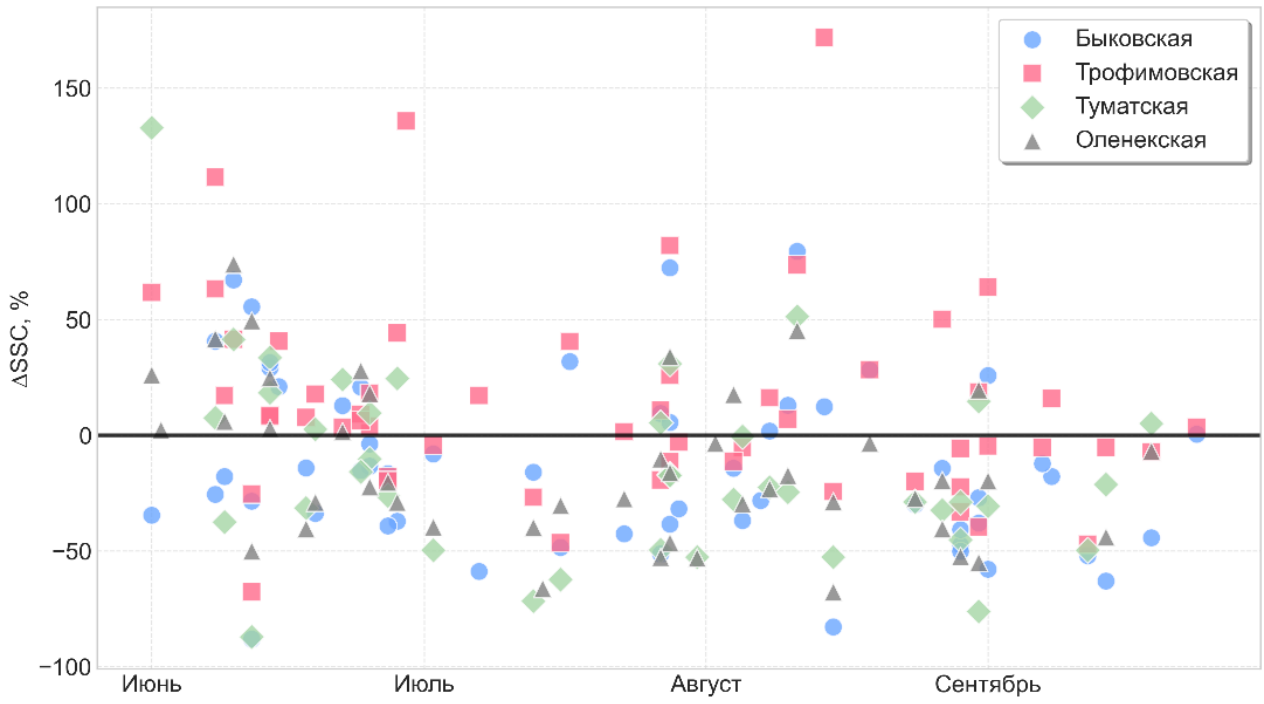
В арктических дельтах Лены и Колымы ситуация принципиально иная. Высокие берега, сложенные многолетнемерзлыми породами, практически не затопляются даже при пиковых расходах, поэтому гидравлическая связь между руслом и поймой остается слабой на протяжении всего сезона. Вместо аккумуляции высокие расходы воды усиливают механическую и термическую эрозию берегов, что приводит к поступлению дополнительного материала в русловую сеть. В результате зависимость ΔSSC от Q в арктических дельтах носит положительный характер, и именно при высоких расходах чаще всего фиксируется продольное увеличение концентрации взвешенных наносов, тогда как при низких водах возможны как продольное увеличение, так и уменьшение (в зависимости от термических условий и других факторов). Полученные в настоящей работе данные по дельте Лены за 2000–2024 гг. подтверждают и уточняют эту закономерность: при Q > 75 000 м³/с продольное увеличение концентрации взвешенных наносов фиксируется во всех четырех рукавах, тогда как меженный

период характеризуется высокой межгодовой изменчивостью, необъяснимой одним лишь расходом воды, что наглядно демонстрируют отличия в 2019 и 2024 гг.

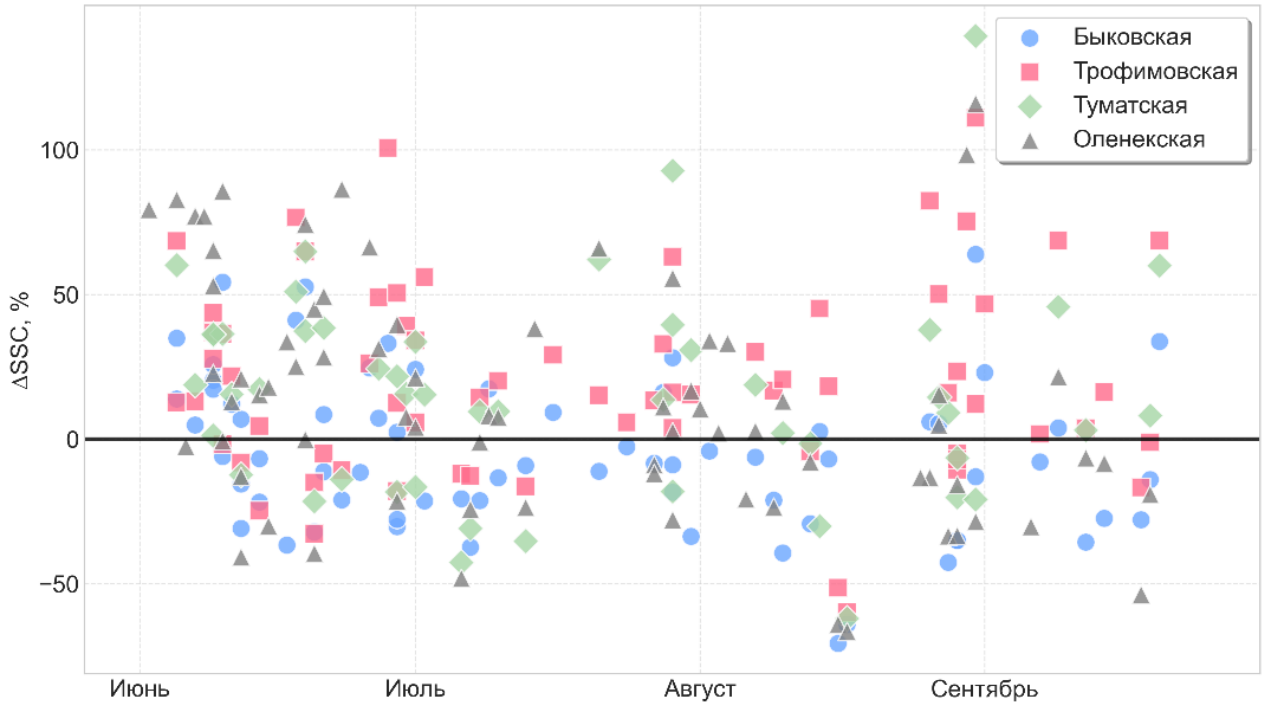
Таким образом, арктические дельты функционируют как системы, в которых основным источником дополнительных наносов служит термоэрозия берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами, а не пойменная аккумуляция, характерная для дельт южной Сибири.

С целью выявления возможных внутрисезонных (за период открытой воды, то есть с июня по сентябрь) закономерностей в распределении стока взвешенных наносов проведен анализ временных рядов продольного изменения Δ*SSC* в четырех основных протоках дельты Лены – Быковской, Трофимовской, Туматской и Оленёкской. На рис. 4.6, объединяющем все годы наблюдений, видно, что показатели Δ*SSC* имеют значительный разброс в течение всего периода. Тем не менее можно выделить общую тенденцию: максимальный размах колебаний приходится на июль–август, когда одновременно фиксируются и экстремально высокие положительные значения (до +172% в Трофимовской протоке), и наиболее низкие отрицательные (до –88% в Быковской). В июне и сентябре разброс значений заметно меньше, и Δ*SSC* чаще стремится к нулю (рис. 4.6).

Однако можно выделить устойчивые закономерности в распределении Δ*SSC* для всех секторов дельты. Так, для Быковской протоки характерны преимущественно отрицательные значения Δ*SSC* (продольное уменьшение), особенно в последние годы (2023–2024). Положительные пики здесь значительно ниже, чем в других протоках. Трофимовская протока выделяется высокими величинами и частотой положительных аномалий Δ*SSC*. Отрицательные значения также могут достигать –67%, однако частота их появления значительно ниже, чем для Быковской протоки. Туматская протока характеризуется большим разбросом, но размах ниже, чем у Трофимовской. Для Оленёкской протоки характерна также сильная изменчивость: в отдельные годы (например, 2018–2019) могут преобладать высокие положительные Δ*SSC*, в другие (например, 2024) – низкие отрицательные.



(А)



(Б)

Рис. 4.6. Сезонные колебания относительного изменения концентрации взвешенных наносов (*ΔSSC*, %) по протокам, по данным снимков Landsat (2000–2024) (А) и Sentinel (2017–2024) (Б)

Интегральная оценка трансформации взвешенных наносов по дельте получена путем расчета изменения концентрации взвешенных наносов с учетом распределения стока воды по рукавам за 2000–2024 гг. (таблица 4.5). Этот результат описывает условия летнего половодья и летне-осенней межени, на которые приходится 85% годового стока воды и 95% годового стока взвешенных наносов р. Лены в створе г/п Кюсюр; расходы воды за период осреднения

варьировали от 10 900 до 106 000 м^3/с. Несмотря на разнонаправленность процессов в отдельных рукавах – преобладание аккумуляции в Быковской и устойчивый эрозионный режим в крупнейшей по водности Трофимовской – суммарная трансформация стока взвешенных наносов в дельте в целом положительна: изменение Δ*SSC* с учетом распределения стока воды по рукавам составляет +9,0% (от +3,2% до +13,5 по разным методам оценки), то есть в пределах исследуемых участков происходит продольное увеличение концентрации взвешенных наносов от вершины дельты к участкам исследуемых рукавов.

Таблица 4.5. Продольное изменение концентрации взвешенных наносов с учетом распределения стока воды по рукавам дельты Лены

Характеристика	Рукава			
	Быковская	Трофимов-ская	Туматская	Оленёк-ская
По данным обработки спутниковых снимков Landsat				
ΔSSC_{mean}, %	–13,3	+13,4	–14,2	–13,5
Q, % (в среднем по рукавам)	26	61	6	7
Изменение *SSC* (с учетом распределения стока по рукавам), %	+3,2			
По данным обработки спутниковых снимков Sentinel				
ΔSSC_{mean}, %	–5,5	+20,7	+15,8	+12,7
Q, % (в среднем по рукавам)	26	61	6	7
Изменение *SSC* (с учетом распределения стока по рукавам), %	+13,5			
Осредненная оценка по снимкам Landsat и Sentinel				
ΔSSC_{mean}, %	–9,0	+17,4	+2,1	+2,6
Q, % (в среднем по рукавам)	26	61	6	7
Изменение *SSC* (с учетом распределения стока по рукавам), %	+9,0			

Таким образом, анализ многолетних данных позволяет установить устойчивые закономерности в продольной изменчивости концентрации взвешенных наносов в рукавах дельты Лены по режиму трансформации. Трофимовская протока выделяется как зона активного поступления наносов со статистически значимым нарастающим трендом; Быковская – как наиболее стабильный транзитный рукав с преобладанием аккумуляции; Туматская и Оленёкская занимают промежуточное положение с высокой межгодовой изменчивостью. Факторы, определяющие эти различия и закономерности, рассматриваются в главе 5.

4.2. Суммарный сток взвешенных наносов в море Лаптевых с учетом его трансформации

Данные замыкающего створа г/п Кюсюр, на котором основаны все существующие оценки годового стока взвешенных наносов р. Лены (приведены в главе 1), не отражают реальной величины их поступления в море Лаптевых. Кюсюр расположен более чем в 150 км выше вершины дельты и в 350–400 км от ее морского края. На этом участке сток взвешенных наносов трансформируется вследствие боковой приточности и эрозионно-аккумулятивных процессов, которые не фиксируются ни на г/п Кюсюр, ни в истоках главных рукавов, где велись ежегодные измерения до 2002 г. Количественная оценка стока взвешенных наносов непосредственно на выходе из дельты получена с учетом той внутридельтовой трансформации, закономерности которой были установлены в разделе 4.1.

Для этого значения поверхностной концентрации взвешенных наносов были пересчитаны в среднюю концентрацию взвешенных наносов по вертикали по уравнению (4) и с учетом известных расходов воды по модели, приведенной в главе 3. Расходы взвешенных наносов получены по уравнению (5). Все оценки приводятся для диапазона расходов воды от 10 900 до 106 000 $м^3$/с за период открытой воды (июнь–сентябрь) с 2000 по 2024 г.

На первом этапе рассчитан сток взвешенных наносов в вершине дельты у о. Тит-Ары. Расчет среднемесячных (за июнь–сентябрь) значений расходов взвешенных наносов (кг/с), приходящих в вершину дельты, проводился по методике, применяемой в Росгидромете. Осреднение проводилось по имеющимся результатам обработки снимков, охватывающих участок в районе вершины дельты. После осредненные величины расходов переводились в единицы массы взвешенных наносов в месяц (в млн т в месяц). Таким образом, получен сток взвешенных наносов за период открытой воды, на который приходится 95% годового стока. В итоговом суммарном годовом значении стока взвешенных наносов в вершине дельты также учитывались 5% стока взвешенных наносов, приходящиеся на период с октября по май.

Согласно расчетам (таблица 4.6), расходы взвешенных наносов в вершине дельты максимальны в период прохождения половодья и в среднем за период с 2000 по 2024 г. составляют 2412 кг/с. С падением уровней воды и уменьшением расходов воды сток взвешенных наносов уменьшается в 2,5 раза и в среднем в сентябре составляет 925 кг/с.

Таблица 4.6. Среднемесячные расходы и годовой сток взвешенных наносов в вершине дельты Лены за период 2000–2024 гг.

Характеристика	Месяц			
	июнь	июль	август	сентябрь
R, кг/с	2412	1367	1039	925
W_R, млн т в месяц	6,25	3,54	2,69	2,40
W_R, млн т за июнь–сентябрь	14,9			
W_R, млн т за октябрь–май	0,78			
W_R, млн т в год	15,7			

Сравнение расходов взвешенных наносов, рассчитанных по спутниковым данным, с данными измерений Тиксинского УГМС в створе «4,7 км выше о. Столб» за 1968–2012 гг. выявляет систематические расхождения (таблица 4.7). В целом за сезон различие составляет ~9,5%, однако картина внутри сезона неоднородна. В июне измерения, полученные в ходе обработки снимков, занижают расходы взвешенных наносов на 34,7%, в июле – на 7,2%. Напротив, в августе и сентябре оценка в настоящей работе превышает данные наземных измерений на 57,1 и 78,6% соответственно.

Таблица 4.7. Сравнение среднемесячных расходов взвешенных наносов в вершине дельты Лены по спутниковым данным (2000–2024 гг.) и данным Тиксинского УГМС (1968–2012 гг.)

Створ	R, кг/с				
	июнь	июль	август	сентябрь	среднее
4,7 км выше о. Столб	3692	1473	661	518	1586
Вершина дельты у о. Тит –Ары	2412	1367	1039	925	1436
Ошибка в %	34,7	7,2	–57,1	–78,6	
Абсолютная ошибка в %	34,7	7,2	57,1	78,6	**9,5**

Подобные расхождения физически закономерны и обусловлены двумя факторами. Во-первых, пик половодья и максимальные концентрации взвешенных наносов приходятся на период ледохода, при которых обработка спутниковых снимков невозможна. Это приводит к систематическому недоучету стока в июне, когда проходит основной сток наносов. Во-вторых, региональный спутниковый алгоритм расчета концентрации взвешенных наносов разработан для условий межени при концентрациях от 3 до 25 мг/л; при превышении этого порога точность оценки снижается, что дополнительно занижает результат в период половодья. В межень же, напротив, алгоритм применим в оптимальном диапазоне концентраций, что может давать несколько завышенные оценки относительно точечных наземных измерений, не всегда репрезентативных для всего живого сечения в условиях низких уровней воды.

Таким образом, итоговое среднее расхождение за сезон в 9,5% является результатом взаимной компенсации двух противоположно направленных погрешностей, что следует учитывать при интерпретации полученных оценок годового стока.

С учетом установленных погрешностей и выявленных закономерностей трансформации проведен расчет суммарного стока взвешенных наносов на выходе из дельты. Суммарный сток в море Лаптевых рассчитывался на основе различных сценариев количественной трансформации, установленных в разделе 4.1. Расход взвешенных наносов в вершине за июнь–июль и за год задавался постоянным, согласно таблице 4.5. Далее применялись три оценочных сценария трансформации стока взвешенных наносов: +3,2%, +9,0% и +13,5%, отражающие различные подходы к формированию базы данных. Оценка в +3,2% получена исключительно по снимкам Landsat за 2000–2024 гг. – наиболее длинный временной ряд, однако с существенно меньшим числом наблюдений: в среднем три безоблачных снимка в год. Оценка в +13,5% основана только на снимках Sentinel за 2017–2024 гг., которые обеспечивают примерно в четыре раза большее число наблюдений в год, однако охватывают лишь последнее десятилетие. Оценка в +9,0% получена путем совместной обработки всей доступной базы данных – снимков Landsat и Sentinel за 2000–2024 гг.

Наиболее репрезентативной следует считать оценку в +9,0%, поскольку она основана на максимально полной совокупности данных: объединение двух источников позволяет одновременно использовать длину временного ряда Landsat и повышенную временную частоту съемки Sentinel. Это минимизирует влияние как межгодовой изменчивости, так и внутрисезонной неравномерности съемки. Оценки +3,2% и +13,5% следует рассматривать как нижнюю и верхнюю границы диапазона неопределенности, обусловленного различиями в пространственно-временном разрешении спутниковых систем.

Трансформация учитывалась только для значений стока взвешенных наносов за сезон. Годовое значение стока в море Лаптевых рассчитывалось с учетом 5% добавки за период октябрь–май. Результаты расчетов приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8. Расчет суммарного стока взвешенных наносов в море Лаптевых с учетом внутридельтовой трансформации по трем сценариям

Характеристика	Условия	Вершина дельты	В море Лаптевых	Величина трансформации, %
W_R, млн т за июнь–сентябрь	с учетом трансформации в +3,2%	14,9	15,4	+0,48
W_R, млн т в год		15,7	16,1	
W_R, млн т за июнь–сентябрь	с учетом трансформации в +9,0%	14,9	16,2	+1,34
W_R, млн т в год		15,7	17,0	
W_R, млн т за июнь–сентябрь	с учетом трансформации в +13,5%	14,9	16,9	+2,01
W_R, млн т в год		15,7	17,7	

В зависимости от выбранного оценочного сценария суммарный расход взвешенных наносов в период открытого русла с июня по сентябрь возрастает в пределах дельты от +3,2 до +13,5%. Полученные результаты соответствуют условиям прохождения 95% годового стока взвешенных наносов. Годовой сток взвешенных наносов в море Лаптевых оценивается в пределах 16,1–17,7 млн т в год. Величина трансформации по разным сценариям оценки может достигать от +0,48 до +2,01 млн т в год.

Наряду с оценкой суммарного стока взвешенных наносов дельты практический интерес представляет распределение этого стока между главными рукавами – как в относительном, так и в абсолютном выражении. На основе полной базы данных спутниковых наблюдений рассчитано распределение стока взвешенных наносов между отдельными рукавами дельты в абсолютном выражении. Оценки по данным Landsat и Sentinel хорошо согласуются между собой: расхождение для Быковской и Трофимовской проток не превышает 8%, для малых рукавов – не более 15%, что свидетельствует об устойчивости результатов относительно выбора источника данных (таблица 4.9).

Таблица 4.9. Средние расходы взвешенных наносов в вершине дельты и в главных рукавах по данным спутников Landsat и Sentinel

База данных	Период	Q, м^3/с	R, кг/с				
			Вершина дельты	Быковская	Трофимовская	Туматская	Оленёкская
Landsat	2000–2024	41 029	1699	427	1085	116	120
Sentinel	2017–2024	45 750	1629	423	1002	129	137
Среднее		43 489	1664	425	1044	123	129
Относительная ошибка, %			4,12	0,94	7,65	–11,2	–14,2
Абсолютная относительная ошибка, %			4,12	0,94	7,65	11,2	14,2

Для получения массовых характеристик средние расходы взвешенных наносов пересчитаны в сток за период открытой воды (июнь–сентябрь, 122 дня) с добавлением 5% стока за период с октября по май. Следует подчеркнуть, что данная оценка отличается от приведенной в таблице 4.6, где сток рассчитывался через среднемесячные значения расходов с учетом их внутрисезонного хода – от максимума в июне до минимума в сентябре. Таблица 4.10 основана на едином среднем расходе взвешенных наносов за весь период, что дает несколько завышенный результат (в вершине дельты 18,5 млн т в год против 15,7 млн т в год согласно помесячной оценке), поскольку не учитывает спад расходов взвешенных наносов к

концу сезона. Тем не менее оба подхода дают согласованные относительные характеристики (доли рукавов в суммарном стоке) и могут использоваться совместно.

Таблица 4.10. 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		

Распределение стока взвешенных наносов по рукавам оказывается близким к распределению стока воды. Трофимовская протока, концентрирующая ~61% водного стока, переносит 60,7% суммарного потока взвешенных наносов. Быковская протока при 26% стока воды транспортирует 24,7% взвешенных наносов. На долю Туматской и Оленёкской приходится по 7% взвешенных наносов при 6–7% стока воды. Близость этих данных указывает на то, что абсолютная масса переносимых взвешенных наносов определяется прежде всего водностью рукава, тогда как режим трансформации концентрации взвешенных наносов вдоль рукавов зависит от иных факторов, рассмотренных ранее.

Причины и источники внутридельтового формирования стока взвешенных наносов требуют отдельного рассмотрения. Дополнительное поступление взвешенных наносов в пределах дельты связано прежде всего с интенсивным развитием русловых процессов и термическим разрушением берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами. В условиях криолитозоны разрушение берегов происходит не только из-за механической эрозии водного потока, но и вследствие термоэрозии и термоденудации – таяния льдистых отложений за счет повышения температуры воздуха и мерзлоты, солнечной радиации, а также при контакте с речной водой, что многократно ускоряет поступление материала в русло. Трофимовская протока, концентрирующая до 60–65% стока воды, характеризуется повышенными скоростями течения и соответственно более высокой размывающей способностью потока, что создает благоприятные условия для разрушения берегов. Таким образом, дополнительные 0,5–2,0 млн т наносов, поступающие в море Лаптевых сверх величины, фиксируемой в вершине дельты, представляют собой продукт внутридельтовых эрозионно-аккумулятивных процессов, не учитываемых при использовании ни данных замыкающего створа Кюсюр, ни данных в

истоках главных рукавов. Детальный анализ факторов, определяющих интенсивность этих процессов, представлен в главе 5.

Полученные результаты имеют принципиальное значение для корректной и инструментально обоснованной оценки притока взвешенных наносов в море Лаптевых. Все существующие оценки годового стока в диапазоне от 11,7 до 27,4 млн т в год основаны на данных г/п Кюсюр и не учитывают трансформацию взвешенных наносов в дельте. Согласно результатам настоящей работы, реальный приток взвешенных наносов в море Лаптевых превышает эти оценки на 0,5–2,0 млн т за период открытой воды. Таким образом, для корректного расчета притока взвешенных наносов р. Лены в море Лаптевых необходимо учитывать трансформацию стока непосредственно в дельте, что впервые реализовано в настоящей работе на основе систематических спутниковых данных.

Выводы к главе 4

1. На основе обработки 130 снимков Landsat (2000–2024 гг.) и 150 снимков Sentinel-2 (2017–2024 гг.) впервые систематически охарактеризована трансформация стока взвешенных наносов в дельте Лены. Диапазон продольного изменения концентрации взвешенных наносов составил от –88 до +172%, что свидетельствует о высокой пространственно-временной изменчивости эрозионно-аккумулятивных процессов. Трофимовская протока выделяется устойчивым преобладанием продольного увеличения концентрации взвешенных наносов: по данным Landsat – в 59% случаев при среднем значении +13,4%, по данным Sentinel – в 72% случаев при среднем +20,7%. Для Трофимовской протоки выявлен единственный статистически значимый положительный многолетний тренд ($\rho = +0{,}464$, $p = 0{,}034$). Быковская протока, напротив, характеризуется устойчивым преобладанием аккумуляции и отсутствием значимого тренда; Туматская и Оленёкская занимают промежуточное положение с высокой межгодовой изменчивостью.

2. Установлено, что в периоды пиковых расходов (Q > 75 000 м³/с) продольное увеличение концентрации взвешенных наносов фиксируется во всех четырех рукавах одновременно (+17,8% в Быковской, +26,7% в Трофимовской, +17,4% в Туматской, +40,4% в Оленёкской). При переходе к меженным условиям (Q < 25 000 м³/с) Быковская протока устойчиво возвращается к аккумулятивному режиму, тогда как Трофимовская сохраняет положительные значения ΔSSC вне зависимости от расхода воды. Контрастное сопоставление маловодных 2019 и 2024 гг. при схожих расходах воды демонстрирует, что в меженный период режим трансформации определяется не расходом воды, а иными факторами, рассмотренными в главе 5. Сопоставление с дельтами южной Сибири показало принципиальное различие: в

арктических дельтах высокие расходы усиливают термическое разрушение берегов, сложенных ММП, тогда как в южных дельтах доминирует пойменная аккумуляция.

3. Среднемноголетний сток взвешенных наносов в вершине дельты за 2000–2024 гг. составляет 15,7 млн т в год. С учетом внутридельтовой трансформации (+9,0% по наиболее репрезентативной оценке) реальное поступление взвешенных наносов в море Лаптевых составляет 17,0 млн т в год (по разным сценариям, 16,1–17,7 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 за счет развития внутридельтовых эрозионно-аккумулятивных процессов, не фиксируемых замыкающим створом.

4. Распределение стока взвешенных наносов по рукавам соответствует распределению водного стока: Трофимовская протока переносит 60,7% суммарного потока взвешенных наносов при 61% водного стока, Быковская – 24,7% при 26%, Туматская и Оленёкская – по ~7%.

Глава 5. Анализ факторов трансформации стока взвешенных наносов

В предыдущей главе установлено, что сток взвешенных наносов в дельте Лены продольно увеличивается от вершины к морскому краю, что свидетельствует о дополнительном внутридельтовом поступлении наносов. Объяснение выявленной закономерности требует анализа факторов, определяющих продольное изменение концентрации взвешенных наносов в рукавах дельты.

Трансформация стока взвешенных наносов в дельте Лены определяется тремя группами факторов: метеорологические, гидрологические и русловые. Их относительный вклад различается в зависимости от фазы водного режима и временного масштаба рассматриваемых процессов. В настоящей главе анализируется влияние каждой из этих групп факторов на продольное изменение концентрации взвешенных наносов на участке от вершины дельты до устьев магистральных рукавов.

5.1. Влияние метеорологических и гидрологических факторов

Для оценки влияния метеорологических факторов использованы данные реанализа ERA5-Land. Использованы следующие данные: средняя температура воздуха на высоте 2 м от водной поверхности или суши (°C); сумма осадков (мм); суммарный поток солнечной радиации (Вт/м^2); средняя скорость ветра (м/с). Эти данные рассчитывались как среднее для анализируемых участков, аналогичных расчетам концентрации взвешенных веществ (см. рис. 2.12). Также привлекались данные о температуре многолетнемерзлых пород (ММП) на глубине 0 м (поверхность) и 0,75 м по станции о. Самойловский [Boike et al., 2019b], проанализированные в главе 1. Помимо метеорологических характеристик, рассчитанных на дату получения снимка, в работе анализировались синоптические факторы (суммы и средние значения за 3, 5 и 7 суток, предшествующих дате снимка, по которому проводился расчет относительного изменения концентрации взвешенных наносов по формуле (3)). Также дополнительно рассматривалась величина расходов воды на г/п Кюсюр с учетом времени добегания (2 дня).

Для анализа возможного влияния метеорологических и синоптических факторов (суммы и средние за 1, 3, 5 и 7 суток для температуры воздуха, мерзлоты на глубинах 0 и 0,75 м, количества осадков, солнечной радиации и скорости ветра) на трансформацию стока взвешенных наносов на участке «вершина дельты – магистральный рукав» рассчитывался коэффициент корреляции $r_{\Delta SSC\text{фактор}}$ между факторами и значениями относительного изменения концентрации взвешенных наносов по длине каждой из четырех основных проток:

$$r_{\Delta SSC\ \text{фактор}} = \frac{\sum(\Delta SSC_i - \overline{\Delta SSC})(\text{Фактор}_i - \overline{\text{Фактор}})}{\sqrt{\sum(\Delta SSC_i - \overline{\Delta SSC})^2}\sqrt{\sum(\text{Фактор}_i - \overline{\text{Фактор}})^2}}, \quad (7)$$

где ΔSSC_i – значения относительного изменения концентрации взвешенных наносов на участке «вершина дельты – магистральный рукав» за дату i, $\overline{\Delta SSC}$ – среднее значение изменения концентрации взвешенных наносов в базе данных; Фактор$_i$ – значение фактора за дату i, $\overline{\text{Фактор}}$ – среднее значение фактора в базе данных.

Для определения статистической значимости корреляций использовался t-критерий Стьюдента на уровне значимости α = 5%.

Принято следующее: 1) корреляции с коэффициентом $| r | > 0{,}70$ демонстрируют высокую степень связи между анализируемыми показателями, то есть метеорологический фактор оказывает прямое влияние на формирование стока взвешенных наносов; 2) значения корреляции с коэффициентом $0{,}50 < | r | < 0{,}70$ характеризуют среднюю степень связи, то есть существует тенденция изменчивости стока взвешенных наносов при изменении метеорологических факторов; 3) корреляции с коэффициентом $0{,}30 < | r | < 0{,}50$ несут умеренную степень связи, то есть метеорологический фактор может оказывать влияние на формирование стока взвешенных наносов, но не является ведущим, однако существует тенденция, определяющая формирование стока взвешенных наносов.

При анализе всей выборки (таблица 5.1) обнаруживается высокая корреляция ($r > 0{,}70$) между продольным изменением концентрации взвешенных наносов в Оленёкской протоке ($\Delta SSC_{\text{Олен}}$, %) и количеством осадков за один день:

$$\Delta SSC_{\text{Олен}} = 9{,}96\, P_1 \; - \; 23{,}1,\ r = 0{,}77, \qquad (8)$$

где P_1 – суммарное количество осадков за 1 день (мм).

Такая высокая корреляция объясняется особенностями геоморфологического строения Оленёкской протоки. Интенсивные осадки создают кратковременный поверхностный сток с водосбора дельты, в первую очередь с термоэрозионных оврагов (например, на о. Курунгнах), а также с левобережных притоков, стекающих со склонов хребта Чекановского. Талые и дождевые воды, стекая по термоэрозионным ложбинам, формируют гиперконцентрированные мутьевые потоки – измеренная концентрация взвешенных наносов в таких водотоках достигает 111 г/л (данные экспедиции 2022 г., раздел 5.2). Поступая непосредственно в русло, эти потоки локально увеличивают концентрацию взвешенных наносов, что и фиксируется спутниковыми снимками как продольное увеличение.

Значения корреляции $r > 0{,}50$ свойственны для связи продольных изменений концентрации взвешенных наносов в Туматской протоке ($\Delta SSC_{\text{Тумат}}$, %) и среднесуточной и средней скорости ветра за 1 и 3 суток. Полученные связи между параметрами статистически значимы согласно t-критерию Стьюдента и имеют вид:

$$\Delta SSC_{\text{Тумат}} = 10{,}4\ \overline{U}_1\ -\ 63{,}7,\ r = 0{,}59, \quad (9)$$

$$\Delta SSC_{\text{Тумат}} = 12{,}3\ \overline{U}_3\ -\ 73{,}8,\ r = 0{,}58, \quad (10)$$

где $\overline{U}_1$ – средняя скорость ветра за 1 сутки (м/с); $\overline{U}_3$ – средняя скорость ветра за 3 суток (м/с).

Таблица 5.1. Корреляционный анализ величин продольного изменения концентрации взвешенных наносов (ΔSSC) по рукавам дельты и метеорологических параметров

Параметр	ΔSSC, %			
	Быковская	Трофимовская	Тумат-ская	Оленёкская
Среднесуточная температура воздуха, °С	0,26	0,11	0,04	0,18
∑ температур за 3 дня, °С	0,28	0,07	0,10	0,27
∑ температур за 5 дней, °С	**0,31**	0,12	0,12	0,33
∑ температур за 7 дней, °С	**0,32**	0,19	0,12	0,32
Количество осадков за день, мм	–0,22	0,36	0,46	0,77
∑ осадков за 3 дня, мм	–0,13	–0,07	0,04	0,53
∑ осадков за 5 дней, мм	–0,21	–0,33	–0,11	0,24
∑ осадков за 7 дней, мм	–0,29	–0,27	–0,26	0,03
Среднесуточная скорость ветра, м/с	**0,34**	0,22	**0,59**	**0,43**
Средняя скорость ветра за 3 дня, м/с	**0,37**	**0,40**	**0,58**	**0,44**
Средняя скорость ветра за 5 дней, м/с	**0,34**	**0,32**	0,35	**0,34**
Поток солнечной радиации, Вт/м²	**0,37**	0,19	0,17	0,17
∑ солнечной радиации за 3 дня, Вт/м²	**0,38**	0,20	0,29	0,26
∑ солнечной радиации за 5 дней, Вт/м²	**0,40**	0,20	0,25	0,32
∑ солнечной радиации за 7 дней, Вт/м²	**0,40**	0,22	0,26	0,29
Среднесуточная температура ММП (0 м), °С	0,15	–0,06	–0,12	0,07
∑ температур ММП (0 м) за 3 дня, °С	0,12	–0,09	–0,04	0,21
∑ температур ММП (0 м) за 5 дней, °С	0,18	0,02	–0,03	0,26
∑ температур ММП (0 м) за 7 дней, °С	0,15	0,08	–0,02	0,17
Среднесуточная температура ММП (0,75 м), °С	–0,03	0,18	0,47	**0,56**
∑ температур ММП (0,75 м) за 3 дня, °С	0,01	0,23	0,49	**0,57**
∑ температур ММП (0,75 м) за 5 дней, °С	0,00	0,22	0,48	**0,56**
∑ температур ММП (0,75 м) за 7 дней, °С	–0,04	0,19	0,46	0,53
Расход воды в вершине дельты, м³/с	0,31	0,09	0,27	0,27

Примечание: здесь и в таблицах 5.2–5.4 статистически значимые корреляции выделены жирным; цветом обозначен знак связи: синим – отрицательные, красным – положительные; насыщенность цвета отражает величину коэффициента корреляции.

Также корреляция высокая (>0,50) для связи продольного изменения концентрации взвешенных наносов в Оленёкской протоке ($\Delta SSC_{\text{Олен}}$, %) и температуры ММП на глубине 0,75 м, а также ее сумм за 3, 5 и 7 суток. Они статистически значимы согласно *t*-критерию Стьюдента и имеют вид:

$$\Delta SSC_{\text{Олен}} = 23{,}9 \sum T(\text{ММП } 0{,}75)_1 - 43{,}8,\ r = 0{,}56, \quad (11)$$
$$\Delta SSC_{\text{Олен}} = 8{,}31 \sum T(\text{ММП } 0{,}75)_3 - 43{,}6,\ r = 0{,}57, \quad (12)$$
$$\Delta SSC_{\text{Олен}} = 4{,}83 \sum T(\text{ММП } 0{,}75)_5 - 41{,}9,\ r = 0{,}56, \quad (13)$$

$\Sigma T(\text{ММП } 0{,}75)_1$ – сумма значений температуры ММП на глубине 0,75 м за 1 сутки (°С), $\Sigma T(\text{ММП } 0{,}75)_3$ – сумма значений температуры ММП на глубине 0,75 м за 3 суток (°С), $\Sigma T(\text{ММП } 0{,}75)_5$ – сумма значений температуры ММП на глубине 0,75 м за 5 суток (°С).

Тенденции ($0{,}25 < |\, r \,| < 0{,}50$) в зависимости продольного увеличения концентрации взвешенных наносов от метеорологических факторов прослеживаются для различных вариаций расчетов температуры воздуха, скоростей ветра, солнечной радиации в Быковской протоке. Статистически значимые связи $\Delta SSC_{\text{Бык}}$ (%) в этой протоке с суммарной 5- и 7-дневной температурой воздуха, а также со средними скоростями ветра за 5 суток и суммами солнечной радиации описываются уравнениями:

$$\Delta SSC_{\text{Бык}} = 0{,}52 \sum T(\text{воздуха})_5 - 33{,}5,\ r = 0{,}31, \quad (14)$$
$$\Delta SSC_{\text{Бык}} = 0{,}46 \sum T(\text{воздуха})_7 - 33{,}5,\ r = 0{,}32, \quad (15)$$
$$\Delta SSC_{\text{Бык}} = 11{,}9 \bar{U}_5 - 63{,}2,\ r = 0{,}34, \quad (16)$$
$$\Delta SSC_{\text{Бык}} = 0{,}2942 \sum W_1 - 48{,}2,\ r = 0{,}37, \quad (17)$$
$$\Delta SSC_{\text{Бык}} = 0{,}1015 \sum W_3 - 45{,}8,\ r = 0{,}38, \quad (18)$$
$$\Delta SSC_{\text{Бык}} = 0{,}0672 \sum W_5 - 46{,}3,\ r = 0{,}40, \quad (19)$$
$$\Delta SSC_{\text{Бык}} = 0{,}0528 \sum W_7 - 47{,}8,\ r = 0{,}40, \quad (20)$$

где $\Sigma T(\text{воздуха})_5$ – сумма значений температуры воздуха за 5 суток, °С; $\Sigma T(\text{воздуха})_7$ – сумма значений температуры воздуха за 7 суток, °С; $\bar{U}_5$ – средняя скорость ветра за 5 суток, м/с; ΣW_1 – суммарный поток солнечной радиации за 1 сутки, ΣW_3 – сумма потока солнечной радиации за 3 суток, Вт/м^2; ΣW_5 – сумма потока солнечной радиации за 5 суток, Вт/м^2; ΣW_7 – сумма потока солнечной радиации за 7 суток, Вт/м^2;

Статистически значимые корреляции (выделены полужирным шрифтом) от 0,32 до 0,44 также установлены для Трофимовской ($\Delta SSC_{\text{Трофим}}$, %) и Оленёкской ($\Delta SSC_{\text{Олен}}$, %) проток при анализе разной скорости ветра:

$$\boldsymbol{\Delta SSC_{\text{Трофим}} = 9{,}99\, \bar{U}_3 - 37{,}2},\ r = 0{,}40, \quad (21)$$
$$\boldsymbol{\Delta SSC_{\text{Трофим}} = 8{,}98\, \bar{U}_5 - 33{,}0},\ r = 0{,}32, \quad (22)$$
$$\boldsymbol{\Delta SSC_{\text{Олен}} = 7{,}45\, \bar{U}_1 - 43{,}8},\ r = 0{,}43, \quad (23)$$
$$\boldsymbol{\Delta SSC_{\text{Олен}} = 9{,}29\, \bar{U}_3 - 53{,}9},\ r = 0{,}44, \quad (24)$$
$$\Delta SSC_{\text{Олен}} = 9{,}42\, \bar{U}_5 - 55{,}5,\ r = 0{,}34, \quad (25)$$

где $\bar{U}_1$ – средняя скорость ветра за 1 сутки (м/с); $\bar{U}_3$ – средняя скорость ветра за 3 суток (м/с); $\bar{U}_5$ – средняя скорость ветра за 5 суток (м/с).

Для выявления факторов, оказывающих влияние на повышение концентрации взвешенных наносов на расчетных участках, отдельно проанализированы ситуации с продольным увеличением концентрации взвешенных наносов, т. е. при $\Delta SSC > 0$. В отличие от общей выборки по всем изменениям концентрации взвешенных наносов (уравнения (8) – (25)),

для случаев $\Delta SSC > 0$ более четко прослеживается влияние солнечной радиации; в частности, в Оленёкской протоке, приводящей к связи с коэффициентами корреляции в диапазоне $0{,}50 < |\, r \,| < 0{,}70$. Значения коэффициента корреляции увеличиваются от 0,52 для среднесуточного потока радиации до 0,66 для суммарного потока за 5 дней до даты получения снимка. Несколько меньшее влияние солнечной радиации отмечено в протоках Быковской и Туматской, где r максимален для 5-дневных сумм потока солнечной радиации (0,46 и 0,45 соответственно). В Туматской протоке продольное увеличение концентрации взвешенных наносов зависит от суммарных за 5 и 7 дней значений среднесуточной температуры воздуха (0,42 и 0,43). Также для Туматской протоки коэффициент корреляции находится в пределах 0,30–0,50 для 5- и 7-дневных сумм температуры мерзлоты на поверхности (0,31). Невысокие значения связи также наблюдаются между температурой ММП на глубине 0,75 м и продольным увеличением концентрации взвешенных наносов в Быковской протоке (0,33–0,35) (таблица 5.2).

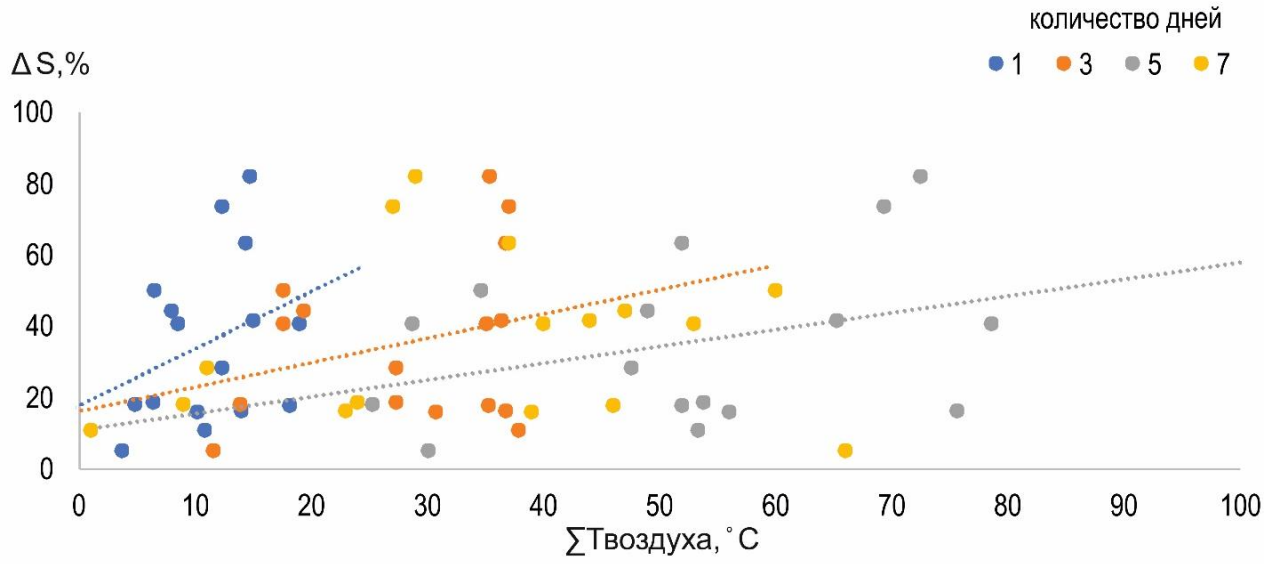
Также рассматривались ситуации в Трофимовской протоке, при которых продольное увеличение концентрации взвешенных наносов максимально (при $\Delta SSC > 10\%$) (таблица 5.2). В этом случае на сток взвешенных наносов начинают оказывать влияние среднесуточная температура и ее суммы за пятидневный период. Коэффициент корреляции увеличивается до 0,34.

При анализе ситуаций продольного уменьшения концентрации взвешенных наносов вдоль рукавов обнаруживается, что связи с метеорологическими и гидрологическими факторами статистически незначимы и не поддаются однозначной интерпретации. Это закономерно: аккумулятивный режим определяется прежде всего гравитационным осаждением взвешенных наносов, которое зависит от морфологических характеристик рукава (уклон, ширина, глубина) и слабо реагирует на краткосрочные изменения метеорологических условий. Таким образом, выявленные корреляции описывают факторы активизации эрозионных процессов, тогда как переход к аккумулятивному режиму определяется иными, преимущественно морфологическими, причинами, рассмотренными в главах 3 и 5.2. Полученные количественные соотношения между изменениями концентрации взвешенных наносов в протоках дельты Лены и синоптическими и метеорологическими параметрами свидетельствуют о том, что в разных протоках ключевую роль в продольном изменении играют разные факторы.

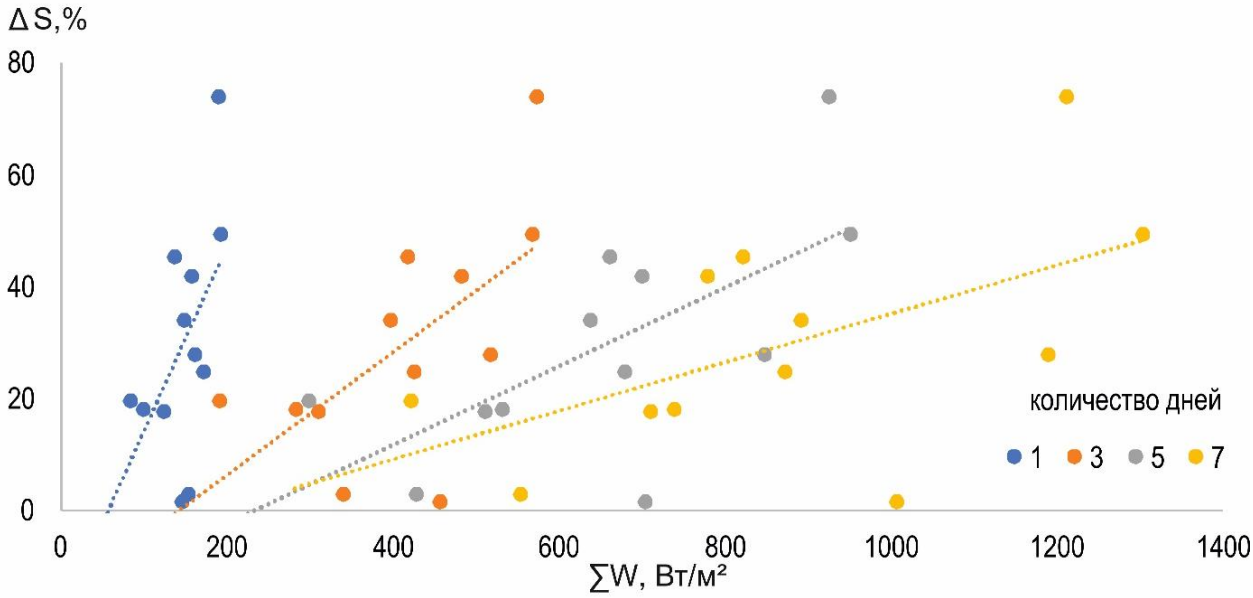
Таблица 5.2. Корреляционный анализ величин продольного изменения концентрации взвешенных наносов (Δ*SSC*) по рукавам дельты и метеорологических параметров при Δ*SSC* > 0

Параметр	Δ*SSC*, %				Δ*SSC* >10%
	Быков-ская	Трофимов-ская	Тумат-ская	Оленёк-ская	Трофимов-ская
Среднесуточная температура воздуха, °С	0,07	–0,02	0,14	0,09	0,32
∑ температур за 3 дня, °С	0,16	0,04	0,15	0,19	0,28
∑ температур за 5 дней, °С	0,16	0,13	0,42	0,26	0,34
∑ температур за 7 дней, °С	0,11	0,12	0,43	0,18	0,24
Среднесуточная скорость ветра, м/с	0,25	0,29	0,56	–0,05	0,04
Средняя скорость ветра за 3 дня, м/с	0,48	0,44	0,84	0,19	0,31
Средняя скорость ветра за 5 дней, м/с	0,62	0,50	0,79	0,40	0,39
Поток солнечной радиации, Вт/м²	0,38	0,16	0,33	0,52	0,30
∑ солнечной радиации за 3 дня, Вт/м²	0,43	0,13	0,39	0,62	0,28
∑ солнечной радиации за 5 дней, Вт/м²	0,46	0,15	0,45	0,66	0,25
∑ солнечной радиации за 7 дней, Вт/м²	0,36	0,09	0,38	0,56	0,20
Среднесуточная температура ММП (0 м), °С	0,12	–0,09	0,09	0,03	–0,16
∑ температур ММП (0 м) за 3 дня, °С	0,29	0,05	0,11	0,22	–0,16
∑ температур ММП (0 м) за 5 дней, °С	0,20	0,13	0,31	0,16	–0,07
∑ температур ММП(0 м) за 7 дней, °С	0,16	0,15	0,30	0,10	–0,09
Среднесуточная температура ММП (0,75 м), °С	0,35	0,26	–0,19	0,00	–0,04
∑ температур ММП (0,75 м) за 3 дня, °С	0,35	0,29	–0,19	0,05	–0,02
∑ температур ММП (0,75 м) за 5 дней, °С	0,34	0,25	–0,19	0,03	–0,03
∑ температур ММП (0,75 м) за 7 дней, °С	0,33	0,21	–0,24	–0,02	–0,03
Расход воды в вершине дельты, м³/с	0,09	–0,17	0,03	0,17	0,02

На продольное увеличение концентрации взвешенных наносов в Оленёкской протоке оказывает влияние повышение температуры ММП и связанное с этим их оттаивание. Увеличение температуры воздуха (рис. 5.1-А) и мерзлоты приводит к разрушению берегов и формированию мутьевых потоков. В результате значимым фактором становится и солнечная радиация, которая приводит к активизации термических процессов в криолитозоне, в том числе к развитию процессов термоденудации берегов, представленных ММП. Именно в Оленёкской протоке при увеличении потока солнечной радиации происходит продольное увеличение концентрации взвешенных наносов (рис. 5.1-Б).



(А)



(Б)

Рис. 5.1. Тенденция увеличения Δ*SSC* воды в Оленёкской протоке с возрастанием температуры воздуха (А) (за 1, 3, 5 и 7 суток) и солнечной радиации (Б) (сумма за 1, 3, 5 и 7 суток)

Особый интерес вызывают экстремальные изменения концентрации взвешенных наносов, зафиксированные при дешифрировании отдельных снимков. В частности, максимальные величины продольного увеличения концентрации взвешенных наносов установлены для участка Трофимовской протоки по данным дешифрирования спутникового снимка от 28.07.2012 (Δ*SSC* = 81,9%, абсолютные значения возрастали с 30,7 мг/л в вершине дельты до 55,8 мг/л в Трофимовской протоке). Именно для этого периода характерны максимальные значения температуры воздуха и температуры ММП в базе данных (сумма значений температуры воздуха за 5 дней составила 72,5°С, сумма значений температуры ММП на 0 м за 7 суток составила 79,8°С) (рис. 5.2).

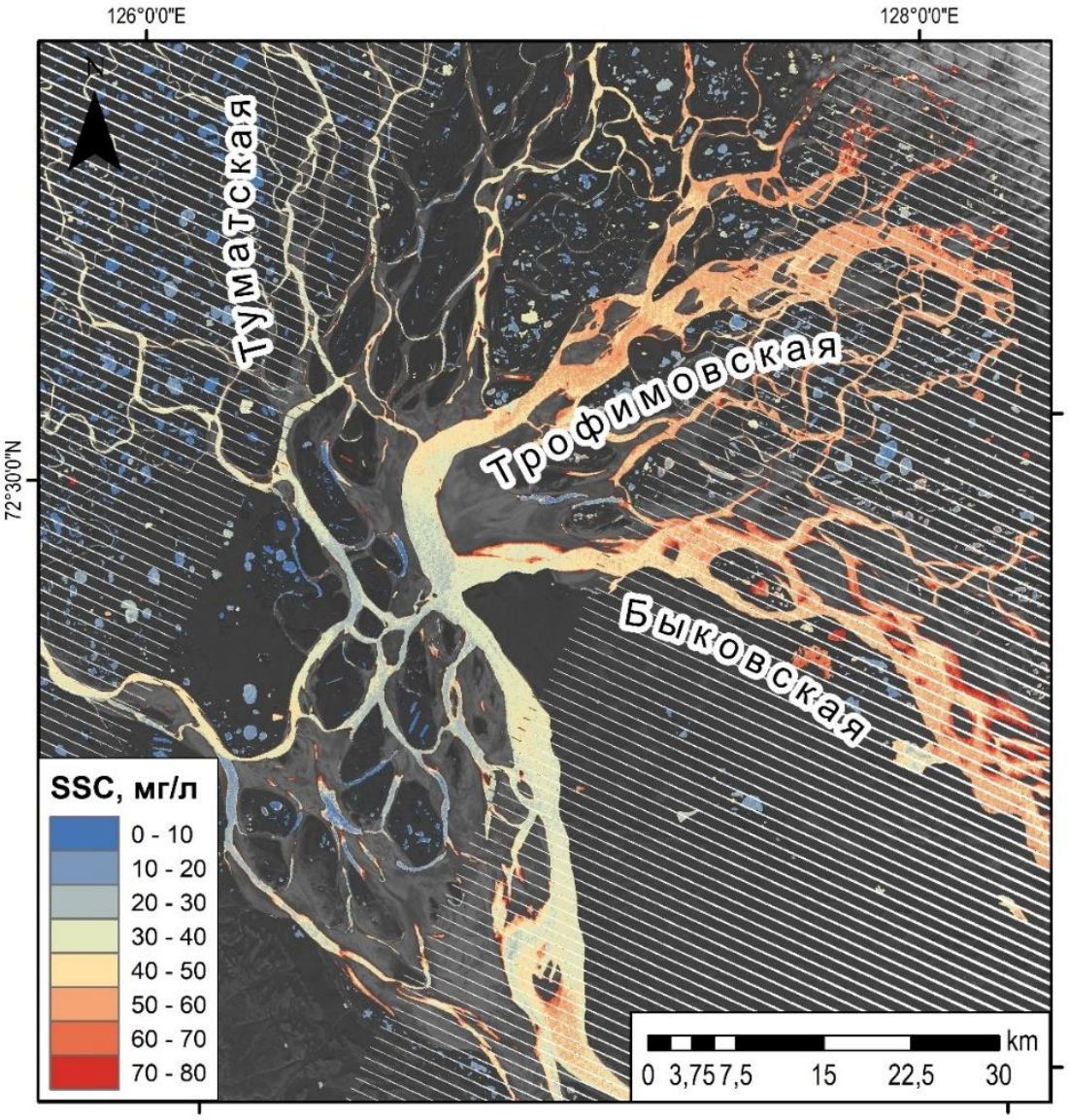
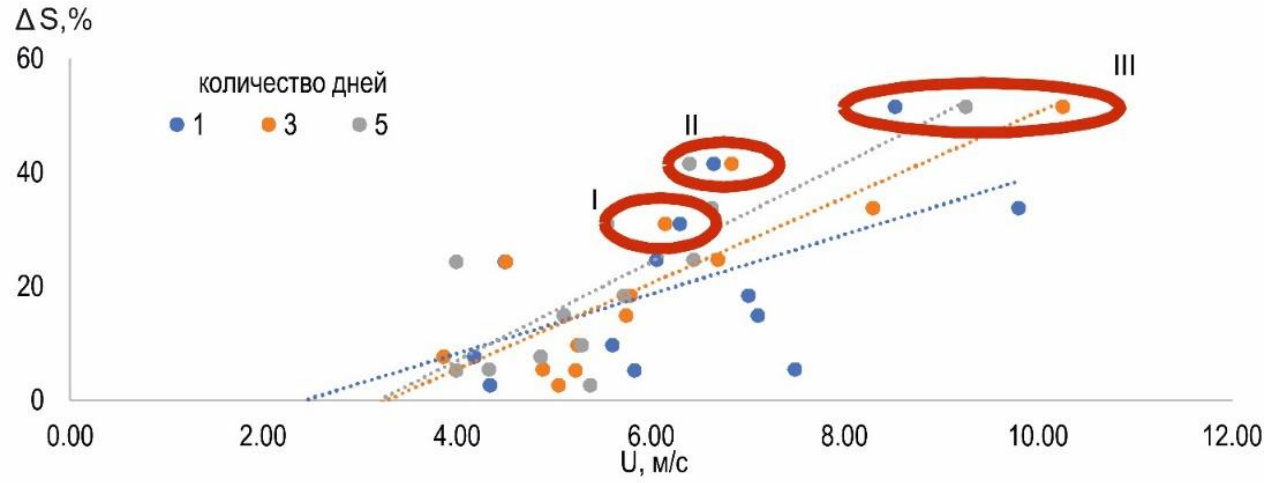
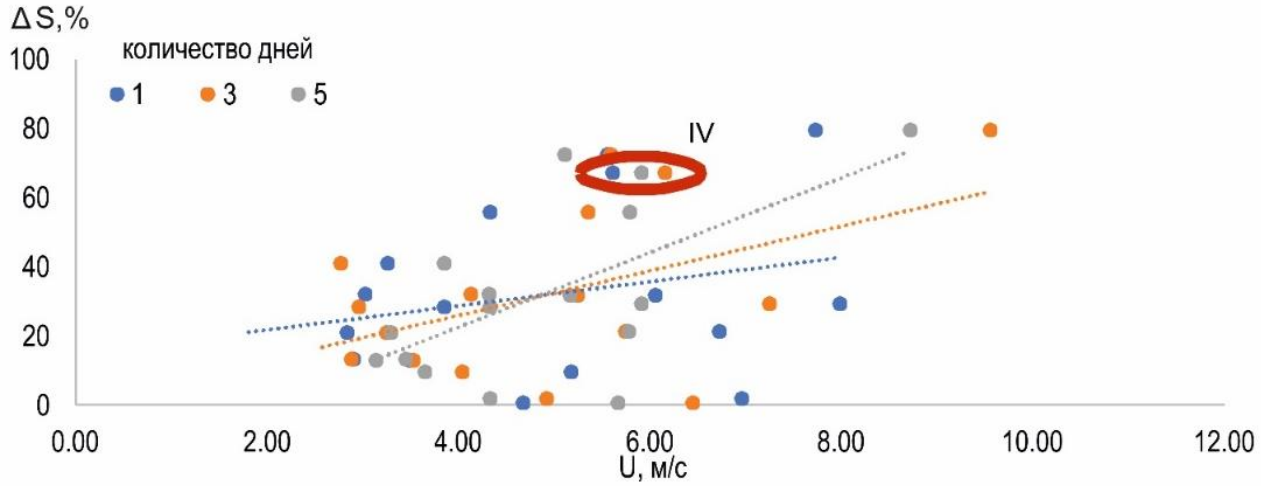


Рис. 5.2. Карта пространственной изменчивости концентрации взвешенных наносов по результатам дешифрирования спутникового снимка от 28.07.2012 при $\Delta SSC_{\text{Трофимовская}} = 81{,}9\%$

Очевидно, что влияние ветра на изменение концентрации взвешенных наносов связано с ветровым волнением, приводящим к взмучиванию донных отложений, и сгонно-нагонными явлениями. Статистически достоверные корреляции наблюдаются между продольным изменением концентрации взвешенных наносов воды в Туматской протоке и средней скоростью ветра. Здесь при увеличении среднесуточной и средней за 1 и 3 суток скорости ветра происходит продольное увеличение концентрации взвешенных наносов (рис. 5.3).



(А)



(Б)

Рис. 5.3. Тенденция продольного увеличения концентрации взвешенных наносов воды (Δ*SSC*) в Туматской протоке (А), Быковской протоке (Б) с возрастанием скорости ветра (среднее за 1, 3, 5 суток). Цифрами (I–IV) обозначены случаи изменения концентрации взвешенных наносов воды, рассмотренные в тексте

На графике связи между Δ*SSC* и скоростями ветра в Туматской протоке максимальные продольные изменения концентрации взвешенных наносов (рис. 5.3, цифра I) соответствуют ситуации от 28.07.2012, когда на участке «вершина дельты – Туматская протока» происходило увеличение концентрации взвешенных наносов на 30,9% (рис. 5.4). В день получения снимка скорость ветра составляла 6,31 м/с, а средняя за 3 суток – 6,16 м/с. Возрастание скорости ветра выше 2–3 м/с приводит к увеличению волновой деятельности на всех участках проток. Ветровое перемешивание в центральной части дельты на широком участке рассредоточения стока, а также вовлечение песчаных отложений, слагающих дно русла, привели к взмучиванию донных осадков и перетоку их в Туматскую протоку.

Аналогичные ситуации обозначены цифрами II и III на рис. 5.3. В данном случае выделенным точкам соответствуют спутниковые снимки от 11.08.2011 (II) и 10.06.2018 (III). В этих ситуациях концентрация взвешенных наносов продольно увеличивается на 51,4 и 41,5%

соответственно. Увеличение может быть вызвано повышением средней скорости ветра до 8,53 м/с (11.08.2011) и до 6,65 м/с (10.06.2018).

Высокие значения корреляции между скоростью ветра и продольным изменением концентрации взвешенных наносов зафиксированы и для Быковской протоки. Здесь на обширных участках, где ширина русла достигает 8 км, вдоль левого берега расположена песчаная отмель с малыми глубинами, происходят масштабные взмучивания песчаных отложений, что также влияет на формирование шлейфов повышенной концентрации взвешенных наносов. Например, на снимке от 10.06.2018 (точки под номером IV) зафиксирована ситуация, где при скорости ветра до 6 м/с продольное изменение составило 63,1% (рис. 5.4).

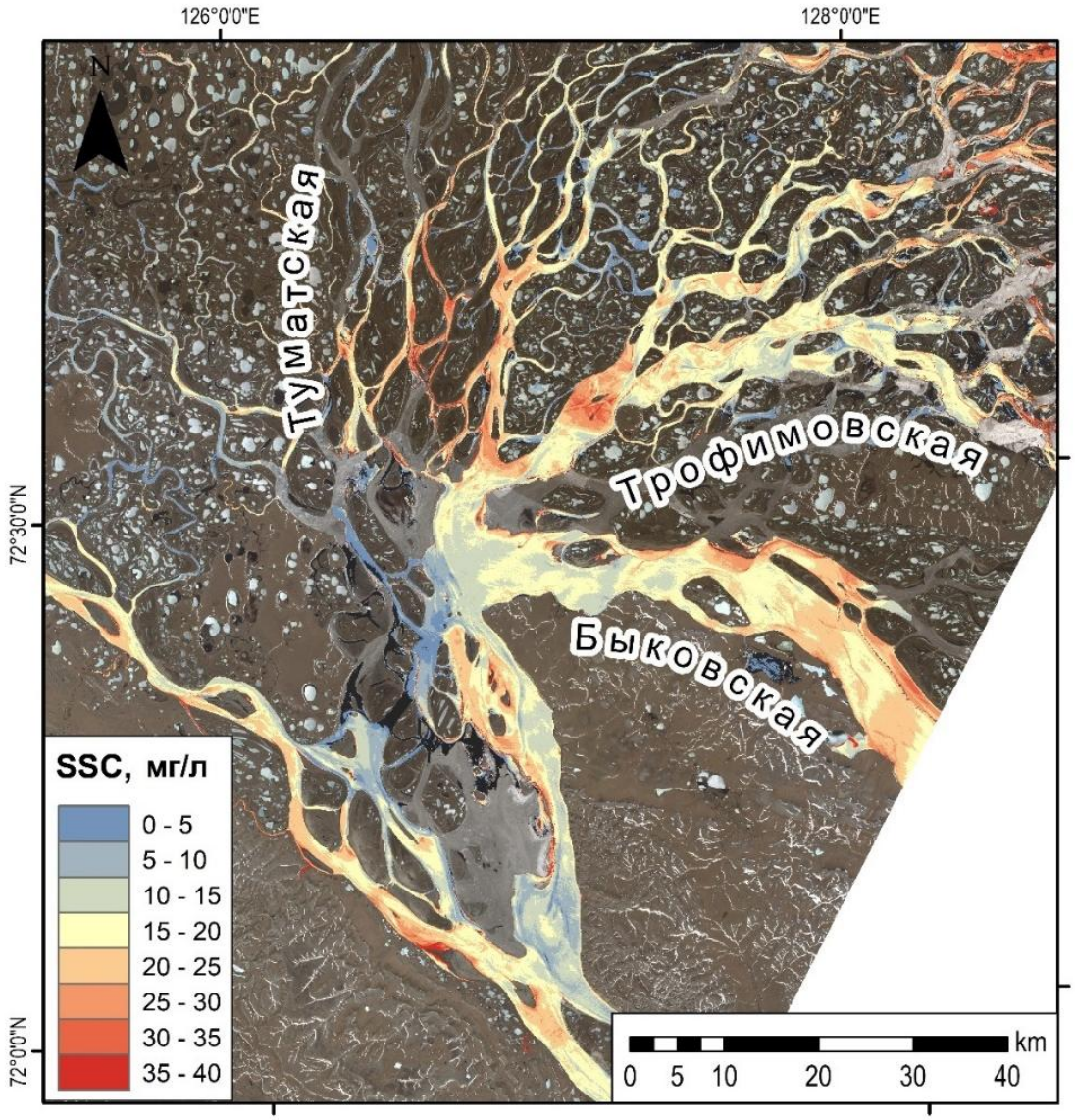


Рис. 5.4. Карта пространственной изменчивости концентрации взвешенных наносов по результатам дешифрирования спутникового снимка от 10.06.2018 при $\Delta SSC_{\text{Туматская}}$ = 41,5% (скорость ветра 6,8 м/с), $\Delta SSC_{\text{Быковская}}$ = 63,1% (скорость ветра 6,2 м/с)

Увеличение концентрации взвешенных наносов с ростом скорости ветра подтверждается результатами наблюдений автора в 2022 г. При скорости ветра от 4,5 до 6,2 м/с наблюдалось взмучивание донных отложений у о. Самойловского: концентрация взвешенных наносов возросла до 35% – с 24,3 мг/л (по данным отбора 11.08.2022) до 32,1 мг/л (14.08.2022). Уменьшение среднесуточной скорости ветра до 3,5 м/с, наоборот, привело к аккумуляции и снижению концентрации взвешенных наносов до 14,2 мг/л (15.08.2022).

Также рассмотрены ситуации повышенной и пониженной водности для выявления факторов трансформации стока взвешенных наносов в разные фазы водности в зависимости от расходов воды в вершине дельты. Для этого вся выборка была поделена на две части, первая из которых включала все значения Δ*SSC* при расходах воды $Q > 37\ 500$ м³/с, вторая – при $Q < 37\ 500$ м³/с. Пороговое значение 37 500 м³/с представляет собой среднее арифметическое расходов воды, соответствующих датам съемки спутниковых снимков, использованных для расчета Δ*SSC* (159 снимков за период 2000–2024 гг.) (таблицы 5.3 и 5.4).

Таблица 5.3. Корреляционный анализ величин продольного изменения концентрации взвешенных наносов (Δ*SSC*) по рукавам дельты и метеорологических параметров при $Q > 37\ 500$ м^3/с

Параметр	Δ*SSC*, %			
	Быковская	Трофимовская	Тумат-ская	Оленёкская
Среднесуточная температура воздуха, °С	0,18	0,02	–0,20	0,01
∑ температур за 3 дня, °С	0,20	–0,10	–0,18	0,08
∑ температур за 5 дней, °С	0,26	–0,10	–0,23	0,16
∑ температур за 7 дней, °С	0,26	–0,01	–0,25	0,18
Среднесуточная скорость ветра, м/с	0,34	0,15	0,49	0,29
Средняя скорость ветра за 3 дня, м/с	0,33	0,16	0,39	0,32
Средняя скорость ветра за 5 дней, м/с	0,22	0,20	0,04	0,19
Поток солнечной радиации, Вт/м²	0,44	0,18	0,14	0,30
∑ солнечной радиации за 3 дня, Вт/м²	0,43	0,26	0,29	0,38
∑ солнечной радиации за 5 дней, Вт/м²	0,46	0,22	0,19	0,43
∑ солнечной радиации за 7 дней, Вт/м²	0,47	0,23	0,19	0,41
Среднесуточная температура ММП (0 м), °С	0,04	–0,06	–0,29	–0,11
∑ температур ММП (0 м) за 3 дня, °С	0,01	–0,13	–0,24	–0,01
∑ температур ММП (0 м) за 5 дней, °С	0,12	–0,08	–0,30	0,11
∑ температур ММП (0 м) за 7 дней, °С	0,10	–0,08	–0,37	0,03
Среднесуточная температура ММП (0,75 м), °С	–0,54	–0,38	–0,65	–0,62
∑ температур ММП (0,75 м) за 3 дня, °С	–0,54	–0,38	–0,64	–0,62
∑ температур ММП (0,75 м) за 5 дней, °С	–0,54	–0,38	–0,64	–0,63
∑ температур ММП (0,75 м) за 7 дней, °С	–0,55	–0,38	–0,64	–0,63
Расход воды в вершине дельты, м³/с	0,45	0,35	0,57	0,58

В целом влияние метеорологических показателей снижается. При повышенных расходах воды сток взвешенных наносов в дельте определяется потоком солнечной радиации. Так, средние значения корреляции (до 0,47) между солнечной радиацией и значениями Δ*SSC* наблюдаются для южной части дельты – Быковской и Оленёкской проток. Также проявляется влияние скорости ветра на участках Быковской, Туматской и Оленёкской проток. В этом случае значения коэффициента корреляции находятся в пределах 0,29–0,49. Ниже корреляции при осреднении скорости ветра за пять дней.

Средние по значению корреляции отрицательного знака зафиксированы для всех рукавов при сопоставлении Δ*SSC* и температуры ММП на глубине 0,75 м. Данная закономерность может быть связана с тем, что расходы воды выше 37 500 м^3/с приходятся на июнь, когда температура ММП на глубине еще близка к 0 °С.

При рассмотрении связей между значениями Δ*SSC* и расходами воды в вершине дельты на формирование стока взвешенных наносов начинают оказывать влияние расходы воды. Так, высокие значения корреляции наблюдаются для таких проток, как Туматская и Оленёкская (0,57 и 0,58 соответственно). С повышением расходов воды концентрация взвешенных наносов продольно увеличивается и в Быковской, и в Трофимовской протоках. Здесь корреляции ниже и принимают значения соответственно 0,45 и 0,35.

Совершенно противоположная ситуация складывается при Q < 37 500 м^3/с, приходящихся на вторую половину июля – сентябрь. Роль водности в этот период значительно снижается во всех протоках. И наоборот – увеличивается роль метеорологических факторов в формировании стока взвешенных наносов (таблица 5.4).

Высокие значения корреляции характерны для суточной скорости ветра при сопоставлении их со значениями Δ*SSC* в Туматской протоке (до 0,76). В Быковской и Оленёкской протоках степень повышения концентрации взвешенных наносов также высока при анализе их со скоростью ветра: 0,48 и 0,65 соответственно.

Увеличивается также роль температурных показателей. Так, показатели корреляции увеличиваются в Оленёкской и Туматской протоках до 0,64. Особенно высоко влияние температуры ММП на поверхности и на глубине 0,75 м на участке Оленёкской протоки. Это единственная часть дельты, где температурный эффект, вероятнее всего, играет важнейшую роль в процессах повышения концентрации взвешенных наносов. Тенденция к увеличению существует и для сумм температуры воздуха за 3 и 5 суток: коэффициенты корреляции составляют 0,60 и 0,64, а также для сумм температуры ММП на поверхности: 0,62 и 0,62.

Таблица 5.4. Корреляционный анализ величин продольного изменения концентрации взвешенных наносов (ΔSSC) по рукавам дельты и метеорологических параметров при $Q < 37\ 500$ м^3/с

Параметр	ΔSSC, %			
	Быковская	Трофимовская	Туматская	Оленёкская
Среднесуточная температура воздуха, °С	0,25	0,30	0,27	0,44
∑ температур за 3 дня, °С	0,28	0,31	0,41	0,60
∑ температур за 5 дней, °С	0,32	0,37	0,54	0,64
∑ температур за 7 дней, °С	0,34	0,41	0,57	0,55
Среднесуточная скорость ветра, м/с	0,35	0,26	0,71	0,65
Средняя скорость ветра за 3 дня, м/с	0,46	0,52	0,76	0,61
Средняя скорость ветра за 5 дней, м/с	0,48	0,38	0,62	0,53
Поток солнечной радиации, Вт/м²	0,25	0,30	0,16	–0,07
∑ солнечной радиации за 3 дня, Вт/м²	0,28	0,32	0,29	0,05
∑ солнечной радиации за 5 дней, Вт/м²	0,28	0,33	0,29	0,12
∑ солнечной радиации за 7 дней, Вт/м²	0,27	0,34	0,32	0,05
Среднесуточная температура ММП (0 м), °С	0,19	0,10	0,09	0,41
∑ температур ММП (0 м) за 3 дня, °С	0,17	0,06	0,28	0,62
∑ температур ММП (0 м) за 5 дней, °С	0,23	0,17	0,40	0,62
∑ температур ММП (0 м) за 7 дней, °С	0,23	0,25	0,55	0,53
Среднесуточная температура ММП (0,75 м), °С	0,10	0,11	0,33	0,54
∑ температур ММП (0,75 м) за 3 дня, °С	0,14	0,13	0,34	0,55
∑ температур ММП (0,75 м) за 5 дней, °С	0,14	0,13	0,34	0,54
∑ температур ММП (0,75 м) за 7 дней, °С	0,12	0,11	0,33	0,53
Расход воды в вершине дельты, м³/с	0,09	0,28	0,02	–0,38

При больших расходах воды $Q > 37\ 500$ м^3/с увеличение концентрации взвешенных наносов потока по длине рукавов фиксируется на снимках наиболее часто. В итоге значимые корреляции (на уровне α = 5%) ΔSSC с расходами воды повышаются до 0,57 и 0,58 для таких проток, как Туматская и Оленёкская. С повышением расходов воды концентрация взвешенных наносов продольно увеличивается и в Быковской, и в Трофимовской протоках. Здесь корреляции ниже и принимают значения 0,44 и 0,34 соответственно, однако статистически незначимы (согласно *t*-критерию Стьюдента на уровне значимости α = 5%). Указанные соотношения описываются следующими уравнениями:

$$\Delta SSC_{\text{Бык}} = 0{,}0012Q - 70{,}6,\ r = 0{,}44, \quad (26)$$

$$\Delta SSC_{\text{Трофим}} = 0{,}0006Q - 28{,}1,\ r = 0{,}34, \quad (27)$$

$$\Delta SSC_{\text{Тумат}} = 0{,}0013Q - 81{,}5,\ r = 0{,}57, \quad (28)$$

$$\Delta SSC_{\text{Олен}} = 0{,}0017Q - 101{,}5,\ r = 0{,}58, \quad (29)$$

где Q – расход воды в вершине дельты (м^3/с).

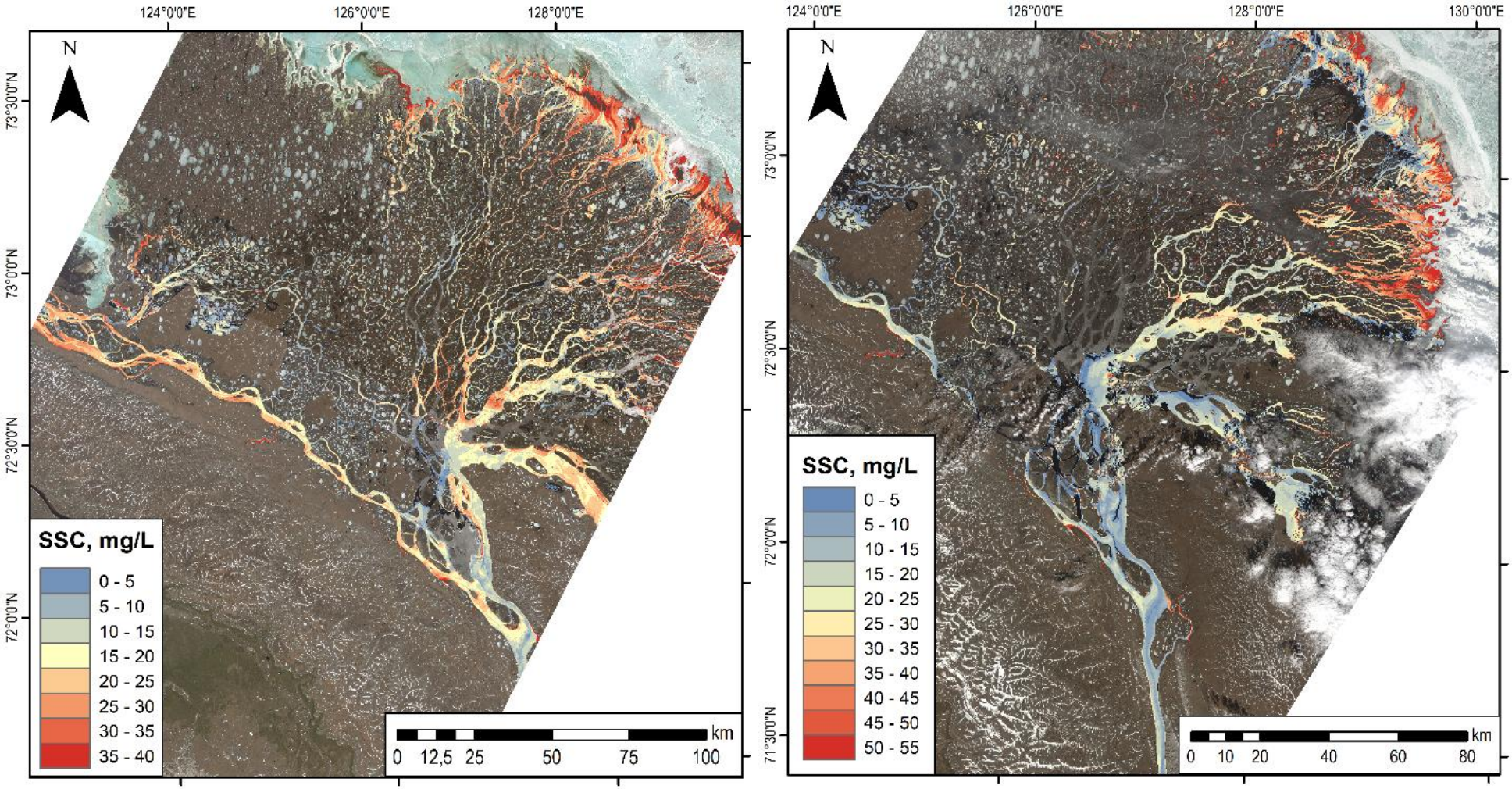
При высоких расходах воды (Q > 37 500 м³/с) продольное увеличение концентрации взвешенных наносов во всех рукавах обеспечивается прежде всего транспортирующей способностью потока, тогда как при Q < 37 500 м³/с доминирующим становится влияние метеорологических факторов. Этот переход наглядно иллюстрируется конкретными примерами: при Q = 78 100 м³/с (10.06.2018) продольное увеличение концентрации взвешенных наносов достигало 74% при исходной концентрации в вершине дельты всего 12,8 мг/л (рис. 5.5-А); при Q = 69 700 м³/с (08.06.2014) – до 25% с максимумом в Туматской протоке (31,4 мг/л) (рис. 5.5-Б).

Таким образом, анализ влияния гидрометеорологических факторов на трансформацию стока взвешенных наносов в дельте Лены позволяет установить следующие закономерности:

1. В периоды высокой водности (Q > 37 500 м³/с) определяющую роль играют расход воды и солнечная радиация: высокая транспортирующая способность потока в сочетании с интенсивным прогревом поверхности обеспечивает продольное увеличение концентрации взвешенных наносов во всех рукавах.

2. В меженный период (Q < 37 500 м³/с) роль стока воды резко снижается, и на первый план выходят ветровой режим и температурные показатели, причем их влияние существенно различается по рукавам: в Туматской и Оленёкской протоках определяющим фактором является скорость ветра и температура ММП соответственно, тогда как в Быковской прослеживаются умеренные связи сразу с несколькими параметрами.

Принципиально иная картина характерна для Трофимовской протоки, где коэффициенты корреляции с большинством факторов остаются низкими при любых условиях водности. Это свидетельствует о том, что режим трансформации взвешенных наносов в крупнейшем рукаве дельты в значительной мере определяется не краткосрочными метеорологическими условиями, а распределением большей части стока в этот рукав, морфологией русла и активностью русловых переформирований, рассмотренных в разделе 5.2. Именно это объясняет статистически значимый нарастающий многолетний тренд ΔSSC в Трофимовской протоке при отсутствии столь же выраженных трендов в остальных рукавах.



(А) (Б)

Рис. 5.5. Карты пространственной изменчивости *SSC* от 10 июня 2018 г. ($\Delta SSC_{\text{Трофимовская}}$ = 41,5%, $\Delta SSC_{\text{Быковская}}$ = 67,1%, $\Delta SSC_{\text{Туматская}}$ = 41,5%, $\Delta SSC_{\text{Оленёкская}}$ = 73,9%) (А) и 8 июня 2014 г. ($\Delta SSC_{\text{Трофимовская}}$ = 62,3%, $\Delta SSC_{\text{Быковская}}$ = 40,7%, $\Delta SSC_{\text{Туматская}}$ = 7,63%, $\Delta SSC_{\text{Оленёкская}}$ = 41,8%) (Б)

5.2. Влияние русловых переформирований

Русловой режим дельт в первую очередь определяется распределением стока по рукавам дельты. Особенности развития русловых процессов в дельте Лены связаны также с этапами формирования дельты и геоморфологическим строением коренных берегов и островов, представленных ММП.

Старейшей аккумулятивной частью дельты является Оленёкский сектор, который с одной стороны ограничен выходами коренных пород кряжа Чекановского у правого берега, с другой стороны – речными аккумулятивными отложениями. Сегодня Оленёкская протока представляет собой длиннейшее русло с чередованием односторонних простых разветвлений, образованных прибрежными одиночными островами, переходящее к морскому краю в относительно-прямолинейное и перед впадением в море Лаптевых образующее одиночное разветвление. На всем протяжении Оленёкской протоки встречаются развитые излучины у правого берега, приуроченные к выходам Ледового комплекса (рис. 5.6).

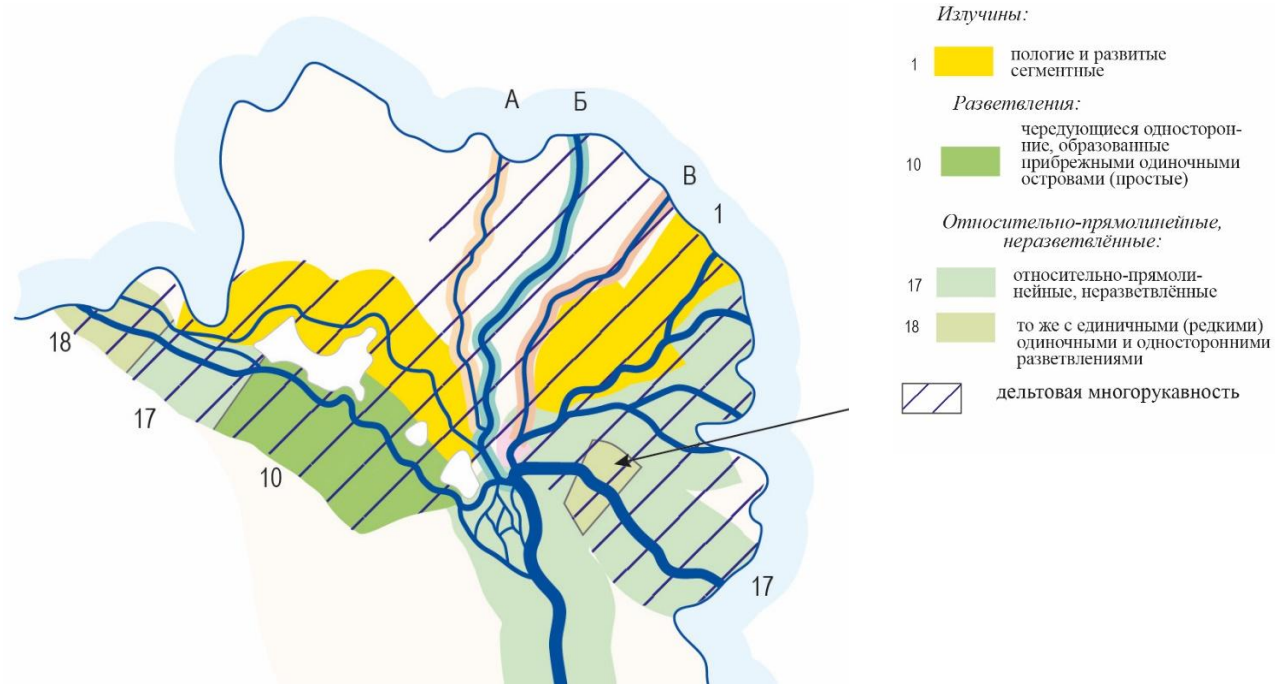


Рис. 5.6. Карта русловых процессов на территории дельты Лены, составленная с участием автора

Более молодая часть дельты – верхняя и средняя части Туматской протоки – отличается в первую очередь дельтовой многорукавностью, развивающейся на аккумулятивном рельефе. Образовавшаяся позже по времени Трофимовская протока – это сеть многорукавных извилистых русел с пологими и развитыми сегментными излучинами. Эти русла при впадении в море Лаптевых переходят в относительно-прямолинейные.

Самая молодая часть дельты – Быковская система – остается менее развитой и на всем протяжении характеризуется относительно-прямолинейным руслом, которое при впадении в море образует дельтовую многорукавность. Особенностью Быковской протоки является то, что ее правый берег сложен коренными породами, а левый – аллювиальными отложениями, образующими пологую песчаную равнину. Все это с двух сторон ограничивает развитие разветвлений и образование излучин. Лишь в верхней части протоки есть сложное одиночное разветвление, связанное с наличием здесь аккумулятивного о. Чай-Ары, сложенного грубообломочными осадками.

Развитию русловых процессов в дельте Лены, помимо механического воздействия водного потока и размыва отложений, способствует термоэрозионное и термоденудационное разрушение берегов, представляющих собой отложения ММП.

В ходе экспедиции в дельту Лены в августе 2022 г. проведено описание различных типов эрозионных берегов, сложенных ММП, деградация которых является основным источником наносов в дельте (рис. 5.7). В рамках полевых работ установлено, что объемы поступающего материала существенны в центральной части дельты, где высота и масштаб разрушения берегов максимальны. Наблюдается уменьшение высоты берегов Туматских проток.

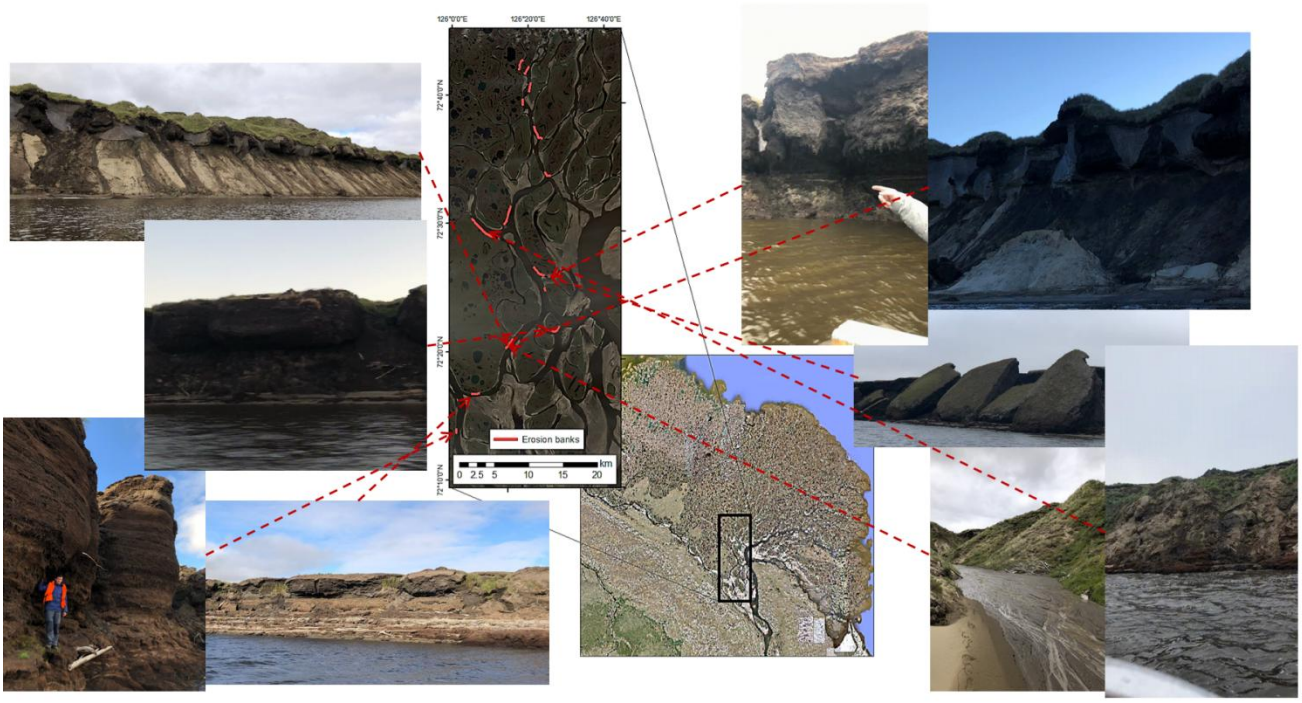


Рис. 5.7. Схема разрушаемых берегов, сложенных ММП, в центральной части дельты р. Лены в августе 2022 г.

По высоте разрушаемого уступа можно выделить два типа берегов: берега, образованные уступами третьей террасы, и берега, образованные первой надпойменной террасой и поймой голоценового возраста [Григорьев, 1993]. Уступы третьей террасы сложены

позднеплейстоценовыми высокольдистыми алевритистыми и оторфованными отложениями с включением мощных ледяных жил – Ледовым комплексом. Они подстилаются ранне-неоплейстоценовыми аллювиальными песками.

Ледовый комплекс представлен в Оленёкском и Трофимовском секторах. В Оленёкском секторе – это о. Курунгнах, где полигонально-жильные льды составляют верхнюю часть берегов (третья надпойменная терраса). Деградация их происходит под воздействием процессов термоденудации. Нижняя часть этих берегов также разрушается под воздействием механической энергии речного потока, вследствие чего большие объемы наносов поступают в русло (рис. 5.8-А).

Второй тип берегов, сложенных Ледовым комплексом, представлен в Трофимовской протоке на о. Собо-Сисё, где ММП приурочены к урезу. Для разрушения такого берега достаточно механического и термического воздействия речного потока. Интенсивность разрушения увеличивается с возрастанием и температуры воздуха, и потока солнечной радиации (рис. 5.8-Б).



(А) (Б)

Рис. 5.8. Ледовый комплекс А – на о. Курунгнах (фото автора), Б – на о. Собо-Сисё (фото Thomas Opel/Alfred-Wegener-Institut)

Отдельно выделяются термоэрозионные овраги на о. Курунгнах, где в процессе таяния ММП образуются ручьи, по которым происходит вынос вод с большим содержанием взвешенных и влекомых частиц, образующих конуса выноса. В рамках экспедиций 2022 и 2024 гг. проведено исследование влияния одного из этих ручьев на сток взвешенных наносов Оленёкской протоки (рис. 5.9).



Рис. 5.9. Термоэрозионный овраг на о. Курунгнах (фото автора)

Бóльшую часть дельты занимают высокие берега поймы и острова первой террасы, сформированные в раннем и среднем голоцене. Они сложены песками, перекрыты мощным слоем торфа, содержат жильные льды шириной до 2–2,5 м. Процессы разрушения этих берегов носят термоэрозионный характер, однако преобладание теплового воздействия потока и окружающей среды сменяется на преобладание механической силы потока, которая обусловливает интенсивность разрушения берегов. Разурешния таких берегов могут протекать в с образованием ниш (рис. 5.10-А) и без образования ниш (рис. 5.10-Б) или в форме блокового обрушения (рис. 5.10-В).



(А) (Б) (В)

Рис. 5.10. Термоэрозионный берег о. Самойловский (А), центральная часть дельты в Туматской протоке (Б и В) (фото автора)

Процессам разрушения подвержены низкие (менее 5 м) пойменные берега, сформированные в позднем голоцене, сложенные песками, с маломощным торфом и малым содержанием льда. Такие острова располагаются в основном в нижнем течении рукавов дельты, а также фиксируются и в центральной части дельты. Для них характерен обычный эрозионный тип размыва.

Особо можно выделить коренные берега: для Оленёкской протоки это левый берег, представленный склонами кряжа Чекановского, а для Быковской – правый берег, сложенный выходами осадочных пород хребта Хараулахского. Такие участки устойчивы к развитию русловых деформаций, однако именно с этой части дельты формируется максимальный приток воды с ручьев, стекающих с хребтов. К коренным образованиям дельты относятся также останцы о. Столб и о. Америка-Хая.

В ходе дешифрирования спутниковых снимков установлено, что общая площадь разрушений, по результатам ручной оцифровки, за период с 1964 по 2024 г. (60 лет) на рассматриваемых участках составила 87,3 км^2, то есть в год в среднем разрушению подверглись ~1,46 км^2 площади островов аллювиально-морской террасы (рис. 5.11). С учетом длины разрушенных участков, которая составляет 2 138 км, средняя скорость разрушений в дельте Лены за исследуемый период – 0,68 м/год.

Максимальные величины суммарной площади, длины и скорости разрушения берегов установлены в секторе Трофимовской протоки, где в среднем за 60 лет переформированиям подверглось 49,6 км^2 площади островов, что составляет 57% суммарной площади разрушений за 1964–2024 гг. Наибольшие скорости отступания берега отмечены вдоль основного многоводного рукава Трофимовской протоки, а также в районе выхода отложений Ледового комплекса на о. Собо-Сисё (до 15 м/год), расположенного в Сардахской протоке. Средняя за 60 лет скорость разрушения берегов составляет 0,88 м/год. Не менее активно разрушаются берега русла Туматской протоки, где за 60 лет изменениям подверглось свыше 22,9 км^2 (или 26% суммарного значения для всех изучаемых участков). В этой части прослеживается тренд увеличения площадей разрушений при движении от верхней части рукавов к МКД, где активны термоабразионные процессы. Средняя интенсивность отступания составляет 0,55 м/год. Сравнение этих двух секторов показывает, что в целом, при равной длине эрозионных берегов, активнее разрушаются берега Трофимовской протоки, что связано с распространением здесь пологих и сегментных излучин и со скоростями течения за счет бóльшей водности.

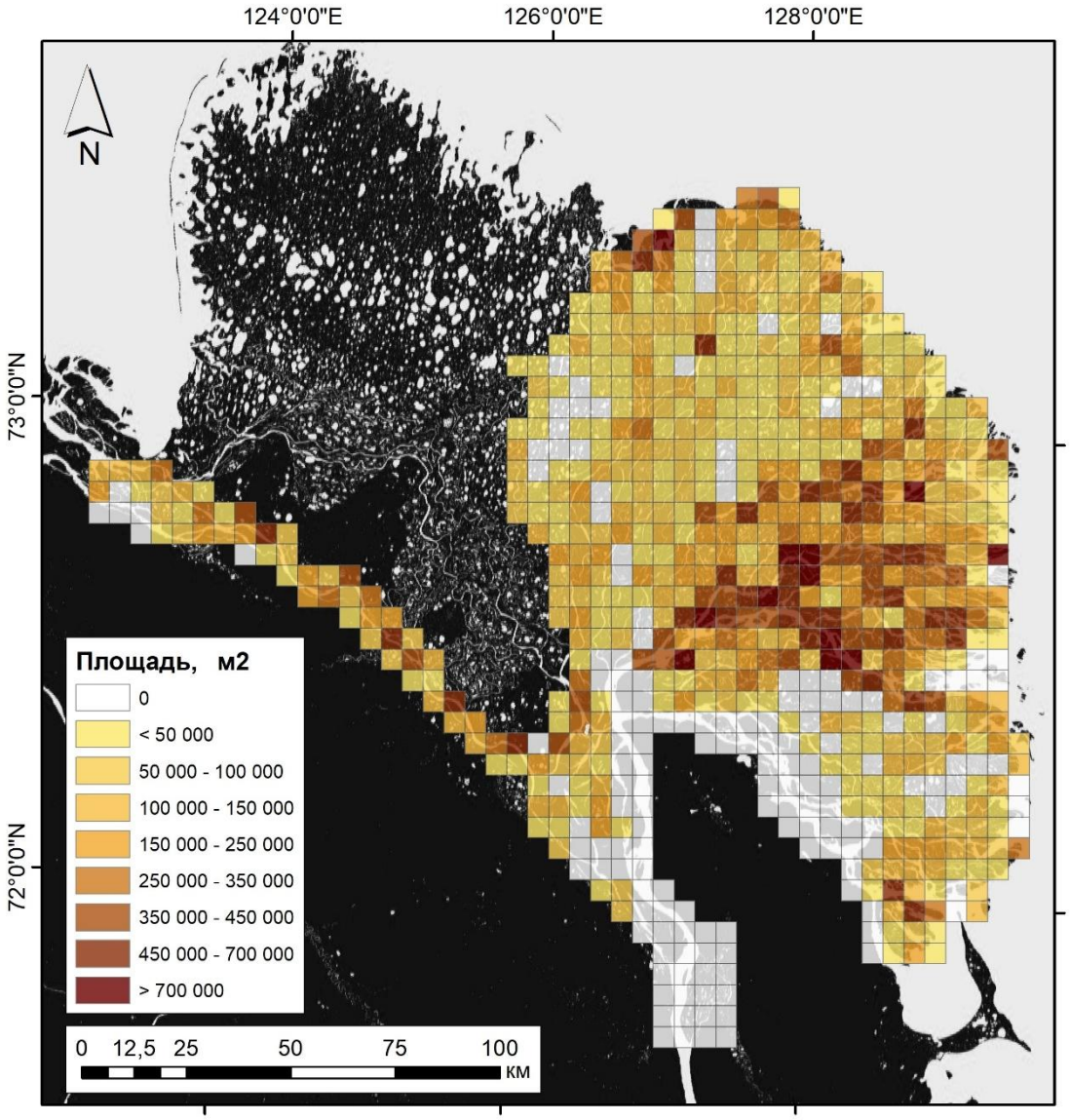


Рис. 5.11. Пространственное распределение суммы площадей разрушений в ячейках с 1964 по 2024 г.

Значительно меньше величина суммарной площади эрозионных берегов в Оленёкской протоке – 9,37 км^2 (или 10,7%), но с учетом общей длины русловой сети этой протоки пространственное распределение (отношение площади эрозионных берегов к общей длине русла) в среднем соответствует значениям, наблюдаемым в Трофимовской протоке. Активизация горизонтальных переформирований здесь приурочена к излучинам разветвленно-извилистого русла. Максимальные скорости отмечаются в вершинах излучин (преимущественно у левого берега) и достигают 5,3 м/год. Средняя скорость составляет 0,74 м/год.

Наименьшие значения площади разрушений установлены для сектора Быковской протоки – 4,14 км^2. Особенность Быковской протоки – полное отсутствие участков плановых переформирований вдоль основного рукава, что обусловлено геоморфологическим строением дельты: правый берег дельты представляет собой неразмываемый коренной берег Хараулахского хребта, а характерная черта левобережной части Быковской протоки – малые глубины, где

размывающая способность потока минимальна. Также Быковская протока имеет эстуарное расширение, которое продолжает заполняться наносами [Коротаев, 1984]. Участки активных разрушений расположены в нижнем течении на 30-км участке до впадения в залив Неелова и в районе островов, примыкающих к Трофимовскому сектору. Разрушение этих берегов, в первую очередь, связано с абразионным воздействием со стороны моря. Средняя скорость плановых переформирований в нижней части Быковской протоки составляет 0,63 м/год.

Относительно стабилен участок от вершины дельты (район о. Тит-Ары) до основного разветвления дельты у о. Столб. Здесь за 60-летний период разрушено ~0,91 км^2 со средней скоростью 0,2 м/год. Однако у левобережных аккумулятивных островов, приуроченных к Главному Руслу, средняя скорость разрушения за 60 лет может достигать и 2 м/год.

Количественная характеристика разрушений берегов за период с 1964 по 2024 г. представлена в таблице 5.5.

Таблица 5.5. Сравнительная характеристика эрозионных берегов за период с 1964 по 2024 г.

Сектор дельты	Площадь разрушений			Длина эрозионных участков, км	Скорость разрушения, м/год
	км^2	%	км^2/год		
Трофимовский	49,6	57,0	0,83	940	0,88
Быковский	4,14	4,76	0,07	110	0,63
Туматский	22,9	26,4	0,38	700	0,55
Оленёкский	9,37	10,8	0,16	210	0,74
Главное Русло	0,91	1,04	0,02	70	0,22
Сумма по дельте	87,0	100	1,45	2030	0,68*

*Для скорости в м/год указаны средние значения по секторам дельты.

Также по результатам обучаемой классификации спутниковых снимков получены характеристики горизонтальных деформаций для периода с 2000 по 2024 г. Общая площадь разрушений за 24 года в изученных протоках и рукавах дельты составила 48,8 км^2, то есть в год на рассматриваемом участке дельты Лены в среднем переформированиям подвержено ~2,03 км^2 площади островов (рис. 5.12). С учетом длины разрушенных участков, которая составляет 1 364 км, средняя скорость разрушений берегов в дельте Лены за исследуемый период составила 1,49 м/год.

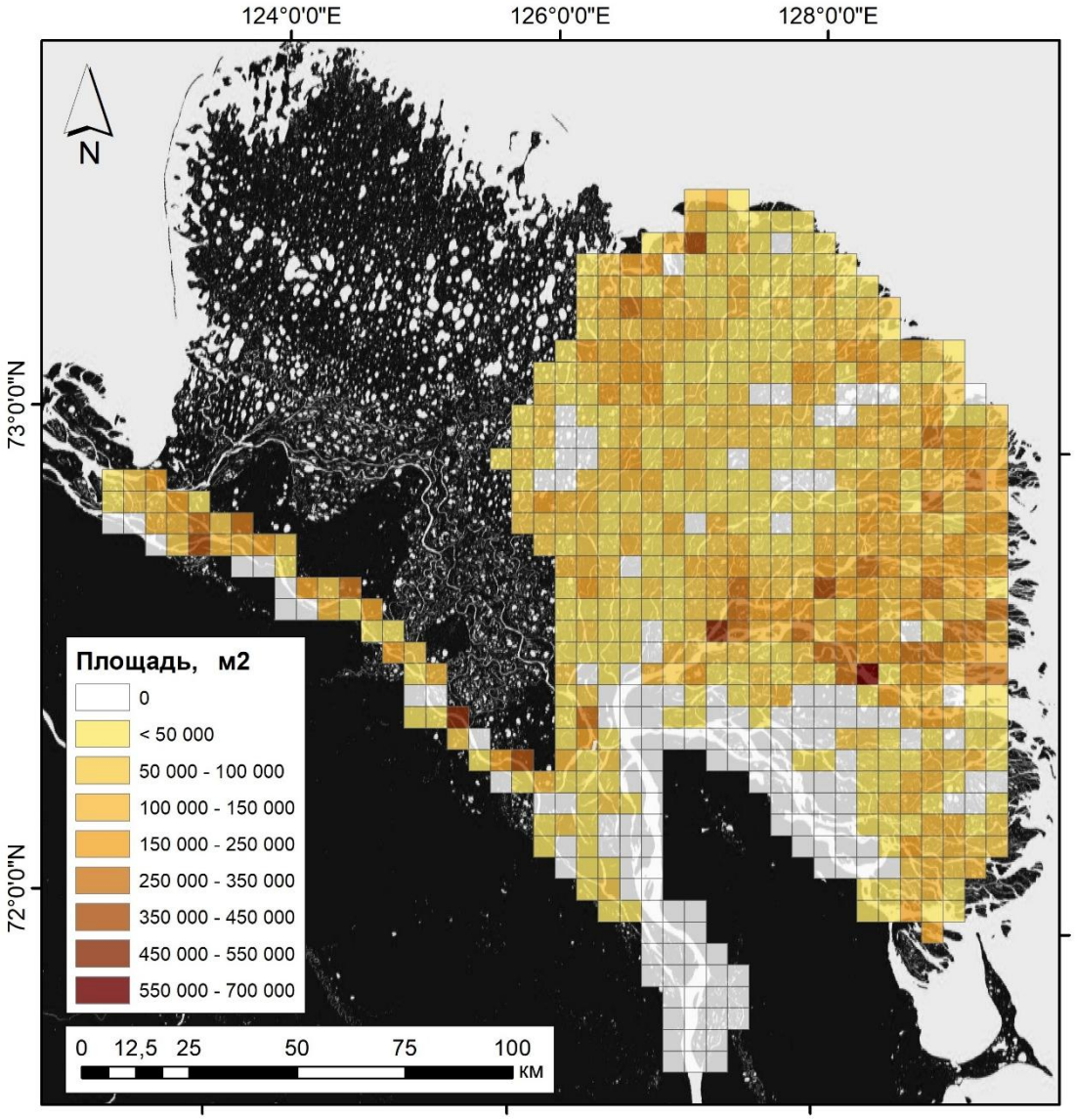


Рис. 5.12. Пространственное распределение суммы площадей разрушений в ячейках с 2000 по 2024 г.

Наибольшие значения береговых разрушений характерны также для сектора Трофимовской протоки, где переформированиям было подвержено 22,5 км^2 островов, что составляет ~46% общей площади разрушенных участков с 2000 по 2024 г. При общей длине разрушений в 597 км средняя скорость смещения береговой линии составляет 1,57 м/год.

Максимальные средние скорости горизонтальных деформаций характерны для протяженной Оленёкской протоки – 1,70 м/год. Однако из-за меньшей площади этого сектора дельты и меньшей длины (137 км) эрозионных участков за 24 года разрушилось в среднем 5,62 км^2 (11,5%), средняя скорость составляет 0,23 км^2/год.

Не менее активным является крупнейший по площади сектор Туматских проток, где за те же годы разрушению подверглось 16,8 км^2 островов. Суммарная длина разрушенных участков составила 498 км, что соответствует средней скорости 1,41 м/год. Сопоставим по скорости

отступания берегов и центральный участок дельты, где скорость в среднем составляет 1,46 м/год – при площади разрушений 0,47 км^2 (1%) и длине измененной береговой линии 13 км.

Количественная характеристика разрушений берегов за период с 2000 по 2024 г. представлена в таблице 5.6.

Таблица 5.6. Сравнительная характеристика эрозионных участков за период с 2000 по 2024 г.

Сектор дельты	Площадь разрушений			Длина эрозионных берегов, км	Скорость разрушения, м/год
	км^2	%	км^2/год		
Трофимовский	22,5	46,2	0,94	597	1,57
Быковский	3,31	6,8	0,14	116	1,18
Туматский	16,8	34,5	0,70	499	1,41
Оленёкский	5,62	11,5	0,23	137	1,70
Главное Русло	0,47	1,0	0,02	13	1,46
Сумма по дельте	48,8	100	2,03	1 362	1,49*

*Для скорости в м/год указаны средние значения по секторам дельты.

При сравнении двух периодов 1964–2000 гг. и 2000–2024 гг. по данным ручной оцифровки на 49 равномерно распределенных по секторам ключевых участках установлено, что темпы переформирований увеличились с 1,56 до 2,57 м/год, то есть увеличение составило 66%. Так же увеличились и максимальные скорости горизонтальных деформаций в среднем по дельте – с 3,02 до 4,78 м/год (таблица 5.7).

Таблица 5.7. Сравнение характеристик плановых переформирований за 1964–2000 (1) и 2000–2024 гг. (2)

Участки (количество)	Пери-од	Площадь разруше-ний, км^2	Длина эрозион-ных берегов, км	Средняя скорость, м/год	Изменение средней скорости за периоды 1 и 2, %	Средняя макси-мальная скорость, м/год	Изменение средней максимальной скорости за периоды 1 и 2, %
Среднее по дельте	1	7,99	144	1,55	+66	3,02	+59
	2	9,81	168	2,57		4,78	
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	

Значительнее всего скорости разрушений увеличились в нижней части Быковской протоки: средние с 0,99 до 1,71 м/год, а максимальные почти в два раза – с 1,68 до 3,22 м/год.

Заметные изменения произошли и на участках берегов Туматской протоки, где средняя скорость возросла почти в два раза – с 0,96 до 1,87 м/год. Аналогичная тенденция свойственна и максимальным скоростям: наблюдается увеличение с 1,83 до 3,34 м/год.

Интенсивность увеличения скоростей характерна для крупнейшего рукава дельты – Трофимовской протоки. В этой части темпы изменились с 1,83 до 3,03 м/год. Увеличились также и максимальные скорости с 4,21 до 6,58 м/год. Исключением являются уступы обнажения Ледового комплекса о. Собо-Сисё, расположенного в одном из рукавов Трофимовского сектора – Сардахской протоке (рис. 5.13), где скорости плановых переформирований остаются высокими на протяжении двух исследуемых периодов: 1964–2000 гг. – 9,25 м/год, 2000–2024 гг. – 13,8 м/год.

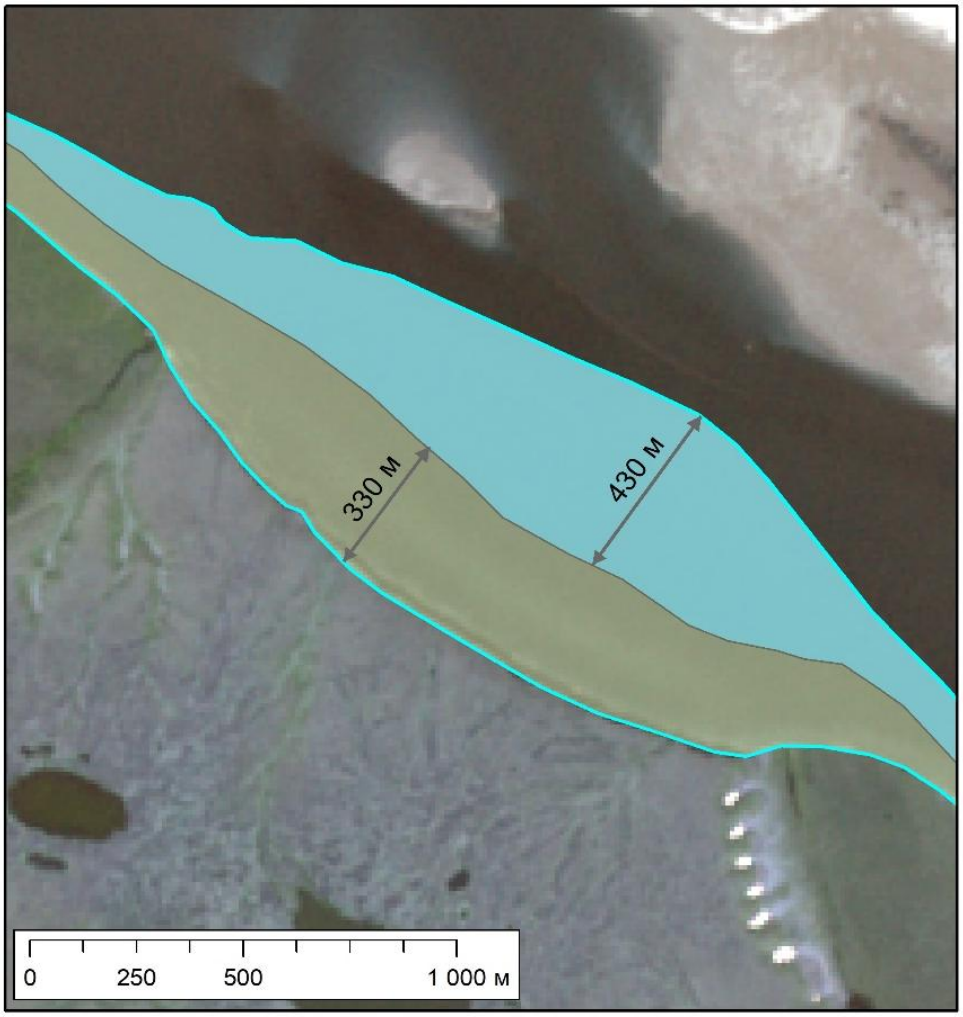


Рис. 5.13. Темпы разрушений берега о. Собо-Сисё за два периода: 1964–2000 (голубая область) и 2000–2024 гг. (темно-зеленая область)

Выявленное ускорение темпов горизонтальных переформирований в период с 2000 по 2024 г. по сравнению с периодом 1964–2000 гг. ставит вопрос о причине роста интенсивности разрушения берегов. Одна из возможных гипотез – наблюдаемые изменения определяются

естественными закономерностями формирования и развития дельты: острова аллювиально-морской террасы разного возраста могут находиться на различных стадиях эволюции и характеризоваться различной интенсивностью переформирований в зависимости от возраста слагающих их отложений. Для проверки этой гипотезы участки разрушений были сопоставлены с геоморфологической картой дельты [Большиянов и др., 2013] (рис. 5.14), в пределах каждого геоморфологического выдела рассчитаны средние скорости отступания берегов (таблица 5.8).

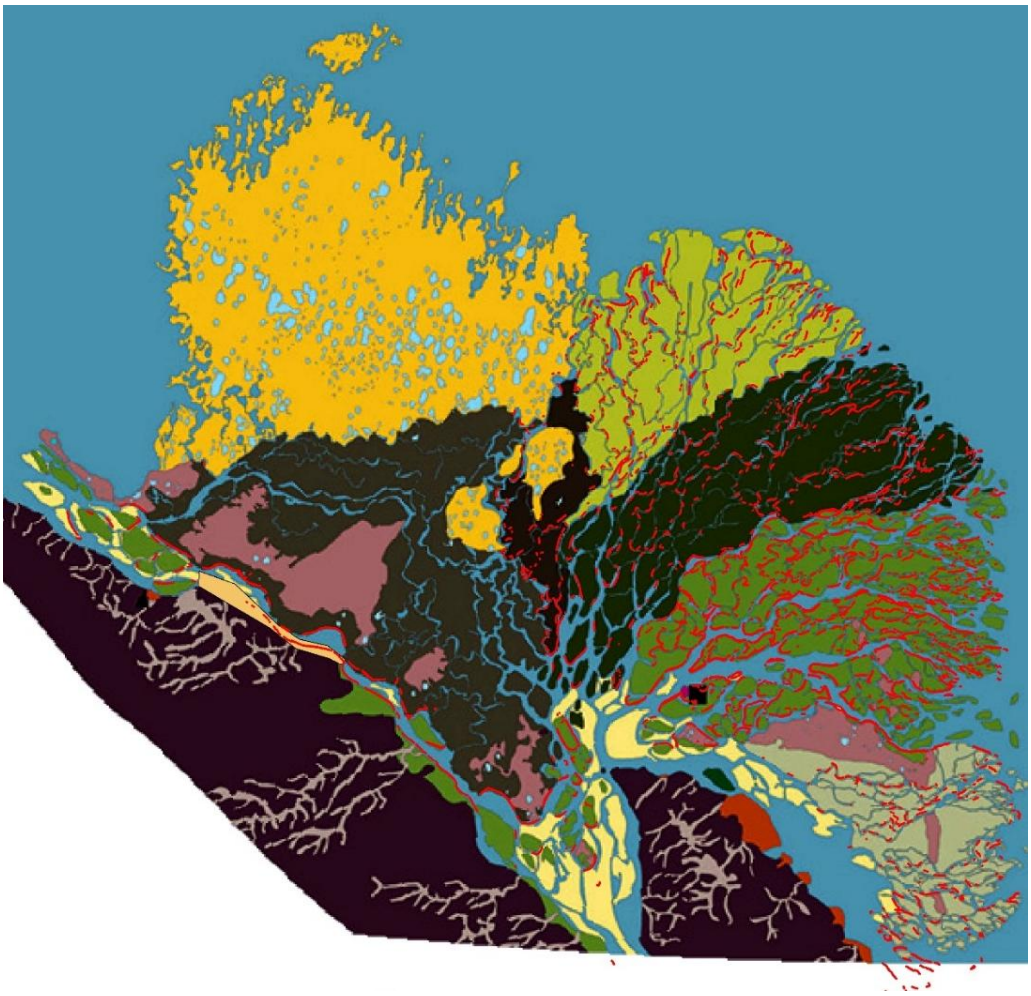


Рис. 5.14. Совмещенная геоморфологическая карта и схема участков плановых переформирований за 1964–2024 гг.

Однако ожидаемой закономерности не выявлено: скорости отступания берегов не связаны ни с возрастом отложений, ни с их геоморфологической принадлежностью. Острова аллювиально-морской террасы возрастом 8000 лет характеризуются наименьшими скоростями (0,39 м/год), тогда как острова возрастом 6000–4000 лет – наибольшими среди аллювиальных форм (1,04 м/год). Острова возрастом 2500–3000 лет занимают промежуточное положение (0,82 м/год), а более молодые образования (1500–500 лет) демонстрируют промежуточные и не упорядоченные по возрасту значения (0,56–0,65 м/год). Таким образом, гипотеза о связи

интенсивности переформирований с возрастом островных форм не подтвердилась: возраст отложений не является определяющим фактором современной динамики берегов.

Таблица 5.8. Средние скорости отступания берегов за 1964–2024 гг. в пределах различных геоморфологических выделов и секторов дельты в порядке увеличения

Геоморфологические выделы	Сектора дельты	Скорость отступания, м/год
Аллювиально-морская терраса возрастом 8000 лет	Западная часть Туматской протоки	0,39
Структурно денудационный рельеф низкогорий, сложенных породами дочетвертичного возраста	Оленёкская (левый берег)	0,42
Аллювиально-морская терраса возрастом 3000 лет	Туматская (центральная и СВ часть)	0,50
Аллювиально-морская терраса возрастом 1500–800 лет	Быковская	0,56
Аллювиально-морская терраса возрастом 1200–500 лет	Туматская (северная часть)	0,65
Аллювиально-морская терраса возрастом 2500–3000 лет	Трофимовская	0,82
Аллювиально-морская терраса возрастом 6000–4000 лет	Оленёкская (правый берег) и Арынская	1,04
Термоденудационная, останцовая поверхность высотой до 50 м, сложенная породами Ледового комплекса	Трофимовская и Сардахская	1,18

Наиболее высокие скорости отступания зафиксированы на участках, сложенных породами Ледового комплекса (1,18 м/год в среднем, до 13,8 м/год на о. Собо-Сисё), что указывает на определяющую роль льдистости пород, а не их возраста. Это согласуется с классическими представлениями о механизме термоэрозионного разрушения берегов в криолитозоне [Григорьев, 1993]: таяние льдистых включений под воздействием теплового потока от речной воды и воздуха приводит к потере несущей способности пород и блоковому обрушению берегов [Суходровский, 1979], интенсивность которого определяется не возрастом отложений, а их криогенным строением и тепловым балансом на границе «отложения–вода–атмосфера».

Следовательно, выявленное ускорение темпов береговых переформирований в период 2000–2024 гг. по сравнению с 1964–2000 гг. наиболее вероятно связано с деградацией многолетней мерзлоты под влиянием роста температуры воздуха – тенденции, устойчиво проявляющейся в арктическом регионе на протяжении последних десятилетий (подробный анализ приведен в главе 1). Повышение среднегодовой и летней температуры воздуха увеличивает глубину сезонного протаивания, ускоряет теплообмен между речной водой и берегом, а также удлиняется безледный период, в течение которого совместные процессы механического воздействия потока и термического разрушения приводят к интенсификации

горизонтальных русловых переформирований. Именно этот механизм объясняет, почему наиболее значительная активизация зафиксирована в Трофимовской протоке – крупнейшем по водности рукаве дельты, где высокая транспортирующая способность потока создает наиболее благоприятные условия для совместного воздействия механической и термической эрозии. Это, в свою очередь, обусловливает статистически значимый положительный тренд стока взвешенных наносов, установленный для Трофимовской протоки в разделе 4.1 (ρ = +0,464, p-уровень значимости 0,034): усиление береговых переформирований непосредственно увеличивает поступление взвешенного материала в поток и, как следствие, приток взвешенных наносов в море Лаптевых.

Установленная связь между деградацией ММП и интенсификацией береговых переформирований находит прямое пространственное подтверждение при сопоставлении карт пространственного распределения концентрации взвешенных наносов с участками плановых деформаций. Анализ возможного влияния русловых переформирований на сток взвешенных наносов проводился на основе составления карт распределения концентрации взвешенных наносов и дешифрирования плановых деформаций. Масштаб определения скорости переформирования соответствует разрешению снимков. Полученные площадные данные разрушений осреднялись для ячеек регулярной сетки 5 км на 5 км, размер этой сетки обусловлен большой площадью дельты Лены (анализируемый участок составляет ~28 тыс. км^2). Далее в каждой ячейке сетки проводился расчет среднего значения концентрации взвешенных наносов (мг/л) и суммарной площади береговых разрушений (км^2).

Результаты дешифрирования снимка Landsat 8 от 27 августа 2020 г. (Q = 32 600 м^3/с) показывают, что участки увеличения концентрации взвешенных наносов (*SSC*) вдоль Трофимовской протоки совпадают с зонами наибольших береговых разрушений (рис. 5.15): если в истоке протоки концентрация составляла 15–20 мг/л, то в средней части она возрастала до 35 мг/л, с максимумами до 50 мг/л на отдельных участках.

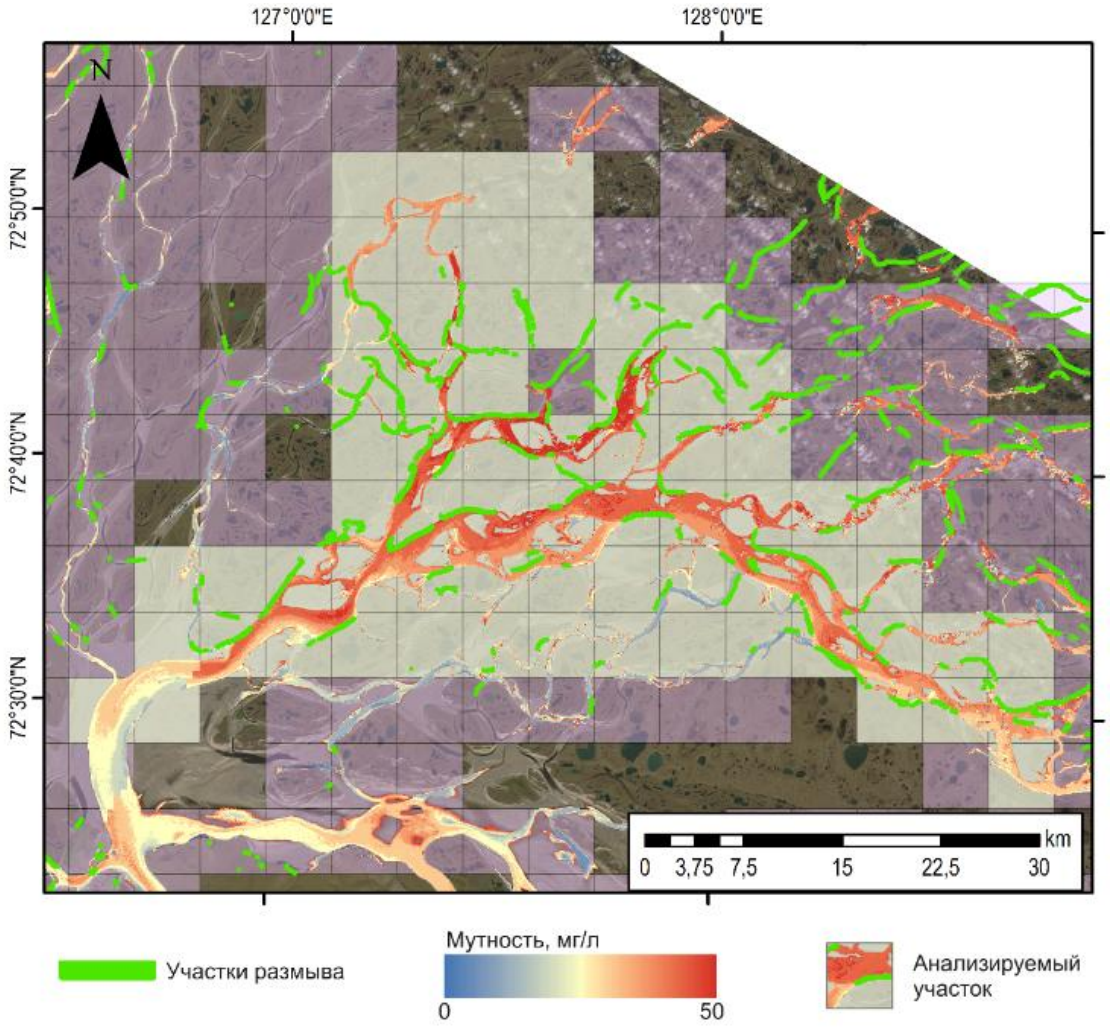


Рис. 5.15. Карта пространственной изменчивости концентрации взвешенных наносов (*SSC*) и участков плановых переформирований вдоль Трофимовской протоки

Выявленная тенденция описывается уравнением логарифмической регрессии (n = 62 ячейки):

$$SSC = 2{,}14 * \ln(S_{\text{разрушений}}) + 36{,}2 \quad (30)$$

Коэффициент корреляции Пирсона, рассчитанный для логарифмически преобразованной переменной площади разрушений, составляет r = 0,49, коэффициент детерминации R^2= 0,24. Статистическая значимость уравнения регрессии подтверждена критерием Фишера (F = 18,9 при p-уровне значимости < 0,001), что свидетельствует о достоверности выявленной связи (рис. 5.16). Умеренное значение R^2 закономерно отражает многофакторность процесса транспорта взвешенных наносов: плановые переформирования являются одним из источников взвешенного материала, однако одновременно на концентрацию взвешенных наносов влияют расход воды, температурный режим, ветровые условия и другие факторы, рассмотренные в разделе 5.1. Тем не менее статистически значимая связь подтверждает, что пространственное распределение зон активных разрушений берегов является одним из ключевых факторов, определяющих продольное увеличение концентрации взвешенных наносов в Трофимовской протоке.

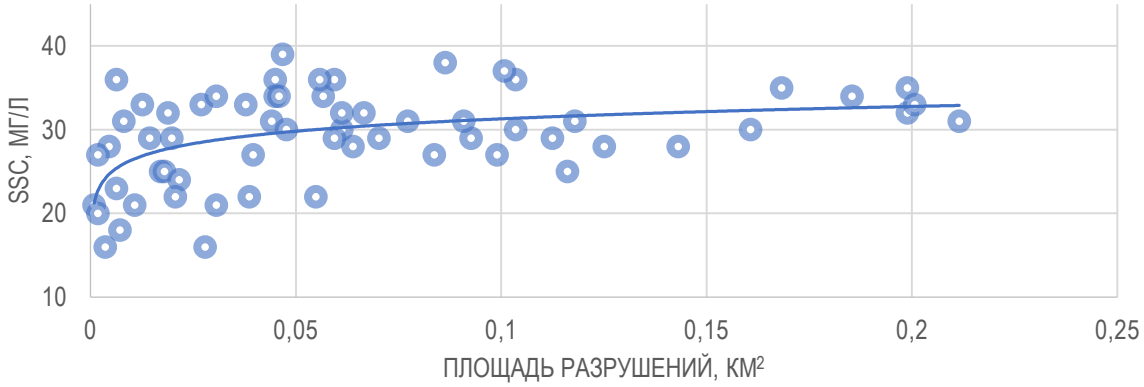


Рис. 5.16. Изменения концентрации взвешенных наносов с увеличением площади береговых разрушений вдоль Трофимовской протоки по результатам дешифрирования снимка от 27.08.2020

Дополнительно изучен вклад термоэрозионных водотоков на примере одного из ручьев, стекающего с правобережного склона о. Курунгнах в Оленёкскую протоку напротив о. Сасыл-Ары. Измерения в ходе экспедиций 2022 и 2024 гг. показали значительную межгодовую изменчивость концентрации взвешенных наносов: в 2022 г. концентрация составила 111 г/л, в 2024 г. – 8,51 г/л, что в обоих случаях соответствует гиперконцентрированным потокам. Вынос взвеси в Оленёкскую протоку варьировал от 650 до 6800 кг/сут. При расходе взвешенных наносов в самой протоке 671–2263 т/сут поступление с одного ручья, чей водный сток составляет сотые доли процента от расхода Оленёкской протоки, увеличивает расход взвешенных наносов лишь на 0,1–0,3%. Аналогичные водотоки фиксировались в дельте Лены и ранее [Тасаков, 1965], однако их распространение ограничено островами третьей террасы, сложенными отложениями Ледового комплекса. Таким образом, вклад внутридельтовой бассейновой составляющей в продольное изменение стока взвешенных наносов незначителен и не определяет наблюдаемые масштабы трансформации.

На основе методики, изложенной в главе 2 (формула 11), рассчитана масса взвешенных наносов, поступающих в русловую сеть дельты в результате горизонтальных береговых деформаций (таблица 5.9). Расчет выполнен для двух периодов – 1964–2024 гг. и 2000–2024 гг. – как для всей дельты в целом, так и для участков, расположенных выше створов расчета концентрации взвешенных наносов согласно рис. 2.11 (т. е. непосредственно влияющих на рассчитанную трансформацию стока взвешенных наносов – см. раздел 4.2).

Таблица 5.9. Масса наносов (млн т в год), поступающая в результате разрушения береговых отложений

Часть дельты	Периоды, годы	
	1964–2024	2000–2024
Вся дельта	3,38	2,81
До участков расчета ΔSSC	3,18	1,42

Полученные значения сопоставлены с количественной оценкой внутридельтового увеличения стока взвешенных наносов, установленной в разделе 4.2: дополнительная нагрузка взвешенными наносами в пределах дельты, не фиксируемая замыкающим створом г/п Кюсюр, составляет 0,5–2,0 млн т в год.

За период 2000–2024 г. расчетная масса наносов от береговых разрушений выше участков расчета составляет 1,42 млн т в год, что находится в пределах диапазона наблюдаемого внутридельтового прироста (0,5–2,0 млн т в год). Это свидетельствует о том, что береговые переформирования теоретически способны обеспечить весь выявленный прирост взвешенных наносов. Вместе с тем необходимо учитывать, что не весь разрушенный береговой материал сразу же переходит во взвешенную форму: часть его временно аккумулируется у подножия уступа, часть транспортируется в виде влекомых наносов, часть откладывается в протоках до достижения участков расчета.

Важно отметить существенное различие между двумя периодами. Расчетная масса наносов до участков расчета концентрации взвешенных наносов за период 1964–2024 гг. составляет 3,18 млн т в год, что вдвое больше, чем за 2000–2024 гг. (1,42 млн т в год). Оценка для периода 1964–2024 гг. получена путем ручной оцифровки по снимкам с разрешением ~1 м, при которой граница островов аллювиально-морской террасы прослеживается как непрерывная линия, точно совпадающая с видимым контуром бровки берега. При автоматической обучаемой классификации снимков Landsat (разрешение 30 на 30 м) и Sentinel-2 (10 на 10 м) береговая граница формируется не как линия, а как ступенчатый контур, проходящий по краям пикселей: каждый пиксель либо целиком относится к классу «берег», либо целиком – к классу «вода», независимо от того, где именно внутри пикселя проходит реальная граница. В результате площадь разрушений может систематически занижаться. Таким образом, несмотря на ускорение темпов переформирований за 2000–2024 гг., расчетная масса поступающих наносов для этого периода занижена, и реальный вклад береговых деформаций в сток взвешенных наносов может превышать оценку в 1,42 млн т в год.

Полученные результаты в совокупности подтверждают, что разрушение берегов, сложенных ММП, является основным механизмом формирования внутридельтовой трансформации стока взвешенных наносов. Относительный вклад русловой составляющей в суммарный сток взвешенных наносов дельты (15,7–19,0 млн т в год) составляет от 3 до 13% в зависимости от принятых оценок прироста (0,5–2,0 млн т в год).

Таким образом, русловые переформирования выступают значимым, хотя и не единственным фактором трансформации стока взвешенных наносов в дельте Лены. Горизонтальные деформации берегов, скорость которых увеличилась на 66% за последние 24 года вследствие деградации ММП, обеспечивают дополнительный приток взвешенного материала в

русловую сеть – прежде всего в Трофимовской протоке, где совместное действие высокой транспортирующей способности потока и активного термоэрозионного разрушения берегов создает наиболее благоприятные условия для увеличения концентрации взвешенных наносов. Вклад термоэрозионных водотоков с островов количественно невелик и ограничен участками распространения Ледового комплекса. В совокупности эти процессы формируют тот дополнительный прирост взвешенных наносов в пределах дельты – 0,5–2,0 млн т в год, который не фиксируется данными замыкающего створа г/п Кюсюр.

Выводы к главе 5

1. Установлено, что трансформация стока взвешенных наносов в дельте Лены определяется различными факторами в зависимости от фазы водного режима и рукава. В периоды повышенной водности (Q > 37 500 м³/с) определяющую роль играют расход воды (r до 0,58 для Туматской и Оленёкской) и солнечная радиация (r до 0,47 для Быковской). В меженный период (Q < 37 500 м³/с) роль водности резко снижается: в Туматской протоке доминирует скорость ветра (r до 0,76), в Оленёкской – температура ММП (r до 0,64) и суточные осадки (r = 0,77). Аккумулятивный режим статистически не связан с краткосрочными метеорологическими факторами и определяется морфологическими характеристиками рукавов. Трофимовская протока выделяется отсутствием значимых корреляций с большинством факторов при любых условиях водности, что свидетельствует об определяющей роли русловых переформирований в формировании режима трансформации взвешенных наносов в крупнейшем рукаве дельты.

2. По результатам ручной оцифровки снимков за 1964–2024 гг. общая площадь разрушений берегов аллювиально-морской террасы составила 87,3 км^2 при средней скорости 0,68 м/год; 57% разрушений сосредоточено в Трофимовском секторе. По данным обучаемой классификации за 2000–2024 гг., общая площадь разрушений составила 48,8 км^2 при средней скорости 1,49 м/год. Сравнение периодов 1964–2000 и 2000–2024 гг. на 49 ключевых участках показало ускорение темпов переформирований на 66% (с 1,56 до 2,57 м/год). Гипотеза о связи интенсивности разрушений с возрастом аллювиально-морских отложений не подтвердилась: определяющим фактором является льдистость пород, а не их возраст. Максимальные скорости зафиксированы на участках Ледового комплекса (в среднем 1,18 м/год, до 13,8 м/год на о. Собо-Сисё).

3. Выявленное ускорение береговых переформирований наиболее вероятно обусловлено деградацией ММП под влиянием роста температуры воздуха, увеличивающего глубину сезонного протаивания и удлиняющего безледный период. Пространственное совпадение зон активных разрушений с участками повышенной концентрации взвешенных наносов

подтверждено для Трофимовской протоки. Полученная связь описывается логарифмической регрессией $SSC = 2{,}14 \cdot \ln(S) + 36{,}2$ ($r = 0{,}49$, $R^2 = 0{,}24$, $F = 18{,}9$, $p < 0{,}001$, $n = 62$). Именно ускорение береговых переформирований в Трофимовской протоке непосредственно обусловливает статистически значимый нарастающий тренд ΔSSC ($\rho = +0{,}464$, $p = 0{,}034$), установленный в главе 4.

4. Расчетная масса наносов, поступающих от разрушения берегов выше балансовых створов, составляет 1,42 млн т в год за 2000–2024 гг., что соответствует диапазону внутридельтового прироста стока взвешенных наносов (0,5–2,0 млн т в год), установленного в главе 4. Вклад термоэрозионных водотоков с островов Ледового комплекса количественно невелик. Установлено, что 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 внутридельтовой трансформации стока взвешенных наносов; относительный вклад этой составляющей в суммарный годовой сток (15,7–19,0 млн т в год) составляет от 3 до 13%.

Заключение

В диссертационной работе на основе комплексного применения дистанционных методов, граф-теоретического подхода и экспедиционных данных впервые проведено комплексное исследование распределения стока воды и взвешенных наносов, а также интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов в дельте Лены – крупнейшей арктической дельте России площадью ~30 тыс. км², включающей около 2000 рукавов и проток общей длиной более 10 600 км. Актуальность исследования определяется тем, что дельта Лены расположена в одной из наиболее быстро меняющихся климатических «горячих точек» планеты: с 1979 г. температура воздуха в районе дельты повышалась со скоростью +0,9 °C/10 лет, а с 2000 г. – +1,62 °C/10 лет, что почти в четыре раза превышает глобальные темпы потепления. На этом фоне температура многолетнемерзлых пород на о. Самойловский увеличилась за 2007–2020 гг. в среднем по глубине на 3,25 °C. Все существующие оценки годового стока взвешенных наносов р. Лены в море Лаптевых (в диапазоне 11,7–27,4 млн т в год) основаны на данных замыкающего створа г/п Кюсюр, расположенного более чем в 200 км выше вершины дельты, и не учитывают его трансформацию, происходящую непосредственно в дельте.

Настоящая работа впервые восполняет этот пробел, и в ходе выполнения получены следующие выводы.

1. Разработан и верифицирован комплекс спутниковых методов для изучения гидрологических процессов и русловых переформирований в труднодоступных арктических дельтах. Граф-теоретический подход RivGraph, адаптированный для условий дельты Лены на основе свыше 311 натурных измерений расходов воды за период с 1981 по 2024 г., впервые позволил рассчитать расходы воды в каждой из более чем 2000 проток дельты вплоть до морского края. Разработано узловое соотношение, согласно которому расход воды пропорционален ширине русла в степени 1,7 в соответствии с натурными данными (R^2 = 0,96, NSE = 0,95, MAPE = 25,8%). Разработаны региональные спутниковые модели концентрации взвешенных наносов (*SSC*) для Sentinel-2 и Landsat 8-9 на основе зависимости *SSC* от коэффициента отражения в красном канале, верифицированные по данным экспедиции 2024 г. (Landsat: MAPE = 34,5%, PBIAS = +10,8%). Проведена разработка спутникового алгоритма и его адаптация в облачной платформе Google Earth Engine. Разработана методика количественной оценки плановых русловых переформирований за 60-летний период (1964–2024 гг.), сочетающая ручную оцифровку по снимкам KeyHole и Sentinel-2 с полуавтоматической классификацией снимков Landsat и Sentinel-2.

2. Впервые получена полная морфометрическая характеристика русловой сети дельты Лены для двух гидрологических фаз. На спаде половодья (площадь водной поверхности составляет 7140 км², 1571 рукав) и при переходе к межени (4300 км², 2045 рукавов) густота сети

возрастает в 2,2 раза при незначительном снижении связности (–3,4%): ключевая трансформация происходит в магистральных рукавах, тогда как многочисленные малые протоки теряют гидравлическую связь с основным руслом. 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. Установлены закономерности пространственного и сезонного распределения стока воды. 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 в условиях сложной сезонной изменчивости водности и ледовых явлений.

4. Охарактеризована многолетняя (2000–2024 гг.) трансформация стока взвешенных наносов в главных рукавах дельты по данным 130 снимков Landsat и 150 снимков Sentinel. Сток взвешенных наносов в четырех крупнейших рукавах дельты принципиально различается по режиму трансформации: Трофимовская является рукавом устойчивого продольного увеличения концентрации взвешенных наносов (59–72% случаев, статистически значимый нарастающий тренд), Быковская – наиболее стабильный транзитно-аккумулятивный рукав. Изменение концентрации взвешенных наносов по дельте с учетом распределения стока по рукавам в целом составляет +9,0% (диапазон от +3,2 до +13,5%). Годовой сток взвешенных наносов в вершине дельты оценивается в 15,7 млн т в год; с учетом трансформации внутри дельты реальный приток в море Лаптевых составляет 17,0 млн т в год (диапазон от 16,1 до 17,7 млн т в год), на 0,5–2,0 млн т в год больше, чем фиксируется на г/п Кюсюр. Таким образом, все существующие оценки стока взвешенных наносов в море Лаптевых систематически занижены, поскольку не учитывают внутридельтовую трансформацию. Распределение стока наносов по рукавам близко к распределению стока воды: Трофимовская – 60,7%, Быковская – 24,7%, Туматская и Оленёкская – по ~7%.

5. Описаны механизмы и факторы трансформации стока взвешенных наносов, принципиально отличающиеся от закономерностей, установленных для дельт умеренного пояса.

При высоких расходах воды (Q > 37 500 м³/с) во всех рукавах фиксируется продольный рост концентрации взвешенных наносов, обусловленный высокой транспортирующей способностью потока и активизацией разрушения берегов (положительная зависимость ΔSSC от Q). В меженный период на первый план выходят метеорологические факторы, причем их вклад существенно различается по рукавам: в Оленёкской протоке ведущую роль играют осадки и температура ММП (r до 0,77 и 0,57), в Туматской – скорость ветра (r до 0,76). В Трофимовской протоке режим трансформации определяется русловыми переформированиями. Установлено принципиальное отличие арктических дельт (Лена, Колыма) от дельт других регионов (Селенга, Верхняя Ангара): в первых высокие расходы усиливают термическое разрушение берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами, тогда как во вторых доминирует пойменная аккумуляция.

6. Количественно оценены плановые переформирования дельты и их вклад в сток взвешенных наносов. Общая площадь разрушений берегов аллювиально-морской террасы за 60 лет (1964–2024 гг.) составила 87,3 км² при средней скорости 0,68 м/год; в период 2000–2024 гг. средняя скорость возросла до 1,49 м/год, а на ключевых участках – до 2,57 м/год, то есть темпы горизонтальных переформирований увеличились на 66%. Максимальная активность отмечена в Трофимовском секторе (57% суммарной площади). Установлено, что интенсивность переформирований определяется не возрастом отложений и этапом развития дельты, а льдистостью: максимальные скорости (до 13,8 м/год) зафиксированы на островах, представленных отложениями Ледового комплекса. Выявленное ускорение плановых переформирований является прямым следствием деградации многолетнемерзлых пород в условиях изменяющегося климата (тренды температуры многолетнемерзлых пород на о. Самойловский достигают 2,64 °С/10 лет) и причиной статистически значимого нарастающего тренда в трансформации стока взвешенных наносов в Трофимовской протоке. Масса взвешенных наносов, поступающая в русловую сеть в ходе разрушения берегов выше участков, где проводился расчет концентрации взвешенных наносов, оценивается в 1,42–3,18 млн т в год.

Полученные количественные оценки и разработанные методические подходы создают основу для мониторинга и прогнозирования развития арктических дельт в условиях продолжающихся климатических изменений, а также для корректной оценки потоков вещества в арктические моря.

Список литературы

1. Алабян А.М., Бабич Д.В., Богомолов А.Л., Заец Г.М., Коротаев В.Н., Михайлов В.Н., Сидорчук А.Ю., Чалов Р.С. Современные процессы дельтообразования и история развития дельты Енисея. — Деп. ВИНИТИ № 3013-В91. Москва, 1991. — 156 с.
2. Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Михайлов В.Н. Антропогенные и естественные изменения гидрологических ограничений для природопользования в дельтах рек Российской Арткики // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2015. — № 1. — С. 14–31.
3. Антонов В.С. Устьевая область реки Лены (гидрографический очерк). — М.: Гидрометеоиздат, 1967. — 107 с.
4. Атлас: морфодинамика устьевых систем крупных рек арктического побережья России / ред. Коротаев В.Н., Рычагов Г.И., Римский-Корсаков Н.А. — М.: АПР, 2017. — 148 с.
5. Атлас Сардахской протоки 1949 года: Лоция. Тиксинская гидрографическая база. — 1949.
6. Бабич Д.Б., Большиянов Д.Ю., Зайцев А.А., Магрицкий Д.В., Медкова О.Н., Михайлов В.Н., Чалов Р.С. Региональные особенности формирования эстуарно-дельтовых систем арктического побережья Сибири // Эстуарно-дельтовые системы России и Китая. — М.: ГЕОС, 2007. — С. 112–240.
7. Бабич Д.В., Богомолов А.Л., Заец Г.М., Коротаев В.Н., Лодина Р.В., Михайлов В.Н., Сидорчук А.Ю., Чалов Р.С. Современные процессы дельтообразования и этапы формирования дельты Енисея // Эрозия почв и русловые процессы. Изд-во Моск.ун-та. Москва. — 1983. — Т. 9. — С. 183–201.
8. Большиянов Д.Ю., Аксенов А.О., Макаров А.С., Лазарева Е.И., Правкин С.А., Черезова А.А., Григорьев М.Н. Геоморфологическое строение и новейшая тектоника дельты р. Лены // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2019. — Т. 65. — № 2. — С. 186–200. https://doi.org/https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-2-186-200.
9. Большиянов Д.Ю., Макаров А.С., Шнайдер В., Штоф Г. Происхождение и развитие дельты реки Лены. — СПб: ААНИИ, 2013. — 268 с.
10. Большиянов Д.Ю., Макеев В.М., Ёжикова И.С., Коблашов И.Д. Динамика толщины деятельного слоя грунта и температуры многолетнемёрзлых пород на архипелаге Северная Земля и в дельте реки Лены // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Материалы ежегодной конференции по результатам экспедиционных исследований. — 2024. — № 11. — С. 476–482. https://doi.org/10.24412/2687-1092-2024-11-476-482.
11. Водные пути бассейна Лены / Под ред. Р. С. Чалова и др. — М.: МИКИС, 1995. — 600 с.
12. Войнов Г.Н. Приливы в Обской губе (Карское море). II. Влияние ледяного покрова на характеристики приливов // Учен. зап. РГГМУ. — 2016. — № 45. — С. 43–63.
13. Вострякова Н.В., Подлипский Ю.И., Широков В.М. Изменение твердого стока сибирских рек в связи с возникновением крупных водохранилищ // Круговорот вещества и энергии в озерах и водохранилищах. Иркутск. — 1973. — № 1.
14. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: общее резюме / под ред. В.М. Катцова и С.М. Семенова. — Москва: Росгидромет, 2014. — 54 с.
15. Геоэкологическое состояние Арктического побережья России и безопасность природопользования / ред. Алексеевский Н.И. — М.: ГЕОС, 2007. — 584 с.
16. Григорьев М.Н. Криоморфогенез устьевой области р. Лены. — Якутск: Институт мерзлотоведения СО РАН, 1993. — 176 с.
17. Гуков А.Ю. Гидробиология устьевой области реки Лены. — М.: Научный мир, 2001. — 288 с.

18. Иванов В.А. Изучение движения взвешенных наносов больших рек с использованием современных измерительных методов. — Москва: дис. … магистр., 2022.

19. Иванов В.В. Сток и течения основных проток дельты р. Лены // Труды Арктического науч.-исслед. ин-та. Гидрология рек Советской Арктики. — 1963. — Т. 234. — № 5. — С. 76–86.

20. Иванов В.В. Гидрологический режим низовьев и устьев рек Западной Сибири и проблема оценки его изменений под влиянием территориального перераспределения водных ресурсов // Проблемы Арктики и Антарктики. — 1980. — № 55. — С. 20–43.

21. Иванов В.В., Гиляров Н.П. Экспериментальные исследования перераспределения стока в дельте Енисея // Труды ААНИИ. — 1972. — Т. 297.

22. Иванов В.В., Пискун А.А., Корабель Р.А. Распределение стока по основным рукавам дельты Лены // Тр. ААНИИ. — 1983. — С. 59–71.

23. Копелевич О.В., Салинг И.В., Вазюля С.В., Глуховец Д.И., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Каралли П.Г., Юшманова А.В. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998-2017 гг. — М.: ООО «ВАШ ФОРМАТ», 2018. — 140 с.

24. Коротаев В.Н. Формирование гидрографической сети Ленской дельты // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 1984. — № 6. — С. 39–44.

25. Коротаев В.Н. Геоморфология речных дельт. — Москва: Изд-во МГУ, 1991. — 224 с.

26. Коротаев В.Н., Михайлов В.Н., Бабич Д.Б., Богомолов А.Л., Заец Г.М. Гидролого-морфологические процессы в дельте р. Лены // Земельные и водные ресурсы. Противоэрозионная защита и регулирование русел. — Изд-во Моск. ун-та. Москва, 1990. — С. 120–144.

27. Кравцова В.И., Инюшин А.Н. Исследование современной динамики дельты Лены по космическим снимкам // Водные ресурсы. — 2019. — Т. 46. — № 6. — С. 567–574.

28. Кравцова В.И., Митькиных Н.С. Устья рек России. Атлас космических снимков. — Москва: Научный мир, 2013. — 122 с.

29. Крылова А.И., Антипова Е.А. Численное моделирование гидрологического режима в дельте реки Лены // Оптика атмосферы и океана. — 2018. — Т. 31. — № 6. — С. 463–467.

30. Кузин В.И., Лаптева Н.А. Моделирование стока для дельты реки Лена // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. — 2014. — Т. 4. — № 1. — С. 131–135.

31. Куликов М.Е. Приливные и непериодические колебания уровня в морях Российской Арктики по данным наблюдений и численного моделирования: специальность 1.6.17 – Океанология : диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. — М.: ИО РАН, 2023. — 171 с.

32. Лабутина И.А., Сафьянов Г.А. Исследования распространения твердого стока рек по аэрокосмическим снимкам на примере Кодора и Селенги // Космическая съемка и тематическое картографирование. М.: Изд-во МГУ. — 1980. — С. 118–225.

33. Лабутина И.А., Сафьянов Г.А., Шарлай Т.Г. Исследование распространения взвесей в море по многозональным снимкам // ДАН СССР. — 1976. — Т. 230. № 2. — С. 861–864.

34. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология, том 34, № 5. — 1994. — С. 735–747.

35. Лопатин Г.В., Федоров М.К. Физико-географический очерк дельты р. Лены. — Л.: АННИ, 1947. — 320 с.

36. Магрицкий Д.В. Изменение среднемноголетнего стока воды в низовьях и дельтах крупнейших рек Восточной Сибири // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2000. — Т. 5. — С. 38–43.

37. Магрицкий Д.В. Естественные и антропогенные изменения гидрологического режима низовьев и устьев крупнейших рек Восточной Сибири : специальность 25.00.27 «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. — 2001. — 25 с.

38. Магрицкий Д.В. Годовой сток взвешенных наносов в Арктические моря России и его антропогенные изменения // Вопросы географии Сибири. — 2009. — С. 90–94.

39. Магрицкий Д.В. Годовой сток взвешенных наносов российских рек водосбора Северного Ледовитого океана и его антропогенные изменения // Вест. МГУ. Сер. 5. География. — 2010. — Т. 6. — С. 17–24.

40. Магрицкий Д.В. Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты Нижней Лены и Вилюя // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2015. — № 6. — С. 85–95.

41. Магрицкий Д.В. Факторы и закономерности пространственной и многолетней изменчивости поступления речных наносов в моря Российской Арктики. // Вопросы географии. Сер. География полярных регионов. — 2016. — Т. 142. — С. 444–466.

42. Магрицкий Д.В. Изменения стока арктических рек России и информационное обеспечение исследований // Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы. — 2019. — Т. 532. — № 1. — С. 452–459.

43. Магрицкий Д.В., Айбулатов Д.Н., Горелкин А.В. Закономерности пространственно-временной изменчивости стока на предустьевом участке и в дельте р. Лены // Водные ресурсы. — 2018. — Т. 45. — № 1. — С. 15–29. https://doi.org/10.7868/S0321059618010133.

44. Магрицкий Д.В., Михайлов В.Н. Современное распределение стока воды и наносов в дельте р. Лены. — Чебоксары, 2006. — 149–151 с.

45. 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. https://doi.org/10.34753/HS.2022.4.1.68.

46. Магрицкий Д.В., Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Сазонов А.А., Ефимов В.А., Василенко А.Н. Современное гидрологическое состояние устья р. Колымы по материалам летней экспедиции в 2019 г. // Труды IV Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» имени Л.Н. Карлина. — 2020. — С. 243–247.

47. Магрицкий Д.В., Фролова Н.Л., Василенко А.Н. Приток речных вод в моря Российской Арктики: величина, многолетние и внутригодовые изменения // Метеорология и Гидрология. — 2025. — № 5. — С. 5–21. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2025-5-5-21.

48. Магрицкий Д.В., Чалов С.Р., Агафонова С.А., Кузнецов М.А., Банщикова Л.С. Гидрологический режим нижней Оби в современных гидроклиматических условиях и под влиянием крупномасштабной водохозяйственной деятельности // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. — 2019. — Т. 102. — № 1. — С. 106–115.

49. 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. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-171-190.

50. Макаров А.С. Колебания уровня моря Лаптевых как фактор формирования дельты р. Лена в голоцене: дис. канд. геогр. наук. — СПб: ААНИИ, 2009.

51. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. — М.: ГЕОС, 1997. — 412 с.

52. Михайлов В.Н., Горин С.Л. Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей – эстуариев // Водные ресурсы. — 2012. — Т. 39. — № 3. — С. 243–257.

53. Михайлов В.Н., Рогов М.М., Чистяков А.А. Речные дельты. Гидролого-морфологические процессы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — 280 с.

54. Пискун А.А. Методика расчета водного и руслового режима в сложно разветвленных дельтах рек при отсутствии данных наблюдений за русловыми деформациями. — СПб, 2002. — 155 с.

55. Промахова Е.В., Чалов С.Р. Современные технологии определения мутности воды // Маккавеевские чтения. М.: Географический факультет МГУ. — 2015. — С. 106.

56. Разумихина К.В. Современный режим стока наносов в устьевой области р. Оби // Вестник ЛГУ. Сер. Геология, география. — 1984. — № 4. — С. 65–73.

57. Разумихина К.В., Новожилова А.В. Расчет переноса и баланса наносов в дельте рек // Тр. ГГИ. — 1983. — Т. 297. — С. 27–34.

58. Рейнберг А.М. Материалы по гидрологии низовьев реки Лены // Труды ААНИИ. — 1938. — Т. 105. — С. 7–150.

59. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 17, Лено-Индигирский район / ред. Протасьева М.С. — М.: Гидрометеоиздат, 1972. — 652 с.

60. Рудых С.В. Обеспечение судоходных условий на устьевых участках северных рек (на примере Ямсальского бара реки Оби). Автореф. дисс. к.т.н. СПб. — 2004.

61. Руководство по расчету элементов гидрологического режима в прибрежной зоне морей и в устьях рек при инженерных изысканиях / Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР, Гос. океаногр. ин-т, Гос. ком. Совета Министров СССР по делам стр-ва, Произв. и науч.-исслед. ин-т по инж. изысканиям в стр-ве ; [науч. ред. С. С. Байдин и др.]. — 1973. — С. 536.

62. Суходровский В.Л. Экзогенное рельефообразование в криолитозоне. — М.: Наука, 1979. — 280 с.

63. Тарасов М.К. Картографическая оценка баланса взвешенных веществ в дельте реки Селенги по данным дистанционного зондирования. — дисс. на соиск. степени к.г.н., 2019. — 188 с.

64. Тасаков П.Д. Сток взвешенных наносов в устье р. Лены // Тр. ГГИ. — 1965. — № 125. — С. 125–138.

65. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. — Москва: Росгидромет, 2022. — 124 с.

66. Третьяков М.В., Муджаба О.В., Пискун А.А., Терехова Р.А. Состояние гидрологической сети наблюдений Росгидромета в устьевых областях рек АЗРФ // Водные ресурсы. — 2022. — Т. 48. — № 5. — С. 583–595.

67. Федорова И.В., Большиянов Д.Ю., Макаров А.С., Третьяков М.В., Четверова А.А. Современное гидрологическое состояние дельты р. Лены // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. — М.: Изд-во МГУ, 2009. — С. 278–291.

68. Федорова И.В., Четверова А.А., Алексеева Н.К., Скороспехова Т.В., Романов С.Г., Большиянов Д.Ю., Шадрина А.А., Макушин М.А. Гидрологические и гидрохимические исследования в дельте р. Лены весной 2015 и 2016 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2017. — № 3(113). — С. 107–114.

69. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Гельфан А.Н., Сазонов А.А., Шевченко А.И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. — 2022. — Т. 49. — № 3. — С. 251–269. https://doi.org/10.31857/S032105962203004X.

70. Чалов С.Р. Оценка мутности речных вод по космическим снимкам // Двадцать четвертое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Барнаул. — 2009. — С. 218–220.

71. Чалов С.Р., Тарасов М.К., Чалова А.С. Закономерности сезонных изменений стока наносов в пределах разветвленного русла реки Лены // География и природные ресурсы. — 2021. — Т. 42. — № 4. — С. 95–104. https://doi.org/10.15372/GIPR20210410.

72. Чаркин А.Н., Федорова И.В., Семилетов И.П., Четверова А.А., Густаффсон О. Масштабы пространственной изменчивости распределения взвеси в системе «Река Лена – Море Лаптевых» // Геология, география и экология океана. — Ростов-на-Дону: ЮНЦ, 2009. — С. 351–354.

73. Шамов Г.И. Сток взвешенных наносов рек СССР // Труды ГГИ. — 1949. — Т. 20. — № 74.

74. Эстуарно-дельтовые системы России и Китая: гидролого-морфологические процессы, геоморфология и прогноз развития. — М.: ГЕОС, 2007. — 445 с.

75. Alabyan A.M., Chalov R.S., Korotaev V.N., Sidorchuk A.Yu., Zaitsev A.A. Natural and technogenic water and sediment supply to the Laptev sea // Berichte zur Polar- und Meeresforschung. — 1995. — № 182. — P. 264–271.

76. Alabyan A.M., Lebedeva S.V. Flow dynamics in large tidal delta of the Northern Dvina River: 2D simulation // Journal of Hydroinformatics. — 2018. — Vol. 20. — Flow dynamics in large tidal delta of the Northern Dvina River. — № 4. — P. 798–814. https://doi.org/10.2166/hydro.2018.051.

77. Alekseev M.N. Paleogeography and geochronology in the Russian Eastern Arctic during the second half of the Quaternary // Quaternary International. — 1997. — Vol. 41/42. — P. 11–15.

78. ArcticDEM, Version 3. — Harvard Dataverse, 2018.

79. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). AMAP Arctic Climate Change Update 2024: Key Trends and Impacts. — Tromsø, Norway, 2024. — 122 p.

80. Are F., Reimnitz E. An overview of the Lena River Delta setting: Geology, tectonics, geomorphology, and hydrology // Journal of Coastal Research. — 2000.

81. Babin M., Morel A., Fournier-Sicre V., Fell F., Stramski D. Light scattering properties of marine particles in coastal and open ocean waters as related to the particle mass concentration // Limnology and Oceanography. — 2003. https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.2.0843.

82. Bareiss J., Eicken H., Helbig A., Martin T. Impact of River Discharge and Regional Climatology on the Decay of Sea Ice in the Laptev Sea during Spring and Early Summer // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. — 1999. — Vol. 31. — № 3. — P. 214–229. https://doi.org/10.1080/15230430.1999.12003302.

83. Berezovskaya S., Yang D., Hinzman L. Long-term annual water balance analysis of the Lena River // Global and Planetary Change. — 2005. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.12.006.

84. Biskaborn B.K. et al. Permafrost is warming at a global scale // Nature Communications. — 2019. — Vol. 10. — № 1. — P. 264. https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4.

85. Boike J. et al. Baseline characteristics of climate, permafrost and land cover from a new permafrost observatory in the Lena River Delta, Siberia (1998-2011) // Biogeosciences. — 2013. https://doi.org/10.5194/bg-10-2105-2013.

86. Boike J., Nitzbon J., Anders K., Grigoriev M., Bolshiyanov D., Langer M., Lange S., Bornemann N., Morgenstern A., Schreiber P., Wille C., Chadburn S., Gouttevin I., Burke E., Kutzbach L. A 16-year record (2002–2017) of permafrost, active-layer, and meteorological conditions at the Samoylov Island Arctic permafrost research site, Lena River delta, northern Siberia: an opportunity to validate remote-sensing data and land surface, snow, and // Earth Syst. Sci. Data. — 2019a. — Vol. 11. — № 1. — P. 261–299. https://doi.org/doi.org/10.5194/essd-11-261-2019.

87. Boike J., Nitzbon J., Anders K., Grigoriev M., Bolshiyanov D., Langer M., Lange S., Bornemann N., Morgenstern A., Schreiber P., Wille C., Chadburn S., Gouttevin I., Burke E., Kutzbach L. A 16-year record (2002–2017) of permafrost, active-layer, and meteorological conditions at the Samoylov Island Arctic permafrost research site, Lena River delta, northern Siberia: an opportunity to validate remote-sensing data and land surface, snow, and // Earth Syst. Sci. Data. — 2019b. — Vol. 11. — P. 261–299. https://doi.org/doi.org/10.5194/essd-11-261-2019.

88. Boike J., Nitzbon J., Anders K., Grigoriev M.N., Bolshiyanov D.Y., Langer M., Lange S., Bornemann N., Morgenstern A., Schreiber P., Wille C., Chadburn S., Gouttevin I., Kutzbach L. Measurements in soil and air at Samoylov Station (2002-2018), version 201908. — Alfred Wegener Institute - Research Unit Potsdam, PANGAEA, 2019c. https://doi.org/10.1594/PANGAEA.905236.

89. Bolshiyanov D., Makarov A., Savelieva L. Lena River delta formation during the Holocene // Biogeosciences. — 2015. — Vol. 12. — № 2. — P. 579–593. https://doi.org/10.5194/bg-12-579-2015.

90. Brown J., Romanovsky V.E. Report from the International Permafrost Association: state of permafrost in the first decade of the 21 st century // Permafrost and Periglacial Processes. — 2008. — Vol. 19. — № 2. — P. 255–260. https://doi.org/10.1002/ppp.618.

91. Cao B., Qiu J., Zhang W., Xie X., Lu X., Yang X., Li H. Retrieval of Suspended Sediment Concentrations in the Pearl River Estuary Using Multi-Source Satellite Imagery // Remote Sensing. — 2022. — Vol. 14. — № 16. — P. 3896. https://doi.org/10.3390/rs14163896.

92. Chalov S., Prokopeva K. Sedimentation and Erosion Patterns of the Lena River Anabranching Channel // Water. — 2022. — Vol. 14. — № 23. — P. 3845. https://doi.org/10.3390/w14233845.

93. 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. — № 1. — P. 19320. https://doi.org/10.1038/s41598-025-02614-7.

94. 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. — № 22. — P. 4549. https://doi.org/10.3390/rs13224549.

95. Chalov S., Prokopeva K., Magritsky D., Grigoriev V., Fingert E., Habel M., Juhls B., Morgenstern A., Overduin P.P., Kasimov N. Climate change impacts on streamflow, sediment load and carbon fluxes in the Lena River delta // Ecological Indicators. — 2023. — Vol. 157. — P. 111252. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111252.

96. Chalov S.R., Bazilova V.O., Tarasov M.K. Modelling suspended sediment distribution in the Selenga River Delta using LandSat data // Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. — 2017. — Vol. 375. — P. 19–22. https://doi.org/10.5194/piahs-375-19-2017.

97. Chander G., Markham B.L., Helder D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // Remote Sensing of Environment. — 2009. — Vol. 113. — № 5. — P. 893–903. https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007.

98. Chen Z., Hu C., Muller-Karger F. Monitoring turbidity in Tampa Bay using MODIS/Aqua 250-m imagery // Remote Sensing of Environment. — 2007. https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.019.

99. Church J.A., Gregory J.M., White N.J., Platten S.M., Mitrovica Understanding and Projecting Sea Level Change // Oceanography. — 2011. — Vol. 24. — № 2. — P. 140–143.

100. Costard F., Gautier E., Brunstein D., Hammadi J., Fedorov A., Yang D., Dupeyrat L. Impact of the global warming on the fluvial thermal erosion over the Lena River in Central Siberia // Geophysical Research Letters. — 2007. — Vol. 34. — № 14. https://doi.org/10.1029/2007GL030212.

101. Dashora A., Lohani B., Malik J.N. A repository of earth resource information – CORONA satellite programme // Current Science. — 2007. — Vol. 92. — № 7. — P. 926–932.

102. DeConto R.M., Pollard D. Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise // Nature. — 2016. — Vol. 531. — № 7596. — P. 591–597. https://doi.org/10.1038/nature17145.

103. Dittmar T., Kattner G. The biogeochemistry of the river and shelf ecosystem of the Arctic Ocean: A review // Marine Chemistry. — 2003. https://doi.org/10.1016/S0304-4203(03)00105-1.

104. Dogliotti A.I., Ruddick K.G., Nechad B., Doxaran D., Knaeps E. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters // Remote Sensing of Environment. — 2015. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020.

105. Dong T.Y., Nittrouer J.A., McElroy B., Il'icheva E., Pavlov M., Ma H., Moodie A.J., Moreido V.M. Predicting Water and Sediment Partitioning in a Delta Channel Network Under Varying Discharge Conditions // Water Resources Research. — 2020. — Vol. 56. — № 11. — P. e2020WR027199. https://doi.org/10.1029/2020WR027199.

106. Doxaran D., Ehn J., Bélanger S., Matsuoka A., Hooker S., Babin M. Optical characterisation of suspended particles in the Mackenzie River plume (Canadian Arctic Ocean) and implications for ocean colour remote sensing // Biogeosciences. — 2012. — Vol. 9. — № 8. — P. 3213–3229. https://doi.org/10.5194/bg-9-3213-2012.

107. Doxaran D., Froidefond J.-M., Castaing P. A reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal waters // International Journal of Remote Sensing. — 2002. — Vol. 23. — № 23. — P. 5079–5085. https://doi.org/10.1080/0143116021000009912.

108. Doxaran D., Froidefond J.M., Lavender S., Castaing P. Spectral signature of highly turbid waters: Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations // Remote Sensing of Environment. — 2002. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00341-8.

109. Dunn F.E., Darby S.E., Nicholls R.J., Cohen S., Zarfl C., Fekete B.M. Projections of declining fluvial sediment delivery to major deltas worldwide in response to climate change and anthropogenic stress // Environmental Research Letters. — 2019. — Vol. 14. — № 8. — P. 084034. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab304e.

110. Edmonds D.A., Paola C., Hoyal D.C.J.D., Sheets B.A. Quantitative metrics that describe river deltas and their channel networks // Journal of Geophysical Research. — 2011. — Vol. 116. — № F4. — P. F04022. https://doi.org/10.1029/2010JF001955.

111. Eleveld M.A., Pasterkamp R., Woerd H.J. van der, Pietrzak J.D. Remotely sensed seasonality in the spatial distribution of sea-surface suspended particulate matter in the southern North Sea // Estuarine, Coastal and Shelf Science. — 2008. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.07.015.

112. Expedition to the Lena River in July/August 1994 // Laptev Sea System: expeditions in 1994 / H. Kassens, I. Dmitrenko, V. Rachold et al. / eds. Rachold V., Hermel J., Korotaev V. — Bremerhaven: Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, 1995. — P. 181–195.

113. Fassnacht S.R. A multi-channel suspended sediment transport model for the Mackenzie Delta, Northwest Territories // Journal of Hydrology. — 1997. — Vol. 197. — № 1–4. — P. 128–145. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03269-6.

114. Fedorova I., Bolshiyanov D., Chetverova A., Makarov A., Tretiyakov M. Measured water discharges, suspended supply and morphometric parameters of cross-sections in the Lena River Delta during summer period 2002-2012 // Pangea. — 2015a. — P. 345–363.

115. Fedorova I., Chetverova A., Bolshiyanov D., Makarov A., Boike J., Heim B., Morgenstern A., Overduin P.P., Wegner C., Kashina V., Eulenburg A., Dobrotina E., Sidorina I. Lena Delta hydrology and geochemistry: Long-term hydrological data and recent field observations // Biogeosciences. — 2015b. https://doi.org/10.5194/bg-12-345-2015.

116. Feng D., Gleason C.J., Lin P., Yang X., Pan M., Ishitsuka Y. Recent changes to Arctic river discharge // Nature Communications 2021 12:1. — 2021. — Vol. 12. — № 1. — P. 1–9. https://doi.org/10.1038/s41467-021-27228-1.

117. Feyisa G.L., Meilby H., Fensholt R., Proud S.R. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery // Remote Sensing of Environment. — 2014. — Vol. 140. — P. 23–35. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029.

118. Fisher A., Flood N., Danaher T. Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia // Remote Sensing of Environment. — 2016b. — Vol. 175. — P. 167–182. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.055.

119. Frey K.E., McClelland J.W. Impacts of permafrost degradation on arctic river biogeochemistry // Hydrological Processes. — 2009. — Vol. 23. — № 1. — P. 169–182. https://doi.org/10.1002/hyp.7196.

120. Fuchs M., Nitze I., Strauss J., Günther F., Wetterich S., Kizyakov A., Fritz M., Opel T., Grigoriev M.N., Maksimov G.T., Grosse G. Rapid Fluvio-Thermal Erosion of a Yedoma Permafrost Cliff in the Lena River Delta // Frontiers in Earth Science. — 2020. — Vol. 8. https://doi.org/10.3389/feart.2020.00336.

121. Fuchs M., Palmtag J., Juhls B., Overduin P.P., Grosse G., Abdelwahab A., Bedington M., Sanders T., Ogneva O., Fedorova I.V., Zimov N.S., Mann P.J., Strauss J. High-resolution bathymetry models for the Lena Delta and Kolyma Gulf coastal zones // Earth System Science Data. — 2022. — Vol. 14. — № 5. — P. 2279–2301. https://doi.org/10.5194/essd-14-2279-2022.

122. Golledge N.R., Keller E.D., Gomez N., Naughten K.A., Bernales J., Trusel L.D., Edwards T.L. Global environmental consequences of twenty-first-century ice-sheet melt // Nature. — 2019. — Vol. 566. — № 7742. — P. 65–72. https://doi.org/10.1038/s41586-019-0889-9.

123. Gordeev V.V. River Input of Water, Sediment, Major Ions, Nutrients and Trace Metals from Russian Territory to the Arctic Ocean // The Freshwater Budget of the Arctic Ocean. — 2000. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4132-1_14.

124. Gordeev V.V. Fluvial sediment flux to the Arctic Ocean // Geomorphology. — 2006. — Vol. 80. — № 1–2. — P. 94–104. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.09.008.

125. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sensing of Environment. — 2017. — Vol. 202. — Google Earth Engine. — P. 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031.

126. Hadjimitsis D.G., Clayton C.R.I., Hope V.S. An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through the remote sensing of some reservoirs // International Journal of Remote Sensing. — 2004. — Vol. 25. — № 18. — P. 3651–3674. https://doi.org/10.1080/01431160310001647993.

127. Han L. Spectral reflectance with varying suspended sediment concentrations in clear and algae-laden waters // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. — 1997.

128. Hariharan J., Piliouras A., Schwenk J., Passalacqua P. Width-Based Discharge Partitioning in Distributary Networks: How Right We Are // Geophysical Research Letters. — 2022. — Vol. 49. — Width-Based Discharge Partitioning in Distributary Networks. — № 14. — P. e2022GL097897. https://doi.org/10.1029/2022GL097897.

129. Hines C., Piliouras A. Suspended Sediment Transport and Storage in Arctic Deltas // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. — 2024. — Vol. 129. — № 12. https://doi.org/10.1029/2024JF007802.

130. Holmes R.M., McClelland J.W., Peterson B.J., Shiklomanov I.A., Shiklomanov A.I., Zhulidov A.V., Gordeev V.V., Bobrovitskaya N.N. A circumpolar perspective on fluvial sediment flux to the Arctic ocean // Global Biogeochemical Cycles. — 2002. — Vol. 16. — № 4. — P. 45-1-45–14. https://doi.org/10.1029/2001GB001849.

131. Holmes R.M., McClelland J.W., Peterson B.J., Tank S.E., Bulygina E., Eglinton T.I., Gordeev V.V., Gurtovaya T.Y., Raymond P.A., Repeta D.J., Staples R., Striegl R.G., Zhulidov A.V., Zimov S.A. Seasonal and Annual Fluxes of Nutrients and Organic Matter from Large Rivers to the Arctic Ocean and Surrounding Seas // Estuaries and Coasts. — 2012. https://doi.org/10.1007/s12237-011-9386-6.

132. Hou X., Xie D., Feng L., Shen F., Nienhuis J.H. Sustained increase in suspended sediments near global river deltas over the past two decades // Nature Communications. — 2024. — Vol. 15. — № 1. — P. 3319. https://doi.org/10.1038/s41467-024-47598-6.

133. IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — 2013. — 1535 p.

134. Ivanov V.V., Piskun A.A. Distribution of River Water and Suspended Sediment Loads in the Deltas of Rivers in the Basins of The Laptev and East-Siberian Seas // Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic. — 1999. https://doi.org/10.1007/978-3-642-60134-7_22.

135. Kirk J.T.O. The upwelling light stream in natural waters // Limnology and Oceanography. — 1989. https://doi.org/10.4319/lo.1989.34.8.1410.

136. Kopp R.E., DeConto R.M., Bader D.A., Hay C.C., Horton R.M., Kulp S., Oppenheimer M., Pollard D., Strauss B.H. Evolving Understanding of Antarctic Ice-Sheet Physics and Ambiguity in Probabilistic Sea-Level Projections // Earth's Future. — 2017. — Vol. 5. — № 12. — P. 1217–1233. https://doi.org/10.1002/2017EF000663.

137. Kulikov M.E., Arkhipkin V.S., Medvedev I.P., Kovachev S.A., Krylov A.A. Numerical Modeling of Extreme Sea Levels on the Laptev Sea Coast // Geosciences. — 2024. — Vol. 14. — № 9. — P. 245. https://doi.org/10.3390/geosciences14090245.

138. Laonamsai J., Julphunthong P., Saprathet T., Kimmany B., Ganchanasuragit T., Chomcheawchan P., Tomun N. Utilizing NDWI, MNDWI, SAVI, WRI, and AWEI for Estimating Erosion and Deposition in Ping River in Thailand // Hydrology. — 2023. — Vol. 10. — № 3. — P. 70. https://doi.org/10.3390/hydrology10030070.

139. Lisitzyn A.P. Sedimentation in the world ocean. — Tusla, Okla: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1972. — 218 p.

140. Liu H., Hu H., Liu X., Jiang H., Liu W., Yin X. A Comparison of Different Water Indices and Band Downscaling Methods for Water Bodies Mapping from Sentinel-2 Imagery at 10-M Resolution // Water. — 2022. — Vol. 14. — № 17. — P. 2696. https://doi.org/10.3390/w14172696.

141. Magritskii D.V. Anthropogenic Impact on the Runoff of Russian Rivers Emptying into the Arctic Ocean // Water Res. — 2008. — Vol. 35. — № 1. — P. 1–14.

142. Magritsky D.V. Climate-induced and anthropogenic changes in sediment transport of the main Arctic Rivers of Siberia and the Far East of the Russian Federation // Proceedings of the IV All-Russian Conference “Hydrometeorology and Ecology: achievements and prospects of development”/MGO named after L. N. Karlin. — 2020. — P. 248–253.

143. Magritsky D.V. Factors and patterns of long-term changes in water flow, suspended sediments and heat of the Lower Lena and Vilyui // Vestn. Moscow. un-ta. Ser.5. Geography. — 2015. — № 6. — P. 85–9.

144. Magritsky D.V., Alexeevsky N.I., Aybulatov D.N., Fofonova V.V., Gorelkin A. Features and evaluations of spatial and temporal changes of water runoff, sediment yield and heat flux in the Lena River delta // Polarforschung. — 2018. — Vol. 87. — № 2. — P. 89–110. https://doi.org/doi:10.2312/polarforschung.87.2.89.

145. Makarov A.S., Fedodorv G.B., Fedorova I.V. Geomorphological Studies in the Lena River Delta // Berichte zur Polar- und Meeresforschung. — 2006. — № 539. — P. 58–61.

146. Matveeva T.A., Semenov V.A. Regional Features of the Arctic Sea Ice Area Changes in 2000–2019 versus 1979–1999 Periods // Atmosphere. — 2022. — Vol. 13. — № 9. — P. 1434. https://doi.org/10.3390/atmos13091434.

147. McClelland J.W., Dery S.J., Peterson B.J., Holmes R.M., Wood E.F. A pan-arctic evaluation of changes in river discharge during the latter half of the 20th century // Geophys. Res. Lett. — 2006. — Vol. 33. — P. L06715. https://doi.org/10.01029/02006GL025753.

148. McClelland J.W., Holmes R.M., Peterson B.J., Raymond P.A., Striegl R.G., Zhulidov A.V., Zimov S.A., Zimov N., Tank S.E., Spencer R.G.M., Staples R., Gurtovaya T.Y., Griffin C.G. Particulate organic carbon and nitrogen export from major Arctic rivers // Global Biogeochemical Cycles. — 2016. — Vol. 30. — № 5. — P. 629–643. https://doi.org/10.1002/2015GB005351.

149. McFeeters S.K. The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // International Journal of Remote Sensing. — 1996. — Vol. 17. — P. 1425–1432.

150. Mertes L.A.K., Smith M.O., Adams J.B. Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon River wetlands from Landsat images // Remote Sensing of Environment. — 1993. — Vol. 43. — № 3. https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90071-5.

151. Mobley C.D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements // Applied Optics. — 1999. https://doi.org/10.1364/ao.38.007442.

152. Mobley C.D., Stramski D., Paul Bissett W., Boss E. Optical modeling of ocean waters: Is the case 1 - case 2 classification still useful? // Oceanography. — 2004. https://doi.org/10.5670/oceanog.2004.48.

153. Morin P., Porter C., Cloutier M., Howat I., Noh M.-J., Willis M., Bates B., Willamson C., Peterman K. ArcticDEM : a publicly available, high resolution elevation model of the Arctic. Version 3 / Polar Geospatial Center. — Minneapolis: University of Minnesota, 2016.

154. Myint S.W., Walker N.D. Quantification of surface suspended sediments along a river dominated coast with NOAA AVHRR and Sea WiFS measurements: Louisiana, USA // International Journal of Remote Sensing. — 2002. https://doi.org/10.1080/01431160110104700.

155. Ogneva O., Mollenhauer G., Juhls B., Sanders T., Palmtag J., Fuchs M., Grotheer H., Mann P.J., Strauss J. Particulate organic matter in the Lena River and its Delta: From the permafrost catchment to the Arctic Ocean // Biogeosciences. — 2022. — Vol. 20. — № 7. — P. 1423–1441. https://doi.org/10.5194/bg-20-1423-2023.

156. Onderksek M. Correlations between several environmental factors affecting the bloom events of cyanobacteria in Liptovska Mara reservoir (Slovakia)-A simple regression model // Ecological Modelling. — 2007. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.07.028.

157. Oppenheimer M., Glavovic B.C., Hinkel J., Wal R. van de, Magnan A.K., Abd-Elgawad A., Cai R., Cifuentes-Jara M., DeConto R.M., Ghosh T., Hay J., Isla F., Marzeion B., Meyssignac B., Sebesvari Z. Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities // In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts,

V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. — 2019.

158. Osadchiev A.A., Pisareva M.N., Spivak E.A., Shchuka S.A., Semiletov I.P. Freshwater transport between the Kara, Laptev, and East-Siberian seas // Scientific Reports. — 2020. — Vol. 10. — № 1. — P. 13041. https://doi.org/10.1038/s41598-020-70096-w.

159. Overeem I., Nienhuis J.H., Piliouras A. Ice-dominated Arctic deltas // Nature Reviews Earth & Environment. — 2022. — Vol. 3. — № 4. — P. 225–240. https://doi.org/10.1038/s43017-022-00268-x.

160. Panchenko E., Krylenko I., Alabyan A. Tide-river interaction in the Pechora Delta as revealed by new measurements and numerical modeling // Anthropocene Coasts. — 2024. — Vol. 7. — № 1. — P. 27. https://doi.org/10.1007/s44218-024-00062-w.

161. Park E., Latrubesse E.M. Modeling suspended sediment distribution patterns of the Amazon River using MODIS data // Remote Sensing of Environment. — 2014. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.013.

162. Park J.-Y., Schloesser F., Timmermann A., Choudhury D., Lee J.-Y., Nellikkattil A.B. Future sea-level projections with a coupled atmosphere-ocean-ice-sheet model // Nature Communications. — 2023. — Vol. 14. — № 1. — P. 636. https://doi.org/10.1038/s41467-023-36051-9.

163. Pavlova E.Yu., Dorozhkina M.V. Geological-geomorphological studies in the western and central sectors of the Lena Delta // In: Rachold V. (Ed.). Reports on Polar and Marine Research. The Expeditions in Siberia in 1999. — 2000. — Vol. 354. — P. 75–90.

164. Pekel J.F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // Nature. — 2016. https://doi.org/10.1038/nature20584.

165. Peregovich B., Hoops E., Rachold V. Sediment transport to the Laptev Sea (Siberian Arctic) during the Holocene — evidence from the heavy mineral composition of fluvial and marine sediments // Boreas. — 1999. — Vol. 28. — № 1. — P. 205–214. https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00215.x.

166. Peterson B.J., Holmes R.M., McClelland J.W., Vörösmarty C.J., Lammers R.B., Shiklomanov A.I., Shiklomanov I.A., Rahmstorf S. Increasing River Discharge to the Arctic Ocean // Science. — 2002. — Vol. 298. — № 5601. — P. 2171–2173. https://doi.org/10.1126/science.1077445.

167. Piliouras A., Lauzon R., Rowland J.C. Unraveling the Combined Effects of Ice and Permafrost on Arctic Delta Morphodynamics // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. — 2021. — Vol. 126. — № 4. — P. e2020JF005706. https://doi.org/10.1029/2020JF005706.

168. Potes M., Costa M.J., Salgado R. Satellite remote sensing of water turbidity in Alqueva reservoir and implications on lake modelling // Hydrology and Earth System Sciences. — 2012. https://doi.org/10.5194/hess-16-1623-2012.

169. Rachold V., Alabyan A.M., Hubberten H.W., Korotaev V.N., Zaitsev A.A. Sediment transport to the Laptev Sea - Hydrology and geochemistry of the Lena River // Polar Research. — 1996. — Vol. 15. — № 2. — P. 183–196. https://doi.org/10.3402/polar.v15i2.6646.

170. Rachold V., Grigoriev M., Are F., Solomon S., Reimnitz E., Kassens H., Antonow M. Coastal erosion vs riverine sediment dischardge in the Arctic Shelf seas // Int. J. Earth Sci. — 2000. — № 89. — P. 450–460.

171. Rantanen M., Karpechko A.Yu., Lipponen A., Nordling K., Hyvärinen O., Ruosteenoja K., Vihma T., Laaksonen A. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 // Communications Earth & Environment. — 2022. — Vol. 3. — № 1. — P. 168. https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3.

172. Romanovskii N.N., Hubberten H.-W., Gavrilov A.V., Tumskoy V.E., Tipenko G.S., Grigoriev M.N., Siegert C. Thermokarst and land-ocean interactions, Laptev sea region, Russia // Permafrost and Periglacial Processes. — 2000. — Vol. 11. — № 2. — P. 137–152. https://doi.org/10.1002/1099-1530(200004/06)11:2%3C137::AID-PPP345%3E3.0.CO;2-L.

173. Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G., Malkova G.V., Kholodov A.L., Marchenko S.S., Moskalenko N.G., Sergeev D.O., Ukraintseva N.G., Abramov A.A., Gilichinsky D.A.,

Vasiliev A.A. Thermal state of permafrost in Russia // Permafrost and Periglacial Processes. — 2010. — Vol. 21. — № 2. — P. 136–155. https://doi.org/10.1002/ppp.683.

174. Romanovsky V.E., Smith S.L., Isaksen K., Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Kholodov A.L., Christiansen H.H., Drozdov D.S., Malkova G.V., Marchenko S.S. Terrestrial Permafrost // State of the Climate in 2018. Bulletin of the American Meteorological Society. — 2019. — P. S153–S156. https://doi.org/10.1175/2019BAMSStateoftheClimate.1.

175. Russian-German cooperation System Laptev Sea: the expedition Lena-2005 / eds. Schirrmeister L., Wagner D., Grigoriev M.N., Bolshiyanov D.Yu. — Bremerhaven: Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, 2007. — 242 p.

176. Russian-German Cooperation System Laptev Sea 2000: The Lena Delta 1998 Expedition / eds. Rachold V., Grigoryev M.N. — 1998. — 259 p.

177. Schneider J., Grosse G., Wagner D. Land cover classification of tundra environments in the Arctic Lena Delta based on Landsat 7 ETM+ data and its application for upscaling of methane emissions // Remote Sensing of Environment. — 2009. — Vol. 113. — № 2. — P. 380–391. https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.013.

178. Schwamborn G., Rachold V., Grigoriev M.N. Late Quaternary sedimentation history of the Lena Delta // Quaternary International. — 2002. https://doi.org/10.1016/S1040-6182(01)00084-2.

179. Schwenk J., Hariharan J. RivGraph: Automatic extraction and analysis of river and delta channel network topology // Journal of Open Source Software. — 2021. — Vol. 6. — RivGraph. — № 59. — P. 2952. https://doi.org/10.21105/joss.02952.

180. Schwenk J., Piliouras A., Rowland J.C. Determining flow directions in river channel networks using planform morphology and topology // Earth Surface Dynamics. — 2020. — Vol. 8. — № 1. — P. 87–102. https://doi.org/10.5194/esurf-8-87-2020.

181. Shabanov P., Osadchiev A., Shabanova N., Ogorodov S. Decline in Ice Coverage and Ice-Free Period Extension in the Kara and Laptev Seas during 1979–2022 // Remote Sensing. — 2024. — Vol. 16. — № 11. — P. 1875. https://doi.org/10.3390/rs16111875.

182. Sher A. Is there any real evidence for a huge shelf ice sheet in east Siberia? // Quaternary International. — 1995. — Vol. 28. — P. 39–40.

183. Sher A. Ice Complex of the Laptev Sea shelf area: paleoecology, age and other problems and current solutions // Quaternary Environment of the Eurasian North (QUEEN), Proceedings of the Third Workshop—Abstracts. — 1999. — P. 55.

184. Shiklomanov A., Déry S., Tretiakov M., Yang D., Magritsky D., Georgiadi A., Tang W. River Freshwater Flux to the Arctic Ocean // Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems. — Cham: Springer International Publishing, 2021. — P. 703–738. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50930-9_24.

185. Shiklomanov A.I., Yakovleva T.I., Lammers R.B., Karasev I.P., Vörösmarty C.J., Linder E. Cold region river discharge uncertainty-estimates from large Russian rivers // Journal of Hydrology. — 2006. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.10.037.

186. Smith S.L., Romanovsky V.E., Isaken K., Nyland K., Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Christiansen H.H. Permafrost // State of the Climate in 2022. Bulletin of the American Meteorological Society. — 2023. — Vol. 104. — P. S301:S305. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0079.1.

187. Strauss J., Schirrmeister L., Grosse G., Fortier D., Hugelius G., Knoblauch C., Romanovsky V., Schädel C., Schneider von Deimling T., Schuur E.A.G., Shmelev D., Ulrich M., Veremeeva A. Deep Yedoma permafrost: A synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability // Earth-Science Reviews. — 2017. — Vol. 172. — P. 75–86. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.007.

188. Streletskiy D.A., Maslakov A., Grosse G., Shiklomanov N.I., Farquharson L., Zwieback S., Iwahana G., Bartsch A., Liu L., Strozzi T., Lee H., Debolskiy M.V. Thawing permafrost is subsiding in the Northern Hemisphere—review and perspectives // Environmental Research Letters. — 2025. — Vol. 20. — № 1. — P. 013006. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ada2ff.

189. Syvitski J.P.M. Sediment discharge variability in Arctic rivers: implications for a warmer future // Polar Researchr Res. — 2002. — Vol. 21.

190. Syvitski J.P.M., Kettner A. Sediment flux and the anthropocene // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 2011. https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0329.

191. Syvitski J.P.M., Kettner A.J., Correggiari A., Nelson B.W. Distributary channels and their impact on sediment dispersal // Marine Geology. — 2005. — Vols. 222–223. — P. 75–94. https://doi.org/10.1016/j.margeo.2005.06.030.

192. Tabata K.K., Hickin E.J. Interchannel hydraulic geometry and hydraulic efficiency of the anastomosing Columbia River, southeastern British Columbia, Canada // Earth Surface Processes and Landforms. — 2003. — Vol. 28. — № 8. — P. 837–852. https://doi.org/10.1002/esp.497.

193. Tang S., Larouche P., Niemi A., Michel C. Regional algorithms for remote-sensing estimates of total suspended matter in the Beaufort Sea // International Journal of Remote Sensing. — 2013. — Vol. 34. — № 19. — P. 6562–6576. https://doi.org/10.1080/01431161.2013.804222.

194. Tank S.E., Manizza M., Holmes R.M., McClelland J.W., Peterson B.J. The Processing and Impact of Dissolved Riverine Nitrogen in the Arctic Ocean // Estuaries and Coasts. — 2012. — Vol. 35. — № 2. — P. 401–415. https://doi.org/10.1007/s12237-011-9417-3.

195. Tank S.E., Striegl R.G., McClelland J.W., Kokelj S.V. Multi-decadal increases in dissolved organic carbon and alkalinity flux from the Mackenzie drainage basin to the Arctic Ocean // Environmental Research Letters. — 2016. — Vol. 11. — № 5. — P. 054015. https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/054015.

196. Tejedor A., Longjas A., Edmonds D.A., Zaliapin I., Georgiou T.T., Rinaldo A., Foufoula-Georgiou E. Entropy and optimality in river deltas // Proceedings of the National Academy of Sciences. — 2017. — Vol. 114. — № 44. — P. 11651–11656. https://doi.org/10.1073/pnas.1708404114.

197. Tejedor A., Longjas A., Zaliapin I., Foufoula-Georgiou E. Delta channel networks: 1. A graph-theoretic approach for studying connectivity and steady state transport on deltaic surfaces // Water Resources Research. — 2015a. — Vol. 51. — № 6. — P. 3998–4018. https://doi.org/10.1002/2014WR016577.

198. Tejedor A., Longjas A., Zaliapin I., Foufoula-Georgiou E. Delta channel networks: 2. Metrics of topologic and dynamic complexity for delta comparison, physical inference, and vulnerability assessment // Water Resources Research. — 2015b. — Vol. 51. — Delta channel networks. — № 6. — P. 4019–4045. https://doi.org/10.1002/2014WR016604.

199. The Arctic Great Rivers Observatory. 2025. Discharge Dataset. — https://www.arcticrivers.org/data, 2025.

200. Vasiliev A.A., Drozdov D.S., Gravis A.G., Malkova G.V., Nyland K.E., Streletskiy D.A. Permafrost degradation in the Western Russian Arctic // Environmental Research Letters. — 2020. — Vol. 15. — № 4. — P. 045001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6f12.

201. Vesakoski J., Nylén T., Arheimer B., Gustafsson D., Isberg K., Holopainen M., Hyyppä J., Alho P. Arctic Mackenzie Delta channel planform evolution during 1983–2013 utilising Landsat data and hydrological time series // Hydrological Processes. — 2017. — Vol. 31. — № 22. — P. 3979–3995. https://doi.org/10.1002/hyp.11315.

202. Volpe V., Silvestri S., Marani M. Remote sensing retrieval of suspended sediment concentration in shallow waters // Remote Sensing of Environment. — 2011. https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.013.

203. Walker H.J. Arctic deltas // Coastal Res. — 1998. — Vol. 14. — P. 718–738.

204. Walvoord M.A., Kurylyk B.L. Hydrologic impacts of thawing permafrost — a review // Vadose Zone J. — 2016. — Vol. 15. — P. 1–20.

205. Wang J., Lu X., Zhou Y. Retrieval of suspended sediment concentrations in the turbid water of the Upper Yangtze River using Landsat ETM+ // Chinese Science Bulletin. — 2007. https://doi.org/10.1007/s11434-007-7012-6.

206. Wang J.J., Lu X.X. Estimation of suspended sediment concentrations using Terra MODIS: An example from the Lower Yangtze River, China // Science of the Total Environment. — 2010. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.057.

207. Wang P., Huang Q., Pozdniakov S.P., Liu S., Ma N., Wang T., Zhang Y., Yu J., Xie J., Fu G., Frolova N.L., Liu C. Potential role of permafrost thaw on increasing Siberian river discharge // Environmental Research Letters. — 2021. — Vol. 16. — № 3. — P. 034046. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ABE326.

208. Widhalm B., Högström E., Ressl C., Trofaier A., Heim B., Biasi C., Bartsch A. Land surface hydrology from remotely sensed data at PAGE21 sites with links to geotiff images // PANGAEA. — 2014. https://doi.org/10.1594/PANGAEA.834200.

209. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. — 2006a. — Vol. 27. — № 14. — P. 3025–3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179.

210. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. — 2006b. — Vol. 27. — № 14. — P. 3025–3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179.

211. Yin F., Gomez-Dans J., Lewis P., Qingling Wu A sensor invariant Atmospheric Correction (SIAC). — 2018. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32393.54881.

212. Yin F., Lewis P.E., Gómez-Dans J.L. Bayesian atmospheric correction over land: Sentinel-2/MSI and Landsat 8/OLI // Geoscientific Model Development. — 2022. — Vol. 15. — P. 7933–7976. https://doi.org/doi.org/10.5194/gmd-15-7933-2022.

213. Zhou Y., Dong J., Xiao X., Xiao T., Yang Z., Zhao G., Zou Z., Qin Y. Open Surface Water Mapping Algorithms: A Comparison of Water-Related Spectral Indices and Sensors // Water. — 2017. — Vol. 9. — Open Surface Water Mapping Algorithms. — № 4. — P. 256. https://doi.org/10.3390/w9040256.

214. Zubrzycki S., Kutzbach L., Grosse G., Desyatkin A., Pfeiffer E.-M. Organic carbon and total nitrogen stocks in soils of the Lena River Delta // Biogeosciences. — 2013. — Vol. 10. — № 6. — P. 3507–3524. https://doi.org/10.5194/bg-10-3507-2013.