ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

кандидата географических наук, ведущего научного сотрудника Лебедевой Людмилы Сергеевны на диссертационную работу Прокопьевой Кристины Николаевны «Трансформация стока воды и взвешенных наносов в дельте р. Лены в условиях изменяющегося климата», представленную на соискание ученой степени кандидата географических наук по специальности 1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия.

1. Актуальность темы исследования

Арктика является наиболее быстро меняющимся регионом планеты. Именно здесь за последние десятилетия скорость роста температуры воздуха в несколько раз превысила глобальные тренды. Особенно чувствительны к климатическим изменениям устья арктических рек, где взаимодействие речных и морских вод осложняется развитием криогенных процессов. Дельта р. Лены сформирована мощными аллювиально-морскими отложениями и многолетнемерзлыми породами (ММП), включая обнажения ледового комплекса, и обладает сложной русловой сетью. В условиях роста температуры воздуха и деградации ММП могут интенсифицироваться русловые переформирования, а разрушение берегов, сложенных ММП, становится дополнительным источником взвешенных наносов и органического углерода, что влияет на гидрологические, морфологические и биогеохимические процессы в устьях.

Трансформация стока воды и наносов в дельте Лены до настоящего времени рассматривалась лишь эпизодически. Традиционные оценки материкового стока опираются на измерения в замыкающих створов, которые зачастую расположены далеко от устьев, а наземная сеть наблюдений в устьевых зонах Российской Арктики за последние десятилетия значительно сократилась. В этих условиях применение данных дистанционного зондирования Земли позволяет частично восполнить указанный пробел, так как проведение прямых измерений в пределах такой обширной территории крайне затруднено. Актуальность темы, таким образом, сомнений не вызывает.

Целью исследования автор формулирует оценку пространственно-временной изменчивости стока воды и взвешенных наносов в дельте Лены в XXI в. с учетом современных гидроклиматических изменений на основе совместного использования спутниковых и экспедиционных данных. Поставленные задачи раскрывают цель: от разработки и адаптации методов дистанционной оценки характеристик стока и интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов до анализа факторов, определяющих закономерности трансформации стока взвешенных наносов.

2. Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы – 170 страниц; работа содержит 32 таблицы и 66 рисунков; список литературы включает 214 наименований, в том числе 140 иностранных.

3. Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи, приведены выносимые на защиту положения, показаны научная новизна, достоверность, теоретическая и практическая значимость, отражен личный вклад автора.

Первая глава содержит географо-гидрологическую характеристику устьевой области р. Лены. Автор обобщает литературные, экспедиционные и мониторинговые данные о стоке воды и его распределении по рукавам, стоке взвешенных наносов в замыкающем створе г/п Кюсюр и в истоках главных рукавов, приводит информацию по геоморфологическому строению и этапам формирования дельты. Автор не ограничивается описанием, а подкрепляет тезис о быстром потеплении полученными

самостоятельно выводами в ходе обработки данных реанализа и измерений в термометрической скважине на о. Самойловский.

Во второй главе описана разработка и адаптация комплекса алгоритмов обработки спутниковых снимков для расчета распределения стока по рукавам, калибровка и верификация региональной модели восстановления концентрации взвешенных наносов по спектральным характеристикам воды и методика расчета плановых деформаций берегов по снимкам. Заслуживает внимания привлечение цифровых моделей рельефа для перехода от площадей размыва к массам поступающих наносов, без которого количественная оценка была бы невозможна.

В третьей главе установлены закономерности распределения стока воды по рукавам дельты для межени и спада половодья. В половодье активизация поперечных гидравлических связей обеспечивает перераспределение стока между секторами дельты, а в межень их ослабление приводит к концентрации основного стока в магистральных рукавах восточной части дельты.

Четвертая глава посвящена трансформации стока наносов и оценке его притока в море Лаптевых. Автором дана сценарная расчетная оценка выноса взвеси в море с учетом внутридельтовой трансформации, которая на 0,5–2,0 млн т в год выше, чем то, что фиксируется в вершине дельты. Это объяснено тем, что дельта формирует часть наносов за счет эрозионно-аккумулятивных процессов внутри дельты.

В пятой главе проанализированы факторы трансформации стока взвешенных наносов. Показано, что в межень ведущая роль принадлежит метеорологическим факторам (температуре воздуха, ветровому режиму, осадкам) и температуре ММП, а определяющим механизмом продольного нарастания стока взвешенных наносов служит термоэрозионное разрушение берегов, сложенных ММП. Показано, что за период 2000–2024 гг. скорость береговых переформирований возросла на 66 %, а наибольшие скорости приурочены к участкам, сложенным ледовым комплексом.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационного исследования в соответствии с поставленными целью и задачами.

4. Научная новизна результатов

Научная новизна работы не вызывает сомнений. Впервые оценки стока взвешенных наносов получены не для отдельных контрольных створов, как это делалось ранее, а для всей русловой сети дельты при различной водности реки. Впервые для дельты Лены установлено систематическое продольное увеличение концентрации взвешенных наносов и показана его связь с термическим разрушением берегов, сложенных ММП. На основе сопоставления 1964, 2000 и 2024 гг. количественно оценены темпы разрушения берегов и обоснована определяющая роль русловых деформаций в пространственной трансформации стока взвешенных наносов. Разработанный методический комплекс позволил впервые дать инструментально обоснованную оценку суммарного выноса взвеси в море Лаптевых, уточняющую прежние расчеты по замыкающему створу г/п Кюсюр.

5. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность полученных результатов обеспечена калибровкой и верификацией дистанционных алгоритмов по натурным экспедиционным данным, собранным в дельте Лены в 2022 и 2024 гг. В работе использованы данные наблюдений на постах Росгидромета и ArcticGRO, материалы Тиксинской ЦГМС, результаты мониторинга температуры ММП по скважине на о. Самойловский, базы спутниковых снимков Landsat и Sentinel-2, цифровые модели рельефа и данные реанализа. Используемые автором методы – граф-теоретический подход к расчету распределения стока, дистанционные алгоритмы оценки концентрации взвешенных наносов, статистические критерии Спирмена и Пирсона, Манна–Уитни и Петтитта – научно

обоснованы, а результаты сопоставлены с литературными данными и материалами российско-германских экспедиций.

Положения работы прошли апробацию на 12 российских и международных конференциях. По теме диссертации опубликовано 11 работ в журналах рекомендованных ВАК, из которых 5 статей в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science.

6. Практическая значимость результатов работы

Практическая значимость работы состоит в возможности их использования при оценке устойчивости арктических берегов и прогнозе трансформации дельтовых экосистем в условиях изменения климата. Определение морфодинамически активных зон и опасных участков отступания берегов необходимо для оценки угроз сокращения площади угодий Усть-Ленского государственного природного заповедника и для традиционного природопользования коренных народов Севера.

Понимание эрозионно-аккумулятивных процессов в рукавах имеет практическую значимость для поддержания судоходства и устойчивого функционирования маршрутов северного завоза, а уточненные оценки стока взвешенных наносов востребованы при анализе воздействия на водно-биологические ресурсы прибрежных и шельфовых экосистем моря Лаптевых. Предложенные дистанционные методы потенциально применимы и к другим арктическим дельтам.

7. Замечания и пожелания

1. Проверка модели распределения расходов воды выполнена преимущественно для истоков главных рукавов при расходах в вершине дельты 16–31 тыс. м³/с; ее точность для высокой водности и нижней части дельты не показана (с. 60–63). При верификации спутниковых оценок концентрации взвеси получены MAPE 58% для Sentinel-2 и 34,5% для Landsat, NSE соответственно −0,28 и −0,01 (с. 70). Автор обоснованно отмечает несинхронность большинства проб и снимков, при этом одна синхронная проба не позволяет установить точность метода для всего диапазона условий. Необходимо показать, как ошибки оценок расходов воды и концентрации взвешенных наносов учтены в итоговой оценке стока наносов.
2. На с. 63 область применимости модели ограничена верхней и средней частями дельты вне морского подпора, а участки определения концентрации выбраны на удалении от морского края (с. 75–76). Однако результат главы 4 интерпретируется как поступление наносов непосредственно в море Лаптевых. Необходимо обосновать перенос оценки через нижний участок дельты с учетом возможной аккумуляции, взмучивания и других процессов. Полезно сопоставить расчеты при одинаковых пространственных и сезонных границах с работой Hines и Piliouras [2024], получившими иной знак баланса наносов.
3. Оценка годового стока взвешенных наносов основана на доступных безоблачных снимках и сезонном осреднении. В работе отмечены недоучет периода ледохода и компенсация разнонаправленных расхождений (с. 115–117), поэтому среднее расхождение 9,5% с наблюдениями другого периода не характеризует точность годового расчета. Требуется показать обеспеченность снимками по месяцам и расходам и обоснование добавки по зимнему периоду. Нужно оценить, сохраняются ли знак и величина дополнительного выноса 0,5–2,0 млн т/год при совместном учете ошибок.
4. Почему при ограниченности данных для калибровки и верификации зависимостей концентрации взвешенных наносов от коэффициентов отражения (с. 67–72) не обсуждается возможность использования измерений, представленных в работе Fedorova et al. [2015]?
5. Сопоставление пространственного распределения концентрации взвешенных наносов с участками береговых разрушений представлено только для Трофимовской

протоки по одному снимку Landsat 8 от 27 августа 2020 г. (с. 149–151). Не обоснован выбор этой даты и протоки. Воспроизводится ли выявленная связь по снимкам других дат и в других рукавах дельты?

6. В тексте, таблицах и автореферате имеются расхождения. В табл. 2.1 разность измеренных и смоделированных расходов Трофимовской протоки составляет 2138, а не 138 м³/с, соответственно в процентах это 14.2%, а не 6.5%, что влияет на осредненные показатели ошибок по всем протокам. Для единственной синхронной пробы значения 6,09 и 2,77 мг/л в тексте названы процентными ошибками, хотя в табл. 2.2 приведены 44,6 и 20,3% (с. 71–72; автореферат, с. 12), что противоречит утверждениям, что «синхронные подспутниковые наблюдения демонстрируют минимальную относительную ошибку» и «основной источник погрешности – временной лаг между отбором проб и датой снимка». Не изменит ли это итоговые расчеты и выводы? Последний столбец табл.4.8 содержит массу в млн т, хотя подписан как проценты. На с. 145 заявлено 49 участков берегов, тогда как в таблице 5.7 перечислено 47.

8. Заключение по диссертации

Отмеченные замечания не снижают общей научной и практической значимости выполненного исследования. Диссертационная работа Прокопьевой Кристины Николаевны «Трансформация стока воды и взвешенных наносов в дельте р. Лены в условиях изменяющегося климата» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научном уровне. Автореферат в полной мере отражает основное содержание и результаты диссертации.

Работа полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а также паспорту ВАК по специальности 1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия.

Таким образом, соискатель Прокопьева Кристина Николаевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата географических наук по специальности 1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия.

Официальный оппонент:
кандидат географических наук по специальности 25.00.27. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия
ведущий научный сотрудник лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук (ИМЗ СО РАН)

_____ / Лебедева Людмила Сергеевна

«19» октября 2026 г.

Адрес: 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, ИМЗ СО РАН
тел.: +7 (921) 762-41-23
e-mail: lyudmilaslebedeva@gmail.com

Подпись к.г.н., в.н.с Лебедевой Людмилы Сергеевны заверяю:

Ученый секретарь ИМЗ СО РАН _____ Кутз Н.А.

М.П.

«19» октября 2026 г.