

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Иванов Виктор Алексеевич

**Формирование стока наносов рек
криолитозоны России**

1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2025

Диссертация подготовлена на кафедре гидрологии суши
географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель – ***Чалов Сергей Романович,***
доктор географических наук

Официальные оппоненты – ***Корытный Леонид Маркусович,***
доктор географических наук, главный научный
сотрудник Института географии Сибирского
отделения Российской академии наук

Брушков Анатолий Викторович,
доктор геолого-минералогических наук,
заведующий кафедрой геоэкологии
геологического факультета Московского
государственного университета имени
М.В. Ломоносова

Георгиади Александр Георгиевич,
кандидат географических наук, ведущий
научный сотрудник Института географии
Российской академии наук

Защита диссертации состоится «25» декабря 2025 г. в 15 часов 00 минут
на заседании диссертационного совета МГУ.016.2 Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1,
Ленинские горы д. 1, ГЗ МГУ, Географический факультет, 18 этаж, ауд. 1801.

E-mail: Diss1102MSU@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной
библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на
портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3673>

Автореферат разослан « » ноября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук

А.В. Ольчев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Многолетнемерзлые породы занимают более 65% территории России, 11 млн км² [Национальный..., 2007]. Их наличие предопределяет специфику эрозионных и русловых процессов: мерзлые грунты характеризуются высокой льдистостью и низкой устойчивостью к внешним воздействиям при оттаивании [Шушерина и др., 1975]. В этих условиях водные потоки оказывают не только механическое, но и термическое разрушающее воздействие, что определяет особые механизмы формирования стока наносов [Попов, 1959; Воскресенский, 2001; Познанин, 2012]. Разрушение многолетнемерзлых пород приводит к высвобождению законсервированного в мерзлоте углерода и парниковых газов [Zimov et al., 1997], что, в свою очередь, влияет на климатическую систему. В текущих условиях наблюдается стремительная деградация мерзлоты: за последние десятилетия температура многолетнемерзлых пород в России повысилась на 1–2°C, а на Европейском Севере ее южная граница сместилась к северу до 80 км. Прогнозируется, что к 2050 году площадь распространения многолетнемерзлых пород в Северном полушарии сократится на 15–20%, а ее граница сместится на северо-восток на 150–200 км [Aalto et al., 2018; Obu et al., 2019; Брушков и др., 2024]. Увеличение глубины сезонного протаивания, рост продолжительности безморозного периода приводит к изменению динамики процессов формирования стока наносов [Zhang et al., 2021]. При этом характер влияния деградации многолетнемерзлых пород на режим эрозионных и русловых процессов и сток наносов рек криолитозоны изучен крайне слабо [Ielpi et al., 2023]. Помимо этого, на текущий момент исследования процессов формирования стока наносов в криолитозоне носят фрагментарный характер и сосредоточены на оценках геохимического материкового стока [Gordeev, 2006], русловых процессах [Чалов, 1979] и величине речного стока наносов [Syvitski, Kettner, 2011]. При этом комплексный, балансовый подход к изучению стока наносов в криолитозоне разработан недостаточно. Под балансовым подходом понимается количественная оценка всех компонентов системы – поступления, транспорта и аккумуляции наносов, что позволяет перейти от описания разрозненных процессов к созданию целостной прогнозной модели и оценкам влияния мерзлоты как фактора, контролирующего динамику и объем стока наносов в криолитозоне.

Степень разработанности темы исследования. Изучение процессов формирования и транспорта наносов, эрозионных и русловых процессов, как основных составляющих стока наносов для рек криолитозоны имеет глубокие исторические корни. Еще в конце XIX века в процессе освоения обширных

северных территорий российскими учеными были начаты первые системные исследования многолетнемерзлых пород и связанных с ними экзогенных процессов. Импульсом к изучению эрозионных процессов криолитозоны стало освоение нефтяных и газовых месторождений Западной Сибири. Тогда были созданы региональные научные обобщения, монографии, справочники, карты эрозионных процессов в пределах криолитозоны [Косов, 1959; Суходровский, 1979; Термоэрозия... 1982; Геокриологическая карта СССР..., 1996]. В исследованиях эрозионных процессов криолитозоны данного периода принято выделять следующие направления: теплофизическое, физико-механическое, гидрологическое, геолого-географическое [Унаниян, 2011].

Суть теплофизического направления заключается в исследовании теплового воздействия водного потока на мерзлый грунт. Механизм термоэрозии принято рассматривать с позиций влияния состава, строения и свойств мерзлых грунтов на интенсивность протекания этого процесса при заданной кинетической энергии условных водных потоков. Большую роль в развитие данного направления исследования внесли труды А.И. Воейкова, Б.Н. Городкова, С.Г. Пархоменко, Н.Г. Бобова, Г.Ф. Грависа, Т.Н. Каплиной, С.П. Качурина, С.С. Коржуева, В.А. Кудрявцева, В.Л. Суходровского, Ф.Э. Арэ, А.Н. Толстова, С.В. Томирдиаро, Д.В. Малиновского, В.К. Данько, В.Н. Конищева, В.В. Рогова.

В физико-механическом направлении ученые уделяли особое внимание гранулометрическому и химикоминеральному составу подстилающих пород, криогенному строению мерзлой толщи, плотности, льдистости и другим параметрам мерзлого грунта, определяющим его размываемость. Важными трудами являются работы исследователей Д.Е. Ершова, Д.Г. Виленского, Т.Г. Жордания, Г.С. Золотарева, П.Е. Мирцхулавы. Их содержание зачастую включает описание и анализ лабораторных экспериментов по размыву мерзлых грунтов.

В гидрологическом направлении рассматриваются вопросы учета влияния гидравлических параметров стока на эрозионные и русловые процессы криолитозоны, а также особенности формирования стока наносов за счет бассейновой и русловой составляющей баланса наносов. Большой вклад в развитие данного направления внесли работы Н.И. Маккавеева, Р.С. Чалова, А.А. Зайцева, М.С. Кузнецова, Г.С. Золотарева, В.С. Круподерова, П.Е. Мирцхулавы, Н.Н. Бобровицкой, А.П. Дедкова, В.И. Мозжерина, Н.И. Тананаева.

В геолого-географическом направлении устанавливаются особенности закономерностей и количественных связей водно-эрозионного процесса со

спецификой геологических, геоморфологических, климатических и почвенно-растительных условий. В работах данного направления представлены особенности развития эрозии в криолитозоне, приведены сведения об образующихся термоэрозионных формах рельефа, скоростях их образования и роста, указываются причины развития данного процесса. Данное направление отражено в работах С.Г. Пархоменко, М.И. Сумгина, С.В., Калесника, С.С. Коржуева, С.П. Качурина, В.Л. Суходровского, Н.В. Романовского, Г.Ф. Грависа, Б.Ф. Косова, Г.С. Константиновой, Б.П. Любимова, В.Г. Чигира, Ф.Э. Арэ, К.С. Воскресенского, М.О. Лейбман, А.Ю. Сидорчука, В.Л. Познанина.

За рубежом особенности эрозионных и термических процессов в криолитозоне представлены в работах T. Zhang, E. Godin, D. Fortier, H. Toniolo, W.B. Bowden, S. Lamoureux; исследования русловых процессов отражены в работах E. Gautier, E.C. Geyman, J.C. Rowland, K.M. Scott, B.M. Jones, T.E. Osterkamp, Y. Shur, J.P. McNamara, D.L. Kane, S. Stettner, L.W. Gatto, K.B. Lininger, E. Wohl, J.T. Crawford, E.H. Stanley, L. Zheng, A.M. Cunliffe, F. Costard, L. Dupeyrat; особенности развития специфических для криолитозоны процессов криогенного оползания и термокарста описаны в работах J. Strauss, A. Morgenstern, I. Nitze, M. Fuchs, F. Günther, M. Kanevskiy, S.V. Kokelj, A.K. Liljedahl, J.L. Ramage, A.C. A. Rudy, A. Blais-Stevens, C.R. Burn, A.G. Lewkowicz, Y. Shur.

Таким образом, накоплен значительный опыт изучения формирования стока наносов в криолитозоне. Проведение исследований в этом направлении позволило выявить механизмы взаимодействия водных потоков с мерзлыми породами, зависимость размыва грунтов от их льдистости и криотекстуры, а также описать специфические формы рельефа, что заложило основу современных представлений о влиянии мерзлоты на формирование стока наносов. Однако единая концепция, определяющая роль криолитозоны в эрозионных процессах, не сформирована. Не разработаны комплексные классификации процессов и масштабные количественные оценки вклада каждого из них в баланс наносов. Существуют значительные противоречия между региональными оценками, свидетельствующими либо об интенсификации эрозии грунтов (в частности, разрушения берегов рек) в условиях распространения многолетнемерзлых пород, либо об их ослаблении. Существующие сведения о компонентах баланса наносов рек криолитозоны остаются фрагментарными.

Данная работа направлена на устранение этих пробелов путем разработки классификации процессов, количественной оценки вклада различных источников наносов и создания балансовой модели формирования стока, адаптированной для рек криолитозоны.

Целью настоящей работы является количественная оценка и выявление особенностей формирования стока наносов рек криолитозоны.

Задачи работы:

1. Типизировать основные процессы формирования стока наносов рек криолитозоны и ареалы их проявления.
2. Разработать методику региональных оценок составляющих баланса наносов для бассейнов рек криолитозоны.
3. Численно оценить компоненты баланса наносов для бассейнов рек криолитозоны и определить роль бассейновой и русловой составляющей стока наносов.
4. Определить влияние многолетнемерзлых грунтов на процессы формирования стока наносов.

Объект и предмет исследования. Объектами исследования являются водосборы разного размера и пойменно-русловые комплексы в пределах бассейнов рек Обь, Енисей, Лена и Колыма, расположенные в зоне распространения многолетнемерзлых пород. Многолетняя мерзлота занимает значительную часть территории выбранных бассейнов: 45% для Оби, 68% для Енисея, 95% для Лены и 100% для Колымы [Obu et al., 2019] и определяет уникальные условия формирования стока наносов.

Предметом исследования являются процессы формирования стока наносов в бассейнах крупнейших рек криолитозоны России. Бассейновая составляющая была определена для водосборных пространств рек Обь, Енисей, Лена и Колыма (9,3 млн. км²), русловая составляющая – для 110 тыс. км русловой сети, т.е. для всех водотоков с среднегодовым расходом воды более 30 м³/с.

Материалы и методы исследования. В данной работе были проанализированы и использованы глобальные базы данных (далее по тексту – БД), посвященные мерзлотным характеристикам, такие как: БД ледовых комплексов [Strauss et al., 2021], БД обнажений пластовых льдов [Streletskaia et al., 2003], каталог термоэрозионных цирков DARTS [Nitze et al., 2024] и [Runge et al., 2022]. Для анализа рельефа применялись цифровые модели рельефа FABDEM [Hawker, Neal, 2021], ArcticDEM [Porter et al., 2023], GMTED2010 [Danielson, Gesch, 2011], а также глобальные БД гидрографической информации HydroBASINS [Linke et al., 2019], HYDROAtlas [Linke et al., 2019], GRWL [Allen, Pavelsky, 2018], GSWE [Pekel et al., 2016].

Для оценки факторов эрозионных процессов были использованы БД характеристик почв SOILGRIDS [Hengl et al., 2017] и FAO SOILS [FAO, 2006], карта подстилающего покрова ESA WorldCover [Zanaga et al., 2022],

OpenStreetMap [OpenStreetMap contributors, 2015] и горных областей GMBA [Snethlage et al., 2022], карты эродирующего потенциала осадков и снега Г.А. Ларионова [Методические..., 1996]. Для расчета плоскостного смыва применялись программные комплексы WATEM-SEDEM [Notebaert et al., 2006] и Erosion [Методические..., 1996]. Для проверки и валидации расчётов учитывались данные о стоке наносов по 35 постам сети Росгидромета за период 1970–1990 гг. В работе также использовались данные, полученные при участии автора в ходе экспедиций, организованных кафедрой гидрологии суши Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, НИЛ Эрозии почв и русловых процессов, ИМЗ СО РАН им. Мельникова за 2019–2023 гг. в бассейнах рек Обь, Пур, Надым, Енисей, Лена и Колыма.

Анализ данных был проведен с применением различных методов статистического анализа при использовании программных комплексов ArcGIS Pro, QGIS Desktop 3.34.3, SAGA GIS 9.3.1 и RStudio 2023.12.1. Полученные оценки компонент баланса наносов представляют собой среднегодовые и среднемноголетние значения на период начала XXI века в эпоху изменения климата.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

1. Для проведения количественных оценок компонент баланса наносов и определения степени влияния мерзлоты на процессы формирования стока наносов для рек криолитозоны была предложена их новая классификация, основанная на балансовом подходе, учитывающая условия и области проявления и существенно дополняющая предложенные ранее классификационные схемы.

2. Разработана методика расчета стока наносов для рек криолитозоны и осуществлена ее реализация в виде авторской балансовой модели, основанной на использовании материалов дистанционного зондирования и глобальных баз данных, выполнена апробация модели к разным пространственным уровням рассматриваемых территорий, проведена калибровка и валидация модели по данным сетевых наблюдений за стоком взвешенных наносов.

3. Впервые с использованием балансовой модели выполнены оценки бассейновой и русловой составляющих баланса наносов рек бассейнов Оби, Енисея, Лена и Колымы и предложены принципиально новые подходы к районированию территории криолитозоны по модулю бассейновой составляющей стока наносов и условиям формирования стока наносов.

4. На новом информационном уровне (для более чем на 110 тыс. км речной сети) выполнены определения горизонтальных деформаций русел рек со среднегодовыми расходами воды более 30 м³/с, что позволило впервые на

столь обширном материале получить сравнительные оценки размыва берегов и массы наносов, поступающих в результате русловой эрозии, в криолитозоне и за ее пределами. Таким образом, впервые дана статистически обоснованная оценка влияния многолетнемерзлых пород на темпы размыва берегов.

Научная и практическая значимость результатов. В диссертации предложена классификация процессов формирования стока наносов для рек криолитозоны, основанная на балансовом подходе. Разработанная методика численных оценок стока наносов с помощью сочетания данных дистанционного зондирования, глобальных геоинформационных баз данных, существующих моделей и авторских расчетных алгоритмов, вносит вклад в развитие представлений о процессах формирования стока наносов, а также уточняет роль мерзлотных факторов в формировании стока наносов для рек криолитозоны.

Защищаемые положения:

1. Балансовая модель, основанная на глобальных геоинформационных базах данных, позволяет оценить основные процессы формирования стока наносов рек в масштабах крупных речных бассейнов криолитозоны.

2. Многолетнемерзлые грунты определяют региональные особенности формирования бассейновой составляющей стока наносов, до 5 раз увеличивая ее модуль по сравнению с реками, протекающими за пределами криолитозоны.

3. В криолитозоне интенсивность горизонтальных деформаций возрастает в среднем на 40–55%, степень этого увеличения отличается на реках разного размера.

4. Доля русловой составляющей в стоке наносов возрастает на реках, протекающих в условиях сплошного большего распространения многолетней мерзлоты, увеличиваясь на север и северо-восток.

Личный вклад автора заключается в участии в натурных исследованиях процессов формирования стока на следующих объектах: нижние течения р. Обь (г. Салехард) и р. Енисей (г. Игарка) в 2019 г., р. Лена (г. Якутск – пер. Сахам) в 2020 г., верховья р. Колымы, в т.ч. водосбор руч. Контактный (Магаданская область) в 2021 г., реки бассейна оз. Байкал в 2022 г., малые реки п-ова Ямал (по маршруту трассы Салехард – Новый Уренгой) в 2023 г.; в создании программного комплекса на языке R для оценки стока наносов и процессов, его формирующих; в апробации и калибровке модели; в подготовке исходных материалов в ГИС ArcGIS Pro, QGIS Desktop 3.34.3 и исходных данных, карт факторов формирования стока наносов на территории водосборов рек Обь, Енисей, Лена, Колыма, включая определение площадей размывов рек на 110 000 км и создание базы данных водосборов водохранилищ по материалам OpenStreetMap; в расчетах компонент баланса наносов с помощью авторского

программного комплекса для 3886 малых водосборов бассейнов рек Обь, Енисей, Лена, Колыма.

Публикации. Результаты работы отражены в 6 публикациях, в том числе в 4 статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ.016.2 по специальности 1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия (по географическим наукам).

Результаты работы использованы в научном отчете по проекту РНФ «Интегральная оценка баланса наносов речной системы р. Лены» № 21-17-00181 и НИР «Потоки потенциально токсичных элементов и соединений в речных бассейнах: технологии изучения, количественная оценка и прогноз» № 075-15-2024-614.

Апробация результатов. Результаты работы доложены на 10 научных конференциях, в том числе на: «37 пленарном межвузовском координационном совещании по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов» (Рязань, 2022); «XIX Большом географическом фестивале» (Санкт-Петербург, 2023); «28th IUGG General Assembly» (Берлин, 2023); Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию образования кафедры почвоведения и ГИС БГУ и 85-летию со дня рождения профессора В.С. Аношко «Почвенные и земельные ресурсы: традиционные и инновационные подходы к изучению и управлению» (Минск, 2023); конференции «Тридцать восьмое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов» (Пермь, 2023); «Пярых Виноградовских чтениях «Гидрология в эпоху перемен»» (Санкт-Петербург, 2023); XII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование – MARESEDU 2023» (Москва, 2023); конференции «WASWAC 4th International Youth Forum on Soil and Water Conservation (IYFSWC IV)» (Шеньян, Китай, 2024); XV молодежной научной конференции «Меридиан»: географические исследования в контексте глобальных изменений, (Пушино, 2024); научной гидрологической конференции молодых ученых, посвященной 80-летнему юбилею кафедры гидрологии суши МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва, 2024); а также на научных семинарах НИЛ эрозии почв и русловых процессов и кафедры криолитологии и гляциологии МГУ имени М.В. Ломоносова.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 202 стр., текст изложен на 176 странице, включая 62 рисунка, 23 таблицы и 1 приложение. Список литературы состоит из 310 наименований, в том числе 182 на иностранных языках.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность проф., д.г.н. С.Р. Чалову за руководство диссертационной работой; к.г.н. Д.В. Магрицкому, д.г.н. чл.-корр. РАН Н.Л. Фроловой, д.г.н. В.Н. Голосову за конструктивные рекомендации и содействие в работе, а также внимание и поддержку. Особая благодарность адресуется к.г.н. А.М. Тарбеевой, к.г.н. С.Н. Харченко, к.г.н. А.И. Кизякову, к.г.н. В.В. Суркову, к.г.н. А.С. Цыпленкову за важные рекомендации в процессе подготовки работы, а также О.М. Макарьевой за предоставленные данные и содействие в их анализе. Благодарность за помощь и поддержку в работе также хотелось бы выразить д.г.н., проф. Р.С. Чалову, Д.И. Школьному, к.г.н. И.А. Голубеву, к.г.н. Н.И. Тананаеву, д.г.н. А.Ю. Сидорчуку, а также сотрудникам, аспирантам, студентам и выпускникам географического факультета МГУ, Института наук о Земле СПбГУ и всем участникам полевых исследований за вклад в работу и плодотворное сотрудничество. Автор признателен своей семье за поддержку и внимание.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Физико-географические, климатические и гидрологические особенности водосборов рек в зоне залегания многолетнемерзлых пород

В главе 1 рассмотрены природные условия территории криолитозоны России, определяющие особенности формирования стока наносов. Приведены характеристики многолетнемерзлых пород, их строение, льдистость и распространение на территории бассейнов рек криолитозоны. Рассмотрены и описаны физико-географические, климатические и гидрологические условия.

Глава 2. Процессы формирования и транспорта стока наносов рек криолитозоны

Глава 2 посвящена анализу процессов формирования стока наносов, характерных для рек криолитозоны. В литературе предложено несколько классификаций экзогенных процессов, представленных в известных работах С.Е. Гречищева и др. [1984], К.С. Воскресенского [2001], В.Л. Познанина [2012], В.П. Мельникова [2016] и современных систематизаций, описанных в работах [Zhang et al., 2022; Tananaev, Lotsari, 2022]. Эти научные источники охватывают широкий спектр криогенных, флювиальных и склоновых процессов, однако они преимущественно ориентированы на морфологические и генетические признаки и не отражают их функциональной роли в формировании стока наносов, что подтверждает необходимость разработки новой схемы. Предложенная в работе классификация основана на балансовом

подходе и учитывает все ключевые аккумуляционные и денудационные процессы, определяющие поступление материала в эрозионно-русловую сеть. Она имеет иерархическую структуру в 4 уровня, системно разделяя все процессы на две главные компоненты – бассейновую и русловую (I уровень), с их последующей детализацией по макроформам рельефа (II уровень), формам рельефа по их участию в каскадной системе переноса наносов на водосборе (III уровень), что позволяет комплексно учесть все многообразие эрозионно-аккумулятивных процессов (IV уровень) (рис. 1).

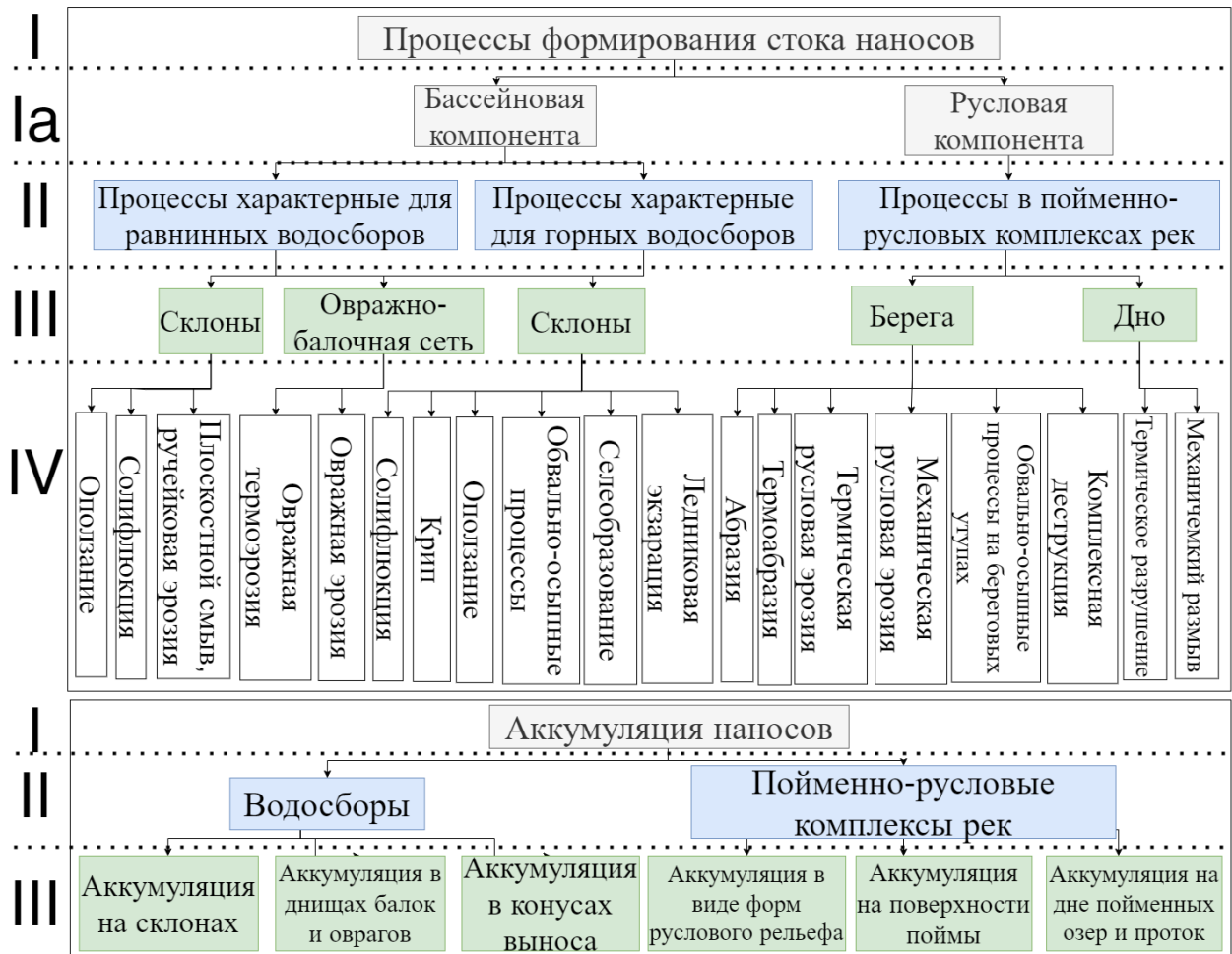


Рисунок 1. Балансовая классификация процессов формирования стока наносов в криолитозоне

На основе полученной классификации были составлены уравнения балансов наносов, адаптированные для условий криолитозоны и учитывающие разный характер основных процессов для каждой выделенной зоны – для равнинных водосборов (1), горных (2), определяющих бассейновую составляющую стока наносов $W_{бас}$, и речных долин (3), определяющих транспорт наносов по русловой сети $W_{русл}$:

$$W_{п} + W_{овр} + W_{оп} - A_{бас} = R + G, \quad (1)$$

где W_{Π} – масса мобилизованного вещества в результате процесса плоскостного смыва, т/год; $W_{\text{овр}}$ – масса мобилизованного вещества в результате процесса овражной эрозии, т/год; $W_{\text{оп}}$ – масса мобилизованного вещества в результате оползневых процессов, $A_{\text{бас}}$ – аккумуляция наносов на склонах водосбора, локальных понижениях, конусах выноса и пр., т/год; R – сток взвешенных наносов, т/год; G – сток влекомых наносов, т/год.

$$W_{\text{ледн}} + W_{\text{об-ос}} + W_{\text{кр}} + W_{\text{сол}} + W_{\text{эр}} - A_{\text{скл}} = R + G, \quad (2)$$

где $W_{\text{ледн}}$ – масса мобилизованного вещества в результате процесса ледниковой экзарации, т/год; $W_{\text{об-ос}}$ – масса мобилизованного вещества в результате обвально-осыпных процессов, т/год; $W_{\text{кр}}$ – масса мобилизованного вещества в результате крипа, т/год; $W_{\text{сол}}$ – масса мобилизованного вещества от процессов солифлюкции, т/год; $W_{\text{эр}}$ – масса мобилизованного вещества от процессов водной эрозии, т/год; $A_{\text{бас}}$ – аккумуляция наносов на склонах водосбора, локальных понижениях, конусах выноса и пр.;

$$W_{\text{бас}} - A_{\text{бас}} + W_{\text{русл}} - A_{\text{русл}} - A_{\text{пойм}} = R + G, \quad (3)$$

где $W_{\text{бас}}$ – масса наносов, поступающая в речную долину с бассейна, т/год; $W_{\text{русл}}$ – масса наносов, поступающая в результате русловой эрозии т/год; $A_{\text{бас}}$ – масса наносов, аккумулируемая в пределах водосбора, т/год; $A_{\text{русл}}$ – масса наносов, аккумулируемая в русле, т/год; $A_{\text{пойм}}$ – масса наносов, аккумулируемая на пойме, т/год.

Глава 3. Модель формирования стока наносов рек криолитозоны

Разработанная балансовая классификация послужила концептуальной основой для создания математической модели формирования стока наносов, реализованной в виде программного комплекса на языке R, где каждый выделенный процесс (составляющее уравнений (1–3) находит свое прямое отражение в виде отдельного расчетного модуля. Концептуальная схема модели, иллюстрирующая последовательность расчетов, представлена на рис. 2, а все использованные материалы и формулы представлены в табл. 1.

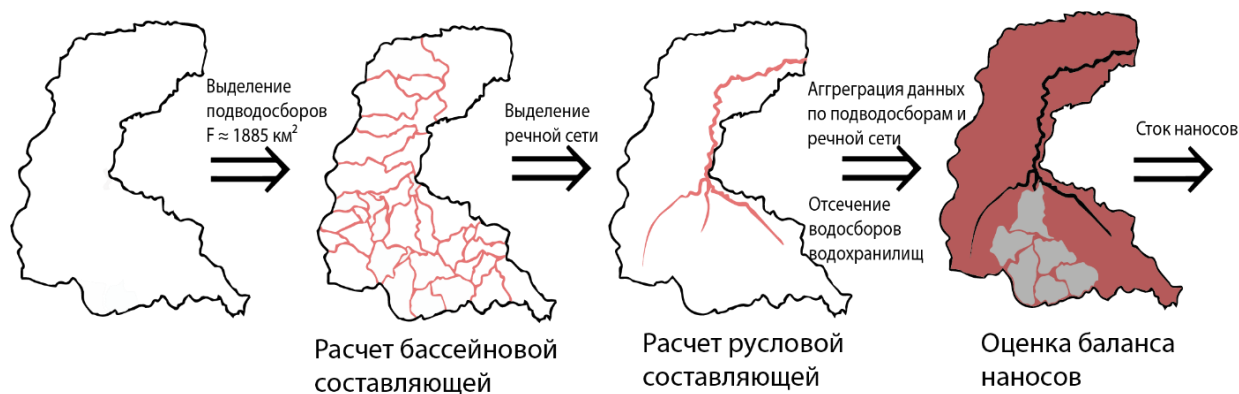


Рисунок 2. Структура проводимых расчетов

Таблица 1. Используемые ресурсы для модели формирования стока наносов

		Компонента	Формула	Источники данных
Равнинные водосборы	Бассейновая $W_{\text{бас}}$	$W_{\text{ливн}}$	$W_{\text{ливн}} = R K L S C$ [Wischmeier, Smith, 1978]	Карта ЭПО [Ларионов, 1993], Карта почв SOIL GRIDS [Hengl et al., 2017], ЦМР FABDEM [Hawker, Neal, 2021], Карта подстилающего покрова Esa-Worldcover [Zanaga et al., 2022]
		$W_{\text{тал}}$	$W_{\text{тал}} = f(H, K, L) \cdot f(I) \cdot C_T \cdot M$ [Методические указания ..., 1996]	ЦМР GMTED 2010 [Danielson, Gesch, 2011], Карта талого стока, ручная интерполяция [Ларионов, 1993], Почвенная карта FAO HWSO [FAO, 2006], Карта подстилающего покрова GlobCover 2009 [Bontemps et al., 2011]
		$W_{\text{овр}}$	$W_{\text{овр}} = \sum_i^n \frac{F_{\text{овр}i} F_i w \rho a_i}{\tau}$	Карта овражности [Национальный ..., 2007], Карта льдистости [Brown et al., 2001], Характеристики форм оврагов [Vanmaercke et al., 2016; Milliman, Farnsworth, 2011; Wilkinson et al., 2005]
		$W_{\text{оп}}$	$W_{\text{оп}} = \sum_i^n \frac{S_i h_i \rho_i}{t}$	Каталоги криогенных оползней DARTS [Nitze et al., 2024b; Runge et al., 2022a], ЦМР ArcticDEM [Porter et al., 2023]
		$A_{\text{бас}}$	$A_{\text{бас}} = W_{\text{бас}} - TC$ $TC = ktc \cdot R \cdot K \cdot (LS - 4.12 \cdot Sg^{0.8})$ [Notrebaert et al., 2006]	Карта ЭПО [Ларионов, 1993], Карта почв SOIL GRIDS [Hengl et al., 2017], ЦМР FABDEM [Hawker, Neal, 2021]
		$W_{\text{об-оп}}$	$W_r = \sum_{i=1}^n W_i \cdot SDR_i$ $SDR_i = \frac{SDR_{\text{max}}}{1 + \exp\left(\frac{IC_o - IC_i}{k}\right)}$ [Borselli, Cassi, Torri, 2008]	ЦМР FABDEM [Hawker, Neal, 2021], Базы данных скоростей процессов формирования стока наносов [Евсеева, Окишев, 2010; Успенский, 2024; База данных..., 2025]
	Горные водосборы	$W_{\text{кр}}$		
		$W_{\text{сол}}$		
		$W_{\text{эр}}$		
		$W_{\text{ледн}}$		
		$A_{\text{бас}}$		
Долины рек	Русловая	$W_{\text{русл}}$	$W_{\text{русл}} = \sum_{i=1}^n \frac{S_{\text{разм}i} \cdot (h_{\text{б}i} + h_{\text{п}i}) \rho_{\text{отл}i} a_i}{\Delta t}$	Площади размывов GSWE [Pekel et al., 2016], ЦМР FABDEM [Hawker, Neal, 2021], Базы данных гидрографической информации HYDROAtlas [Linke et al., 2019], GRWL [Allen, Pavelsky, 2018], Карта «Русловые процессы
		$A_{\text{русл}}$	$A_{\text{русл}} = \sum_{i=1}^n \frac{S_{\text{акк}i} \cdot (h_{\text{б}i} + h_{\text{п}i}) \rho_{\text{отл}i} a_i}{\Delta t}$	

			на реках СССР», Карта льдистости [Brown et al., 2001]
		$A_{\text{пойм}}$	$A_{\text{пойм}} = S_{\text{пойм}} h_{\text{пойм}} \rho \cdot 10^{-6}$ Карты площадей затопления GLOFAS [Emerton et al., 2018], Карта «Русловые процессы на реках СССР»

Обозначения в таблице 1: $W_{\text{ливн}}$ – объем ливневой эрозии, т/га/год, R – эродирующая способность дождя, МДж мм га⁻¹ час⁻¹ год⁻¹, K – эродируемость почвы, час год МДж⁻¹ мм⁻¹, LS – фактор рельефа, определяемый через длину склона и уклон, безразм., C – противоэрозионная защита подстилающего покрова (растительности), безразм.; для расчета каждого из данных факторов была использована уникальная методика расчета; $W_{\text{тал}}$ – средняя многолетняя величина смыва от стока талых вод, т/га/год, H – слой поверхностного склонового стока, зависящий от запасов воды в снеге, осадков во время снеготаяния и коэффициента стока, мм, K – эродируемость почвы, т/га/ед., L – длина склона, м, I – крутизна склона, безразм., C_T – эрозионный индекс культуры или агрофона, представляющий собой отношение смыва с поля, занятого культурой (агрофоном) к смыву с поля зяби, вспаханного вдоль склона, M – коэффициент почвозащитной эффективности противоэрозионной меры, определяемый как отношение смыва с поля, занятого культурой или агрофона, на котором применяется противоэрозионный прием, к смыву с аналогичного поля, на котором противоэрозионный прием не применялся, а обработка почвы и посев проводятся вдоль склона; $W_{\text{овр}}$ – объем наносов, поступающих с овражной эрозией кг/год; i – малый водосбор, n – количество малых водосборов внутри бассейна, $F_{\text{овр}}$ – густота эрозионной сети км/км²; F_i – площадь водосбора, км²; w – средняя поперечная площадь оврага, м² p – плотность отложений, a – льдистость отложений, безразм., τ – среднее время развития оврага, лет; $W_{\text{оп}}$ – объем наносов, поступающих в результате криогенных оползней, т/год, n – число оползней на водосборе, S – площадь оползня, м², h – глубина оползня, м, ρ – плотность отложений, кг/м³, t – время образования данной формы рельефа, лет; $ТС$ – транспортирующая способность потока, тонн; k_{tc} – коэффициент транспортирующей способности, м, S_g – уклон склонов, безразм., a – эмпирический коэффициент; SDR_i – коэффициент доставки наносов i -ой ячейки, SDR_{max} – теоретически максимальная объемная доля наносов с размерностью песка или мельче; в данной работе принята за 1; IC_i – значение индекса связности потоков наносов i -ой ячейки; IC_0 – базовое значение индекса связности потоков наносов, калибровочный параметр (при IC_i выше IC_0 преобладает вынос и транзит наносов, ниже – аккумуляция; в данной работе принят $IC_0 = 0$; k – коэффициент, калибровочный параметр, отвечающий нелинейности связи между IC_i и коэффициентом доставки наносов; $S_{\text{разм}}$ – площади размыва, м²; $S_{\text{акк}}$ – площади аккумуляции наносов в виде первичной поймы, м²; $\rho_{\text{отл}}$ – плотность отложений, кг/м³, h_b – высота берега, м, h_p – средняя глубина реки, м, a – льдистость отложений, Δt – временной интервал, год; $A_{\text{пойм}}$ – масса аккумулируемого материала на пойме, тонн/год, $S_{\text{пойм}}$ – площадь поймы, м², $h_{\text{пойм}}$ – скорость осаждения материала на пойме, мм/год, ρ_a – плотность аллювия, кг/м³.

Модель состоит из четырех блоков. Первый блок отвечает за разбиение речного бассейна на элементарные подбассейны на основе БД HydroBASINS. Для каждого подбассейна, имеющего среднюю площадь в 1885 км^2 , решается уравнение баланса наносов, описывающее их поступление со склонов в речную сеть. Также на этом этапе происходит разделение подбассейнов на два типа – горные и равнинные, основанное на базе данных горных территорий GMBA.

Во втором блоке модели для каждого выделенного подбассейна происходит расчет компонент баланса наносов на водосборе по уравнениям (1) и (2) на основе эмпирико-статистических уравнений (табл. 1).

Третий этап посвящён оценке русловой составляющей стока наносов для речной сети водосборов. Для оценки массы наносов, поступающих в результате размыва берегов, и аккумуляции, в виде первичной поймы, применялся подход, базирующийся на анализе разновременных космоснимков. Масса наносов рассчитывалась как произведение площади русловых деформаций на высоту берега и плотность отложений. Аккумуляция на пойме оценивалась на основе глобальной модели затоплений GLOFAS и эмпирических оценок скоростей осаждения материала на пойме.

На заключительном этапе происходит интеграция всех смоделированных потоков по элементарным водосборам и речной сети наносов, что позволяет получить их итоговый сток для всего речного бассейна (3). При расчете для замыкающих створов исключались водосборы, расположенные выше водохранилищ и прудов, занимающих 27% площади бассейна Оби, 47% – Енисея, 15% – Колымы и 7,3% – Лены; их водосборы были выделены автором по данным OpenStreetMap [OpenStreetMap..., 2015] и БД HydroBASINS. При расчетах вклад процессов, расположенных выше водохранилищ, исключался.

Глава 4. Адаптация модели формирования стока наносов для водосборов криолитозоны

Глава 4 посвящена адаптации созданной балансовой модели формирования стока наносов для бассейнов рек Обь, Енисей, Лена, Колыма. Калибровка модели включала подбор оптимальных значений для таких ключевых параметров, ответственных за аккумуляцию наносов, как коэффициент транспортирующей способности (k_{tc}), параметры перехода между зонами эрозии и транзита (IC_0 , k), скорость аккумуляции наносов на пойме ($h_{\text{пойм}}$). Для выполнения процедуры калибровки была сформирована база данных стока наносов по 35 гидрологическим постам разного размера, из которой была

выделена обучающая выборка из 18 водосборов. Всего для калибровки модели было выполнено 7686 тестов с различным сочетанием калибровочных параметров. Сравнение со среднегодовым значением стока наносов по постам позволило вычислить метрику модуля относительной ошибки MAPE:

$$\text{MAPE} = \frac{\sum \left| \frac{\text{Sim}_i - \text{Obs}_i}{\text{Obs}_i} * 100 \right|}{n}, \quad (4)$$

где MAPE – модуль относительной ошибки моделирования, %; Sim_i – смоделированное значение среднегодового стока наносов для i -го водосбора, Мт/год; Obs_i – измеренные значения стока наносов для i -го водосбора, Мт/год; n – число водосборов.

В ходе исследования была проведена верификация как отдельных блоков модели, так и расчетных значений стока наносов. Для проверки корректности оценок бассейновой составляющей, формируемой в результате плоскостного смыва ($W_{\text{ливн}} + W_{\text{тал}}$), были использованы данные эрозионных стационаров. Сравнение показало, что на распаханых землях в районе г. Барнаула по материалам стационара Алтайского НИИСХ за 1992–2010 гг. [Вольнов и др., 2017] модель занижала эрозию на 23,5%. Сопоставление с обобщёнными данными по лесостепям и степям Западной Сибири [Литвин, 2002] выявило среднее занижение на 4%. Для сельскохозяйственных полей бассейна р. Бузим [Голубев, 2022] расчётные значения талого смыва оказались ниже наблюдаемых на 23%. Грубое разрешение снимков, пиксельная схематизация береговой линии и артефакты, связанные с изменением уровней воды и строительством, могут служить источником погрешности для оценок русловой эрозии $W_{\text{русл}}$. Сравнение площадей размывов по данным GSWE и ручной оцифровки показало, что ошибка метода варьирует от 0,4–4,1% для р. Лены до 14% для р. Оби, 20% для р. Колымы и 15% для Якутского узла р. Лены.

Сравнение смоделированных значений стока наносов с данными многолетнего мониторинга Росгидромета показало, что у 34% постов относительная ошибка составляет менее 50%, у 49% — находится в диапазоне 50–100%, а у 17% превышает 100%. Медианное значение MAPE по всем постам составляет 68%. Учитывая присущую натурным данным Росгидромета погрешность $\pm 30\%$ [Методические рекомендации..., 1961; Ресурсы ..., 1965], сопоставимую с точностью моделирования, а также тот факт, что альтернативные эмпирические методы также обладают сопоставимыми погрешностями [Лисицына, 1974; Bobrovitskaya, 1996; Шмакова, 2015; Тананаев, 2007], можно говорить о том, что полученная модель в целом адекватно воспроизводит порядок величин стока наносов.

Глава 5. Условия формирования бассейновой составляющей стока наносов для рек криолитозоны

Глава 5 посвящена исследованию условий формирования и закономерностям распределения модуля бассейновой составляющей стока наносов согласно реализации 2-го блока модели. Модуль бассейновой составляющей стока наносов (т/км^2), характеризующий интенсивность процессов формирования стока на водосборе, определен в работе как отношение суммарной годовой массы наносов бассейнового происхождения поступающих в русловую сеть, к площади водосбора.

Для исследуемых территорий он составил $3,47 \text{ т/км}^2$ (медианные значения: Обь – $8,17 \text{ т/км}^2$, Енисей – $2,58 \text{ т/км}^2$, Лена – $0,98 \text{ т/км}^2$, Колыма – $9,32 \text{ т/км}^2$). Максимальные значения ($>20 \text{ т/км}^2$) приурочены к аграрно освоенным равнинам юга Оби и Енисея, а также к районам с широким распространением ледового комплекса на севере бассейнов Енисея, Колымы и в центральной части бассейна Лены, где доминируют термические процессы и криогенные оползни. Минимальные значения ($<0,7 \text{ т/км}^2$) характерны для залесенных горных территорий с низкой освоенностью, прежде всего в южной части бассейна Лены (рис. 3).



Рисунок 3. Рассчитанное значение модуля бассейновой составляющей стока наносов для бассейнов рек Обь, Енисей, Лена, Колыма.

Красной линией обозначена граница криолитозоны по [Obi et al., 2019]

Медианные значения модуля бассейновой составляющей стока наносов для горных водосборов составляют $0,706 \text{ т/км}^2$ в криолитозоне и $0,136 \text{ т/км}^2$ за ее пределами, т.е. для горных водосборов криолитозоны наблюдается пятикратное превышение (на 418%) относительно горных водосборов за ее пределами. Для равнинных водосборов по критерию Манна–Уитни не выявлено статистически значимых различий между водосборами, расположенными в криолитозоне и за ее пределами. Медианные значения модуля бассейновой составляющей стока наносов составили $7,5 \text{ т/км}^2$ в криолитозоне и $9,1 \text{ т/км}^2$ вне ее (разница -17,5%) (рис. 4).

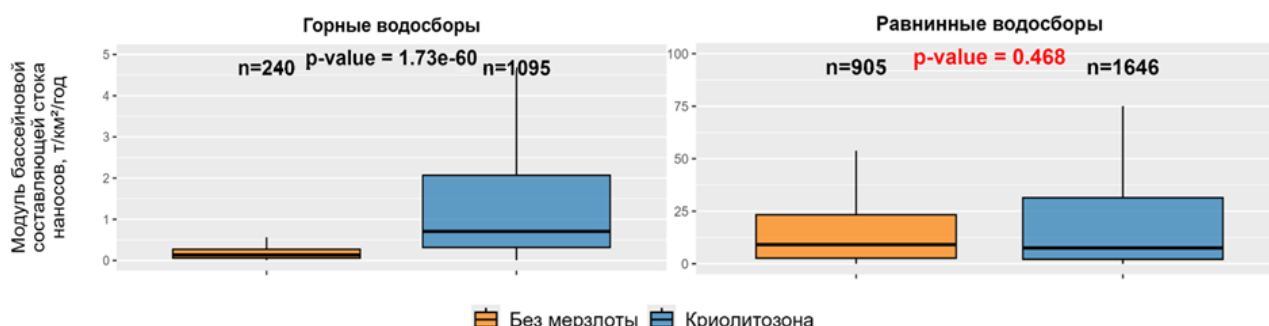


Рисунок 4. Диаграмма размаха по смоделированным значениям модуля бассейновой составляющей стока наносов для бассейнов рек Обь, Енисей, Лена, Колыма.

n – число модельных бассейнов, использованных в анализе, p-value – значимость проверки статистической гипотезы U-теста, критерия Манна–Уитни, разницы медианных значений

Формирование бассейновой составляющей определяется и другими условиями (литология, рельеф, растительность, климат), оказывающими интегральное воздействие на особенности формирования бассейновой составляющей стока наносов. Для выявления типичных комплексов условий, определяющих специфику формирования стока наносов, был использован статистический метод кластеризации k-средних и задействованы следующие характеристики подбассейнов: распаханность, залесенность, залуженность, застроенность, доля площади, занятая разреженным растительным покровом по БД ESA Worldcover [Zanaga et al., 2022], доля площади, занятая пойменными ландшафтами по [Emerton et al., 2018]; мерзлотные характеристики водосборов: доля территории входящей в состав криолитозоны и доля водосбора, расположенного в зоне сплошного залегания многолетнемерзлых пород по БД [Obu et al., 2019], доля территории занятой отложениями ледового комплекса, едомы по БД [Strauss et al., 2021]; данные о метеорологических

характеристиках, таких как эродирующая способность дождя [Ларионов, 1993]. Всего было выделено 6 групп водосборов (рис. 5).

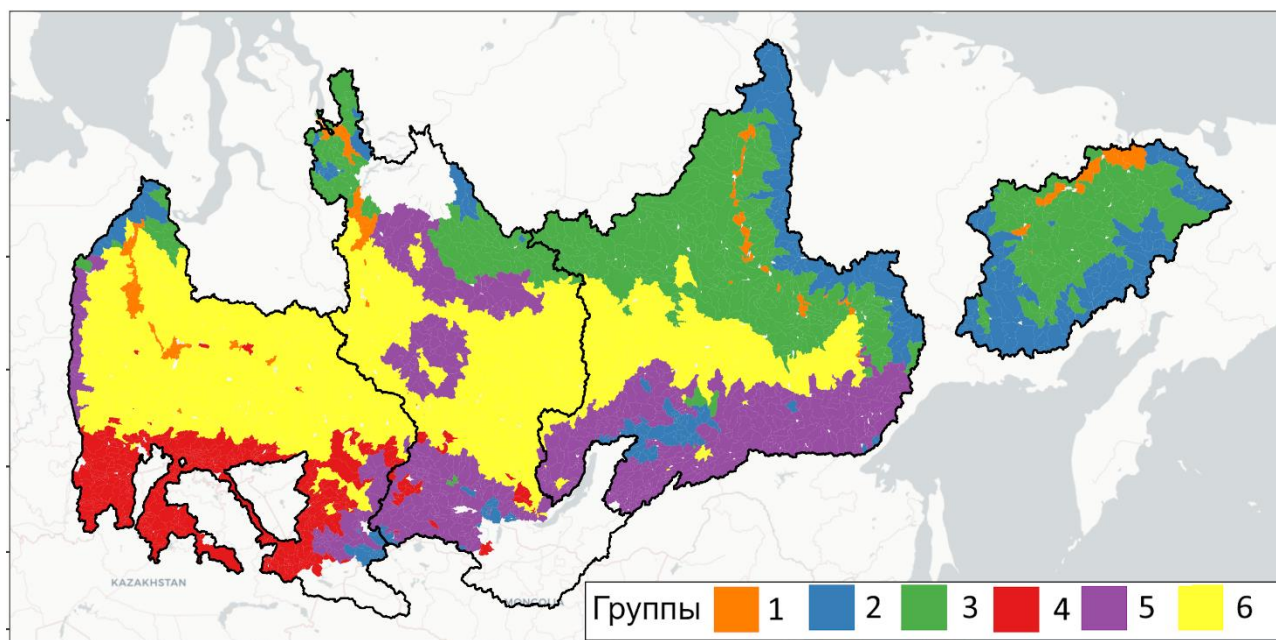


Рисунок 5. Кластерный анализ процессов формирования бассейновой составляющей стока наносов для малых водосборов

Группа 1 «Пойменные» включает в себя водосборы, значительную часть площади которых, в среднем 34%, занимают пойменные массивы нижних и средних течений больших рек Оби, Енисея, Лены и Колымы. Для этих водосборов доминирующим процессом выступает русловая эрозия (75%). Несмотря на небольшую площадь (2%), эти территории вносят значительный вклад в сток наносов (20%).

Группа 2 «Горные мерзлотные» включает в себя преимущественно горные водосборы, расположенные в верховьях Колымы, Верхоянского хребта, а также в северной части полярного Урала. На данных водосборах доминируют типичные для горных территорий процессы формирования стока наносов: обвалы и осыпи, крип и пр. (31%) и эрозия русел рек (30%). Большую роль для них также играют криогенные оползни, их доля в формировании стока наносов составляет 20%. Так, водосборы, отнесенные к этой группе, имеют высокие значения модуля стока наносов, в среднем по группе равно 48 т/км^2 . Водосборы данной группы занимают только 17% общей площади четырех крупнейших рек криолитозоны, но благодаря высокому значению модуля стока наносов обеспечивают существенный вклад в суммарный сток в 27%.

Группа 3 «Равнинные мерзлотные» включает в себя водосборы, полностью расположенные в криолитозоне. Водосборы данной группы относятся к

территориям Центрально-Якутской равнины, Колымской низменности, равнинным территориям северной части водосборов Оби и Енисея. Основной особенностью этой группы является то, что криогенное строение данных территорий и широкое распространение полигонально-жильных льдов, приводит к тому, что помимо плоскостного смыва, который является доминирующим процессом на данных территориях (48%), большую роль также играют процессы криогенного оползания, средняя доля данных процессов составляет 12%, а для отдельных водосборов данный процесс может отвечать более чем за 80% массы поступающих наносов. Тем не менее, для данных территорий характерны, в целом, низкие значения мутности (29 мг/л) и модуля стока наносов (28 т/км²), но так как водосборы этой группы занимают более 30% всей площади исследуемых бассейнов, на них приходится 21% массы поступающих наносов.

Группа 4 «Равнинные сельскохозяйственные» представлена водосборами, расположенными за пределами криолитозоны в южной части бассейнов Оби и Енисея. Данные водосборы являются наиболее сельскохозяйственно освоенными, среднее значение распаханности для них составляет 31%, в то время как для остальных групп данный показатель не превышает 1%. Доминирующую роль для данных водосборов играет плоскостной смыв (51%) со значительным преобладанием ливневого смыва над талым в соотношении 1 : 3. Для водосборов данной группы характерны наивысшие значения модуля стока наносов (72 т/км²) и мутности (80 мг/л). Занимая 10% площади, эта группа вносит 9% в суммарный сток наносов четырех бассейнов.

Группа 5 «Горные залесенные» охватывает горные районы Восточной Сибири и юга Якутии. Для данных территорий характерно высокое значение эрозионного индекса осадков: 257 МДж⁻¹ мм⁻¹, а также наибольшие абсолютные высотные отметки до 4000 м БС и более. Тем не менее, из-за относительно южного расположения, снеговая линия здесь расположена намного выше, по сравнению с территориями водосборов, отнесенных к группе 2. Поэтому склоны данных водосборов преимущественно покрыты растительностью (залесенность в среднем более 89%), что значительно сдерживает процессы формирования стока наносов. Типичные для горных территорий процессы (56%) здесь доминируют, но значение модуля стока наносов низкое – 2 т/км². Эта группа, занимающая 24% площади, вносит лишь 7% в сток наносов.

К группе 6 «Равнинные залесенные» относятся водосборы, расположенные на обширных заболоченных территориях Западно-Сибирской низменности,

равнинных частях бассейнов рек Енисей и Лена, в основном, за пределами криолитозоны. Равнинный рельеф и высокие значения залесенности (72%) для данных территорий обуславливают слабое развитие процессов формирования стока наносов. Рассчитанный средний модуль бассейновой составляющей стока наносов здесь крайне низкий и имеет значение в 19 т/км^2 , а среднегодовое значение мутности 34 мг/л . Для данных территорий доминирующими процессами формирования стока наносов выступают плоскостной смыв (54%) и эрозия русел рек (30%). Занимая 18% площади, эта группа вносит 17% в суммарный сток наносов.

Глава 6. Особенности горизонтальных деформаций в условиях распространения многолетнемерзлых пород

В Главе 6 на основе 3-го блока модели рассматривается влияние многолетнемерзлых пород на горизонтальные переформирования русел последовательно на трёх иерархических уровнях, соответствующих классификации масштабов проявления русловых процессов [Чалов, 2021]: региональном, русловом и локальном.

Анализ собранной базы данных по 110 тыс. км речной сети показывает следующие результаты. Для всех десятикилометровых участков рек бассейна Колымы средняя скорость отступления берега V_{mean} составила $0,8 \text{ м/год}$, для Лены – $0,78 \text{ м/год}$, а для Енисея и Оби – $0,52 \text{ м/год}$. Значение площадей размывов A_{mean} для участков рек бассейнов Колымы с осреднением в 10 км составила 54 тыс. $\text{м}^2/\text{год}$, для Лены – 56 тыс. $\text{м}^2/\text{год}$, для Енисея – 10 тыс. $\text{м}^2/\text{год}$ и Оби – 12 тыс. $\text{м}^2/\text{год}$. Суммарное значение V_{mean} для всех участков рек в бассейне Колымы составило 242 Мт/год, для Лены – 719 Мт/год, для Енисея – 100 Мт/год, для Оби – 309 Мт/год (рис. 6).

Статистический анализ с применением критерия Манна-Уитни выявил значимые различия ($p\text{-value} < 0.05$) в характеристиках русловых деформаций для участков русла в криолитозоне и вне ее для всех групп расходов, кроме диапазона $500\text{--}1000 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 7). Для малых и средних рек все характеристики размывов значительно выше в криолитозоне. Для рек со среднегодовым значением расходов воды в диапазоне $(30\text{--}100 \text{ м}^3/\text{с})$ масса наносов, поступающих в результате русловых деформаций, на 45% больше в криолитозоне, чем за ее пределами (медианное значение составляет 85 тыс. т/год, за пределами криолитозоны – 58 тыс. т/год), площадь размывов больше на 50% ($11,2 \text{ тыс. м}^2/\text{год}$ в криолитозоне против $7,5 \text{ тыс. м}^2/\text{год}$ за ее пределами), линейное отступление берегов больше на 55% ($0,72 \text{ м/год}$ в

криолитозоне и 0,46 м/год за ее пределами); для рек с расходами воды в диапазоне от 100 до 500 м³/с масса наносов, поступающих в результате русловой эрозии в криолитозоне, больше на 40% (78 тыс. т/год в криолитозоне против 55 тыс. т/год за ее пределами), площадь размывов больше на 38% (9,8 в криолитозоне и 7,1 тыс.м²/год за ее пределами), отступление берега больше на 42% (0,68 м/год в криолитозоне и 0,48 м/год за ее пределами). Для больших рек (1000–5000 м³/с) статистическое различие наблюдается только для линейного отступления берегов: в криолитозоне отступления больше на 60% (0,92 м/год против 0,58 м/год), хотя наблюдаются и статистически незначимые различия как по массам наносов, поступающих в результате русловых деформаций (210 тыс. т/год против 225 тыс. т/год), так и по площадям размывов (18,5 тыс. м²/год против 20,1 тыс. м²/год). Для самых крупных рек в криолитозоне (>5000 м³/с) масса наносов, поступающих в результате русловых деформаций, выше на 50% (1250 тыс. т/год против 830 тыс. т/год), площадь размывов выше на 55% (95 тыс. м²/год против 61 тыс. м²/год, $p = 0,001$); для скорости отступления берега значимые различия не выявлены.

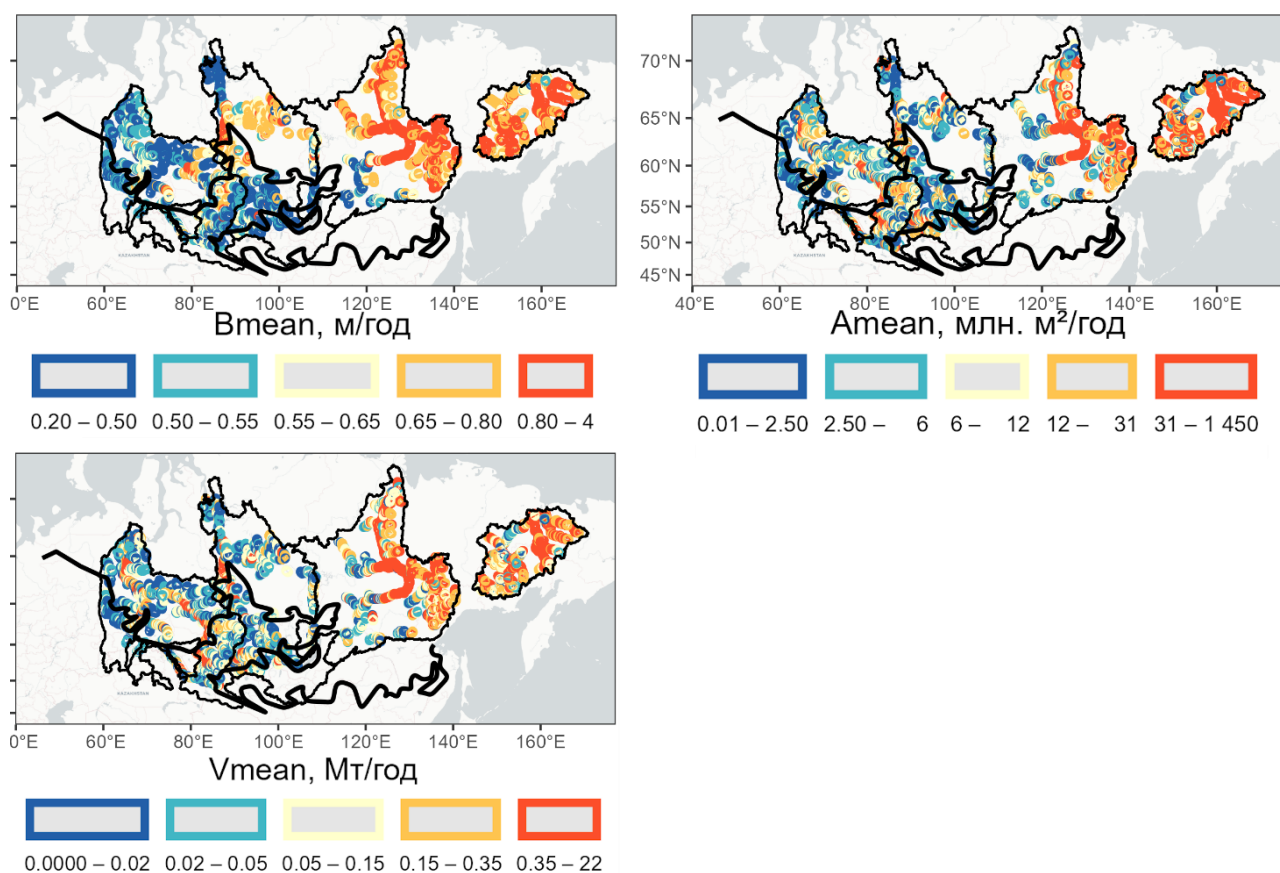


Рисунок 6. Рассчитанное значение модуля стока наносов для бассейнов рек Обь, Енисей, Лена, Колыма.

Черной линией обозначена граница криолитозоны по [Obi et al., 2019]

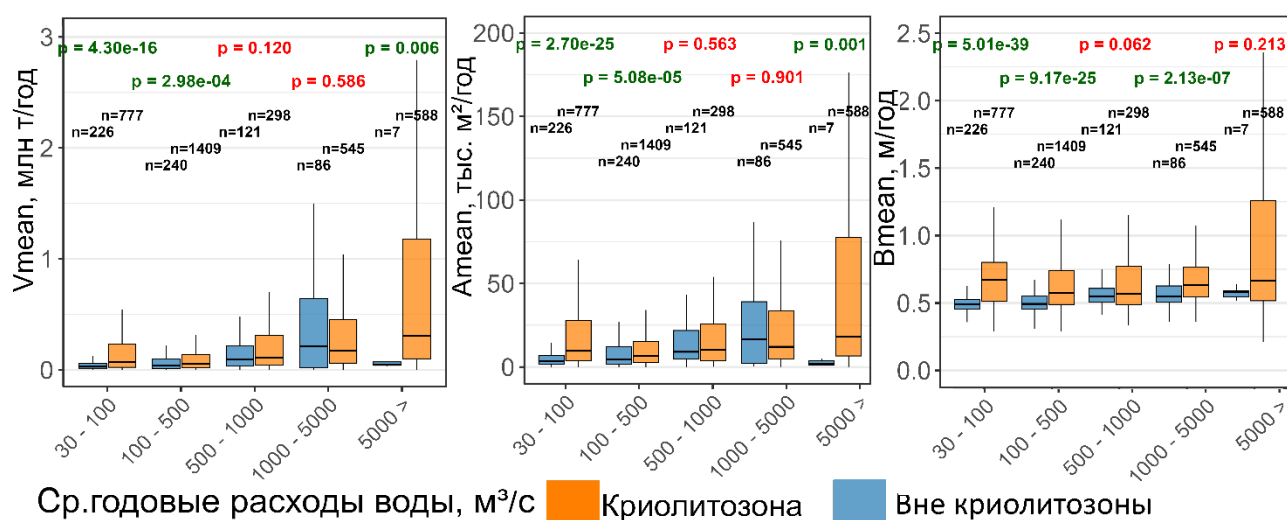


Рисунок 7. Диаграмма размаха для параметров русловой эрозии:

совместное влияние расходов воды и мерзлотных условий

n – количество 10-км участков русла, p – p -value критерия Манна-Уитни, значимость различий между характеристиками русловых деформаций в криолитозоне и за ее пределами: зеленый – значимые различия, p -value < 0.05. красный – незначимые различия; статистики размывов, приведенные на диаграмме размаха: белый прямоугольник – границы 25% и 75% квантилей ($Q1$ и $Q3$), жирная линия внутри – медианное значение; линиями, отходящими вниз и вверх от прямоугольников обозначены доверительные интервалы, равные $\pm 2,7\sigma$

Закономерности влияния мерзлоты на русловую эрозию более детально рассмотрены на протяженном участке среднего течения русла р. Лены (Якутский узел разветвлений – перекаат Усть-Алданский, протяженностью около 250 км и среднегодовым расходом воды около 7300 м³/с). Проанализирована интенсивность эрозии островов в зависимости от их возраста и, как следствие, степени промерзания. За счет размыва островов на данном участке приходится в среднем 85% всей массы наносов, поступающих в поток в результате русловой эрозии. Все острова были разделены на две группы: старые острова, существовавшие до 1965 г. и содержащие многолетнемерзлые породы в основании (далее – «мерзлотные»), и молодые острова, образовавшиеся после 1993 г. и промерзающие лишь сезонно (далее – «немерзлотные»). Молодые острова, которые образуются в русле из осередков, не имеют в основании вечной мерзлоты, но, по мере их закрепления, в островах начинают образовываться ядра вечной мерзлоты [Чистяков, 1964; Беркович, 1972; Тананаев, 2007]. Эта классификация, верифицируемая данными бурения и температурного мониторинга [Dupeyrat et al., 2011; Konstantinov et al., 2011], позволяет изолировать влияние фактора многолетнемерзлых пород на фоне

схожих гидравлических условий русла. Всего на исследуемом участке было выделено 209 островов с площадью от 0,7 до 61 км². Среди исследуемых островов 45 являются немерзлотными, 69 – мерзлотными, 95 – образовались в результате слияния нескольких старых островов со значительной аккумуляцией во второй половине XX века, что не позволило выявить их возраст, и они были исключены из анализа. Для минимизации прочих различий острова были сгруппированы по размерам на три примерно равные по количеству категории: малые (менее 2 км² – 49 островов, из которых 25 немерзлотных и 24 мерзлотных), средние (от 2 до 8 км² – 46 островов, из которых 20 немерзлотных и 26 мерзлотных) и крупные (более 8 км² – 19 островов, все мерзлотные). Выявлено, что мерзлотные острова характеризуются более высокой интенсивностью русловой эрозии по сравнению с немерзлотными. На малых островах масса наносов, поступающих в результате русловых деформаций мерзлотных островов, в среднем составила около 74 тыс. т/год, тогда как у немерзлотных – около 38 тыс. т/год, что соответствует разнице в 95%; согласно критерию Манна–Уитни, данное различие относится к статистически значимым ($p\text{-value} = 0,027$). Площадь размыва также была выше на 53% у мерзлотных островов – около 7,8 тыс. м²/год против 5,1 тыс. м²/год, однако статистической значимости это различие не достигло ($p\text{-value} = 0,136$). На островах среднего размера также зафиксированы статистически значимые различия по массе поступающих наносов в результате русловых деформаций: размыв мерзлотных островов давал в среднем 200 тыс. т/год наносов для каждого острова, для немерзлотных – 181 тыс. т/год, т.е. разница составила 11%. Разница в площади размыва составляла 39% – около 20 тыс. м² у мерзлотных и 14,5 тыс. м² у немерзлотных островов, но она статистически незначима ($p\text{-value} = 0,086$). Для крупных островов сравнение по мерзлотности невозможно, так как в данной размерной группе не было найдено ни одного немерзлотного острова. Для этой категории островов значения характеристик русловой эрозии максимальные, средняя площадь размыва составила около 31 тыс. м²/год, а масса поступающих наносов в результате русловых деформаций – около 460 тыс. т/год, что определяет тот факт, что большие мерзлотные острова являются основными поставщиками наносов в среднем течении р. Лена.

В еще более детальном масштабе анализировались участки поступления наносов с обнажений ледовых комплексов. Такие участки характерны для всех исследуемых крупных бассейнов (Обь, Енисей, Лена, Колыма). Обнажения ледовых комплексов на них встречаются на 510 км, что составляет примерно

0,7% от общей протяженности линии русловых размывов [Strauss et al., 2021]. Для бассейна Оби обнажения ледовых комплексов фиксируются менее чем на 0,1% протяженности русловых размывов, для Енисея – на 0,35%, для Лены – на 1%, и для Колымы – на 1,7%. В результате проведенной оценки выявлено, что относительная масса поступающих наносов, связанных с разрушением отложений ледового комплекса, составляет 0,18% для Енисея, 0,23% – для Лены и 0,49% – для Колымы от всей массы наносов, поступающей в результате русловых деформаций.

Для сравнения характеристик отступления берегов, содержащих обнажения ледового комплекса, было проведено детальное сравнение излучин нижнего течения р. Колыма, имеющих идентичные среднегодовые расходы воды. Анализ полученных результатов показал, что на излучине Дуванный Яр, которая располагается в обнажении ледового комплекса протяженностью 9 км и высотой 30–40 м [Zanina et al., 2011], величина объемов русловых деформаций W_{mean} ($0,099 \times 10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$) в 5,5 раз больше по сравнению с соседней излучиной, не подверженной влиянию высокольдистых отложений ($0,018 \times 10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$). В то же время, из-за высокого содержания льда поступление наносов в результате русловых деформаций V_{mean} на 29% ниже: 0,021 млн. т/год/км для излучины Дуванного яра и 0,027 млн. т/год/км для соседней излучины. Кроме того, суммарная эрозия нижней Колымы на участке (пос. Черский – устье р. Крестовка, 400 км) с середины XX века выросла на 168% (с 14,8 Мт/год в 1965–1980 гг. до 39,7 Мт/год в 2001–2021 гг.), что связано как с активизацией разрушения льдистых берегов.

Наблюдающиеся в регионе тренды на увеличение температуры воздуха (по данным с метеостанции в пос. Черском средняя температура за период 1979–1989 гг. составляла $-11,9^\circ\text{C}$, тогда как за период 2015–2024 гг. она повысилась до $-9,0^\circ\text{C}$, рост на 24%) при отсутствии значимых трендов на увеличение водности р. Колыма [Магрицкий, Фролова, Василенко, 2025] указывают на то, что решающую роль в росте русловой эрозии сыграло значительное повышение температуры воздуха в регионе.

Глава 7. Баланс наносов рек криолитозоны

В главе 7 выполнена количественная оценка составляющих баланса наносов рек криолитозоны с целью определения соотношения бассейновых и русловых источников в формировании стока взвешенных наносов (4-ый блок модели). 35 водосборов постов, которые ранее использовались для калибровки модели, были классифицированы по площади на три группы: малые и средние

(<50 тыс. км²), большие (50–500 тыс. км²) и крупнейшие (>500 тыс. км²). Установлено, что для малых и средних водосборов доминирующей является бассейновая составляющая стока наносов, достигающая в среднем 77%. С ростом площади водосбора её вклад закономерно снижается до 30% для больших и до 14% для крупнейших речных бассейнов. Это свидетельствует о возрастании роли русловых источников в балансе наносов по мере увеличения размера речного бассейна, что согласуется с фундаментальными представлениями [Чалов, 1979; Walling, 1983; Dedkov, 2004]. Анализ полученных данных также выявил ключевую особенность, характерную для криолитозоны: распространение многолетнемерзлых пород выступает одним из факторов, который способствует увеличению руслового вклада в сток наносов. В частности, для крупнейших водосборов медианная доля русловой эрозии возрастает с 73% для бассейнов с распространением мерзлоты на <25% площади до 88% для бассейнов, практически полностью расположенных в криолитозоне (>75% площади), что соответствует увеличению на 15%.

В Заключение приведены основные выводы исследования.

- Предложена классификация процессов формирования стока наносов для водосборов крупнейших бассейнов криолитозоны на основе балансового подхода.

- Разработана методика количественной оценки стока наносов рек криолитозоны, основой которой является балансовая модель, созданная на основе открытых источников и глобальных баз данных и реализованная на языке программирования R.

- По 18 постам Росгидромета (наблюдения с 1970 по 1990 гг.) выполнена калибровка параметров модели. В качестве калибровочных параметров использованы коэффициент транспортирующей способности потока, параметры перехода между зонами эрозии и транзита наносов для горных территорий, скорость аккумуляции наносов на пойме. После калибровки медианное значение относительной ошибки расчетов для проверочных водосборов было снижено с 90 до 68%. Произведенные расчеты баланса наносов отражают современную климатическую ситуацию на начало XXI века, однако долгосрочные прогнозы процессов формирования стока наносов требуют учета климатических сценариев, связанных с прогнозируемыми значительными изменениями температуры воздуха, режима осадков и речного стока.

- Региональные оценки бассейновой составляющей стока наносов по 3886 водосборам со средней площадью 1885 км² для бассейнов рек Обь, Енисей, Лена и Колыма показали, что в горных водосборах распространение многолетнемерзлых пород увеличивает медианное значение модуля бассейновой

составляющей стока наносов по сравнению с немерзлотными горными территориями.

– Выделено 6 типичных зон по условиям формирования бассейновой составляющей стока наносов. Для них определены ключевые факторы, определяющие пространственную дифференциацию стока наносов. При сравнении групп антропогенно ненарушенных водосборов было выявлено, что наличие многолетнемерзлых пород на равнинах приводит к увеличению модуля бассейновой составляющей стока наносов на 47%, что подтверждает интенсифицирующую роль криогенных процессов в условиях слабо расчлененного рельефа.

– В разных пространственных масштабах даны оценки степени увеличения характеристик размывов берегов рек криолитозоны по сравнению с реками за ее пределами. Для 110 тыс. км речной сети бассейнов Оби, Енисея, Лены и Колымы масса наносов, поступающих в результате русловых деформаций, площади размывов и скорости отступления берегов в криолитозоне оказались на 40–55% выше, чем за ее пределами. Для 200-километрового участка р. Лена (участок Якутский узел – устье р. Алдан) показано, что мерзлотные острова имеют более высокую интенсивность эрозии: для малых островов с площадью менее 2 км² масса наносов выше на 95%, для средних островов с площадью в диапазоне от 2 до 8 км² – на 11%. На примере крупнейшего внутриматерикового обнажения многолетнемерзлых пород Дуваный Яр на р. Колыма установлено, что значение объёмов отступившего берега в среднем в 5,5 раз выше для берегов излучин, сложенных едомами, по сравнению с другими излучинами ($0,099 \times 10^6$ м³ год⁻¹ км⁻¹ против $0,018 \times 10^6$ м³ год⁻¹ км⁻¹). Масса наносов, поступающих в реку в результате русловых деформаций, оказывается на 29% меньше вследствие высокого содержания льда в размываемых породах по сравнению с излучинами, где обнажения ледового комплекса не наблюдаются. В XXI веке на нижней Колыме наблюдается ускорение русловой эрозии и рост поступления наносов в связи с климатическим потеплением и усилением термического разрушения берегов.

– Выявлено, что с увеличением размера водосбора проявляется рост русловой составляющей, для больших водосборов с площадью более 500 тыс. км² происходит увеличение доли русловых источников в балансе наносов с увеличением площади, занимаемой многолетнемерзлыми породами. Определено, что медианная доля русловых источников для водосборов, расположенных в криолитозоне, на 15% выше, чем для водосборов, расположенных за ее пределами.

– Выполнена оценка баланса наносов крупнейших рек криолитозоны – Оби, Енисея, Лены и Колымы. Основную роль в формировании стока наносов для них играет русловая эрозия: от 70,1% для Енисея до 80,8% для Оби. На долю плоскостного смыва для Оби приходится около 19,8%, для Енисея – 23%, для Лены – 4%, для Колымы – менее 1%. С другой стороны, с увеличением доли водосбора, расположенной в криолитозоне, возрастает роль криогенных оползней: если для Енисея и Лены доля данного процесса составляет 6,7% и 3,9%, для Колымы данное значение – 18,6%.

РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных в п.2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова:

1. **Иванов В.А.**, Чалов С.Р. Оценка баланса наносов рек Обь и Енисей // Геоморфология. 2021. Т. 52. № 3. С. 79–89. DOI 10.31857/S0435428121030056. 1,27 п.л. Импакт-фактор 0,32 (SJР). Доля участия 1/2.

2. Chalov S., **Ivanov V.** Catchment and in-channel sources in three large Eurasian Arctic rivers: Combining monitoring, remote sensing and modeling data to construct Ob, Yenisey and Lena rivers sediment budget // Catena. 2023. vol. 230. p. 107212. DOI 10.1016/j.catena.2023.107212. 1,85 п.л. Импакт-фактор 1,68 (SJР). Доля участия 1/2.

3. Чалов С.Р., Завадский А.С., Головлев П.П., **Иванов В.А.** Русловая составляющая стока наносов: особенности проявления на крупных реках России // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2023. Т. 78. № 5. С. 115–124. DOI 10.55959/MSU0579-9414.5.78.5.11. 1,16 п.л. Импакт-фактор 0,24 (SJР). Доля участия 1/4.

4. Chalov S., Prokopenko K., Efimov V., **Ivanov V.**, Koffi B., Botavin D., Babinski Z., Zimov N., Pavlyukevich E., Habel M. Implications of Yedoma bank outcrop on the Arctic river sediment transport // Scientific Reports. 2025. vol. 15. p. 19320. DOI 10.1038/s41598-025-02614-7. 1,96 п.л. Импакт-фактор 0,87 (SJР). Доля участия 1/10.

Публикации в прочих рецензируемых научных изданиях:

5. **Иванов В.А.**, Чалов С.Р. Эмпирическая модель распределения взвешенных наносов по глубине крупных рек // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2022. Т. 4. № 2. С. 149–164. DOI 10.34753/HS.2022.4.2.149. 1,85 п.л. Импакт-фактор 0,29 (РИНЦ). Доля участия 1/2.

6. **Иванов В.А.**, Морейдо В.М., Прокопьева К.Н., Тарбеева А.М., Колесников Р.А., Чалов С.Р. Современные условия гидрологических процессов малых рек юга Ямало-Ненецкого автономного округа // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. № 3 (120). С. 52–75. DOI 10.26110/ARCTIC.2023.120.3.004. 2,77 п.л. Импакт-фактор 0,21 (РИНЦ). Доля участия 1/6.