На правах рукописи

Фёдоров Максим Петрович

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАТОРНОЙ ОПАСНОСТИ НА УЧАСТКЕ СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ Р. ЛЕНА ПО ДАННЫМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2025

Работа выполнена в Институте горного дела Севера им. Н. В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр» Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: **Тананаев Никита Иванович**, кандидат географических наук

Официальные оппоненты: **Дебольская Елена Ивановна**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории динамики русловых потоков и ледотермики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института водных проблем Российской академии наук, г. Москва

Оленченко Владимир Владимирович, доктор геолого-минералогических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории геоэлектрики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова», г. Москва

Защита состоится «04» декабря 2025 г. в 10:00 ч. на заседании диссертационного совета 24.1.039.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИВЭП СО РАН, www.iwep.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим высылать по адресу: 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1, Диссертационный совет, факс: 8(3852) 240-396, e-mail: iwep@iwep.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
доктор географических наук, доцент И. Д. Рыбкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Холодные погодные условия зимой на территориях России, Канады и США обуславливают наличие ледяного покрова на водных объектах суши. В период формирования и разрушения ледяного покрова рек нередко возникают чрезвычайные ситуации, влияющие на безопасность населённых пунктов, расположенных вблизи рек. При вскрытии северных рек, особенно текущих с юга на север, формируются ледовые заторы, сопровождающиеся резким подъёмом уровня воды, приводящим к опасным наводнениям. Хотя наводнения кратковременны, они наносят значительный ущерб, который оценивается в миллиарды рублей. Суммарный ущерб, нанесённый экономике Республики Саха (Якутия) за 1998-2022 гг., составил примерно 46.8 млрд. руб. (Тананаев, 2023), из них основная часть приходится на заторные наводнения.

Большая трудоёмкость полевых наблюдений за ледовым режимом рек России в сложных погодных условиях и ограниченное количество пунктов наблюдений приводят к необходимости поиска других источников информации о толщине и строении льда, требующейся для прогноза заторных явлений. В существующей системе наблюдений отсутствует инструмент для оперативного сбора и выдачи информации о толщине льда на протяжённых участках рек или в периоды, когда выход на лёд и прямые измерения невозможны.

Результаты изучения формирования ледовых заторов на реках представлены в работах Шуляковского Л. Г., Лисера И. Я., Файко Л. И., Котлякова В. М., Зайцева А. А., Беликова В. В., Бузина В. А., Зиновьева А. Т. и других исследователей. В зарубежных трудах изложены различные аспекты процессов образования ледовых заторов на реках Канады и США (White et al, 2006; Beltaos, 2008; Shen, 2010; Lindenschmidt, 2023). В публикациях описаны основные факторы образования ледовых заторов: ледяной покров толщиной 150-200 см и более; неразрушенный ледяной покров на пути весеннего половодья; перелом продольного профиля реки; комбинирование нескольких видов русловых препятствий, например, участки русла с увеличивающейся глубиной и снижающейся шириной, участки с крутым поворотом русла и наличием островов. Многие из факторов наблюдаются ежегодно, тогда как заторы отмечаются не каждый год.

Толщина и строение ледяного покрова рек являются ключевым фактором, влияющим на вероятность возникновения заторной опасности. Для измерения толщины льда на водных объектах суши активно применяется метод георадиолокации (Финкельштейн, 1984; Мачерет, 2006; Annan, 2016; Richards, 2023). Метод позволяет решать задачи определения и мониторинга толщины ледяного покрова при инженерно-изыскательских работах, в частности, на ледовых переправах через реки. В основном, на малых участках выполняют пешие исследования с поверхности ледяного покрова георадаром (Kämäri, 2017). На протяжённых участках применяют моторизованное транспортное средство, на базе которого установлен георадар (Ермаков и др., 2017), либо используют малую авиацию, оснащённую георадаром (Briggs et al, 2021). Анализ публикаций показал,

что получаемые методом георадиолокации данные о различном строении ледяного покрова на северных реках остаются ещё малоизученными, и практически не используются при оценке заторной опасности.

Преимуществом метода георадиолокации является возможность непрерывного профилирования протяжённых участков реки, оперативность исследований с помощью воздушного судна и получение данных в режиме реального времени. Результаты, получаемые при георадиолокационном исследовании ледяного покрова, могут быть использованы в качестве дополнительной информации для анализа заторной опасности на участках реки.

Актуальность работы обусловлена необходимостью анализа гидрологических и георадиолокационных данных для определения заторной опасности на участках среднего течения реки Лена, одной из крупнейших северных рек, вскрывающейся от ледяного покрова в весенний период с юга на север, где регулярно образуются ледовые заторы. В практических целях информация о толщине и строении льда необходима для организации безопасного выполнения инженерных изысканий, буровых работ и движения автомобильного транспорта по автозимникам. В гидрологической практике она требуется для составления прогнозов сроков вскрытия рек и определения затороопасных участков с целью безопасного пропуска весеннего половодья.

Объект исследования – ледяной покров среднего течения реки Лена на затороопасных участках.

Предметом исследования являются толщина и строение ледяного покрова среднего течения реки Лена, и их влияние на заторную опасность с учётом гидрологических данных.

Целью исследований является разработка методики георадиолокационного исследования ледяного покрова рек с борта воздушного судна и применение полученных данных совместно с гидрологическими данными для оценки уровня заторной опасности.

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи:**

1. Анализ имеющейся информации по данным натурных наблюдений о строении ледяного покрова на затороопасном участке р. Лена;
2. Разработка и апробация методики георадиолокационного исследования ледяного покрова реки Лена с борта воздушного судна;
3. Разработка алгоритма обработки и интерпретации данных георадиолокации для определения толщины и типов строения льда;
4. Совершенствование алгоритма картографического отображения пространственного распределения толщины и типов строения льда;
5. Адаптация способа расчёта толщины льда на участке реки Лена с использованием гидрологических данных и сравнение результатов с натурными данными;
6. Комплексная оценка уровня заторной опасности на участке р. Лена с использованием гидрологических и георадиолокационных данных.

Фактический материал. Работа основывается на обширном оригинальном материале георадиолокационных исследований ледяного покрова реки Лена, полученных автором в ИГДС СО РАН. Общая протяжённость маршрута исследования составила более 3300 км за период 2011-2023 гг.

Методы исследований. Аналитический обзор литературных источников, натурные и экспериментальные исследования ледяного покрова различного строения реки Лена, оценка опытно-методических возможностей георадара с помощью автомобильного крана и воздушного судна, полевые инструментальные измерения толщины льда для заверки данных георадиолокации, производственные георадиолокационные исследования с борта воздушного судна, обработка и интерпретация данных георадиолокации, статистический анализ данных и представление массива данных с помощью геоинформационной системы (ГИС).

Научная новизна.

1. Впервые экспериментально получены волновые картины основных типов строения ледяного покрова реки Лена (береговой, монолитный и торосовый лёд), на основе которых установлены их признаки: вариации амплитуды и фазы отражённых волн от границ льда, коэффициент вариации амплитуд, конфигурация и протяжённость осей синфазности отражённых волн;
2. Разработана методика георадиолокационного исследования ледяного покрова рек с борта воздушного судна, включающая профилирование запланированных маршрутов со скоростью до 150 км/ч с установленными параметрами измерений и географической привязкой точек измерений с помощью системы спутникового позиционирования, что обеспечивает определение толщины льда и основных типов строения льда (береговой, монолитный и торосовый лёд) на протяжённых участках исследования;
3. Адаптирован способ расчёта толщины льда, учитывающий предледоставный уровень воды, минимальный уровень воды в конце ледостава и региональные особенности исследуемого участка реки, что позволяет определить толщину льда на основе динамики уровня воды на реках в условиях отсутствия гидрологических постов.
4. По результатам анализа гидрологических и георадиолокационных данных, полученных на протяжённом заторопасном участке реки Лена, установлена совокупность факторов, влияющих на возникновение заторной опасности, что способствует прогнозированию и управлению рисками, связанными с наводнениями.

Защищаемые положения:

1. Георадиолокационные признаки, полученные в результате изучения структуры волновых картин различного строения ледяного покрова рек в натурных условиях, позволяют распознать основные типы строения ледяного покрова рек (береговой, монолитный и торосовый лёд) по материалам полевых исследований.
2. Методика георадиолокационного исследования ледяного покрова рек с борта воздушного судна, включающая профилирование запланированных маршрутов со скоростью до 150 км/ч с установленными параметрами измерений и

географической привязкой точек измерений с помощью системы спутникового позиционирования, что обеспечивает определение толщины льда и основных типов строения льда (береговой, монолитный и торосовый лёд) на протяжённых участках исследования.

3. Гидрологические и георадиолокационные данные позволяют выявить комплекс факторов (водность предшествующего периода, распределение уклонов водной поверхности, повышенная толщина льда, ледяной покров торосового строения), определяющих уровень заторной опасности реки (на примере участка реки Лена от Табагинского мыса до Кангаласского мыса).

Достоверность полученных результатов исследований обеспечивается большим объёмом полученных автором экспериментальных данных, подтверждённых заверочным бурением, данными наблюдений на гидрологических постах Федерального государственного бюджетного учреждения Якутского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Практическая значимость работы. Применение разработанной методики обеспечивает получение сведений о толщине и типе строения льда, что в сочетании с гидрологическими данными даёт возможность оценить заторную опасность на участках реки. Полученная информация позволит уточнить схему прохождения весеннего половодья и оптимизировать превентивные мероприятия по обеспечению безопасности населения и защите критической инфраструктуры. Информация о толщине и типе строения льда необходима для организации безопасного выполнения инженерных изысканий, буровых работ и движения автомобильного транспорта по автозимникам.

Реализация работы. Разработанная методика применялась при исследовании ледяного покрова реки Лена по маршруту от села Рассолода до устья реки Алдан в предвесенний период с 2011 г. по 2023 г. по заданию центра мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций ГБУ РС (Я) «Служба спасения РС (Я)». Российским научным фондом №22-27-00751 (2022-2023 гг.) поддержан проект по теме «Разработка научно-методических основ дистанционного изучения строения ледяного покрова на затороопасных участках Северных рек методом георадиолокации». Результаты диссертационной работы были применены для верификации данных спутникового альтиметра в ходе исследования возможностей использования космического мониторинга для изучения ледяного покрова рек в рамках комплексных научных исследований в Республике Саха (Якутия), выполненных по государственному контракту №8420 от 20 июня 2022 г. по теме: «Управление водными ресурсами и гидрологическими рисками на Северо-Востоке РФ. Этап 1», что подтверждено соответствующим актом от 2 декабря 2024 г. Акт об использовании результатов исследований приложен к диссертационной работе. Разработанная методика была успешно апробирована в ходе учений «Безопасная Арктика – 2025», что подтвердило её значимость для практического применения.

Личный вклад автора включает планирование и выполнение экспериментальных и натурных георадиолокационных исследований ледяного

покрова реки Лена с борта воздушного судна; разработку георадиолокационных признаков, позволяющих определить тип строения ледяного покрова реки; разработку и реализацию алгоритмов обработки и интерпретации данных георадиолокации; совершенствование алгоритма картографического отображения результатов исследований; выполнение гидрологических расчётов параметров, необходимых для комплексной оценки уровня заторной опасности.

Апробация работы. Основные результаты работы были доложены и обсуждены на: международной научно-практической конференции «Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций в Арктике» (Якутск, 2011); общероссийской научно-практической конференции «Защита населения и объектов от водной стихии северных рек» (Якутск, 2013); научно-практической конференции «Георадар» (Москва, 2017, 2022); семинаре кафедры сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета МГУ (Москва, 2017); IV научно-практической конференции «Актуальные проблемы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в Республике Саха (Якутия)» (Якутск, 2018); научно-дискуссионном семинаре МГУ «Современные проблемы геофизики» (Москва, 2021); V Виноградовских чтениях: Гидрология в эпоху перемен (Санкт-Петербург, 2023); семинаре лаборатории по изучению климата и экосистем северных регионов СВФУ (Якутск, 2025). Материалы исследований были доложены на зарубежных конференциях по георадиолокации (Shanghai, 2012; Brussels, 2014; Hong Kong, 2016; Rapperswil, 2018).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них основные 6 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 1 – в изданиях, включённых в Белый список; 1 – патент РФ на изобретение; 2 – свидетельства на базу данных.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы, изложенных на 129 страницах, включая 50 рисунков, 44 таблицы и 4 приложения. Список литературы содержит 131 наименования отечественных и зарубежных авторов.

Автор выражает благодарность д.т.н. Омельяненко А.В., к.т.н. Федоровой Л.Л. за ценные советы при написании работы; научному руководителю к.г.н. Тананаеву Н.И. за ценные замечания и рекомендации на последних этапах завершения работы; коллективу лаборатории георадиолокации ИГДС СО РАН; бывшему начальнику отдела гидрологии ФГБУ «Якутское УГМС» Кусатову К.И. за продуктивное общение и ценные консультации; бывшему начальнику ГБУ РС (Я) «Служба спасения РС (Я)», к.б.н. Находкину Н.А. и бывшему заместителю начальника, к.т.н Быкову А.Н. за организацию исследований с борта воздушного судна (Ми-8, Ан-2, EuroStar SLW).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, определена научная новизна, сформулированы защищаемые положения, отмечена практическая значимость и реализация работы.

В первой главе рассмотрен механизм формирования и разрушения ледяного покрова р. Лена. Представлена краткая характеристика русла среднего течения р. Лена. Рассмотрен механизм образования ледового затора. Приведён обзор применения метода георадиолокации при исследовании ледяного покрова рек. Обобщены и проанализированы отечественные и зарубежные материалы георадиолокационных исследований ледяного покрова рек. Поставлена и обоснована цель, определены задачи исследований.

Во второй главе изложен анализ электрических свойств пресного льда, скорости распространения и удельного затухания электромагнитных волн во льду. Приведено обоснование частоты георадара для исследования ледяного покрова рек. В качестве измерительного прибора применялся модернизированный антенный блок АБ400 (центральная частота 400 МГц) георадара ОКО-2 (Омельяненко, 2003). Представлены результаты экспериментальных исследований в натурных условиях возможностей антенного блока: при наличии снежного покрова мощностью до 2 м на ледяном покрове отчётливо отмечаются сигналы, отражённые от границ льда; при бесконтактном исследовании льда на высотах от 1 м до 30 м отчётливо прослеживаются сигналы, отражённые от границ льда; в условиях высокоскоростных полётов на воздушном судне определены значения параметров измерений (количество трасс на радарограмме, накопление георадиолокационных трасс с последующим суммированием, развёртка по оси времени); погрешность георадиолокационных измерений толщины льда находится в пределах 5%. Для установки антенного блока к днищу самолёта изготовлено специальное монтажное крепление. Проведены испытания крепления во время работы двигателя самолёта перед взлётом на аэродроме и в течение полёта. Результаты опытных измерений показали устойчивый режим работы георадара и отсутствие вибраций антенного блока. Получены положительные результаты экспериментальных измерений толщины льда на р. Лена с борта воздушного судна. Изучена структура волновых картин, полученных георадиолокационным измерением ледяного покрова различного строения р. Лена в натурных условиях. В результате были установлены и описаны георадиолокационные признаки, обеспечивающие определение типа строения ледяного покрова: береговой, монолитный, торосовый.

Третья глава посвящена методике георадиолокационных исследований ледяного покрова р. Лена, алгоритму обработки и интерпретации больших объёмов данных георадиолокации и алгоритму визуализации результатов для отображения пространственного распределения толщины и типов строения льда. Приведены примеры обработки, интерпретации и визуализации результатов георадиолокационных измерений.

В четвертой главе представлены результаты апробации методики георадиолокационных исследований ледяного покрова р. Лена с борта воздушного судна. Полученные результаты продемонстрированы на примере площадных исследований пространственного распределения толщины и строения ледяного покрова р. Лена в районе острова Тинная и села Сырдах. Приведены результаты

исследований ледяного покрова в 2011 г., 2013 г., 2015-2018 гг. на затороопасном участке р. Лена в районе г. Якутска (1/3 населения, адм. центр, высокий потенциальный ущерб). Представлен адаптированный способ расчёта толщины льда с учётом гидрологических данных с 2008 г. по 2020 г. Данный способ предоставляет возможность получить значения толщины льда при отсутствии гидрологических постов на реках. Изложены материалы анализа гидрологического режима за период 2008-2020 гг. на затороопасном участке р. Лена с использованием гидрологических и георадиолокационных данных. По результатам анализа данных выявлен комплекс факторов, способствующих определению уровня заторной опасности на участке среднего течения р. Лена в предвесенний период.

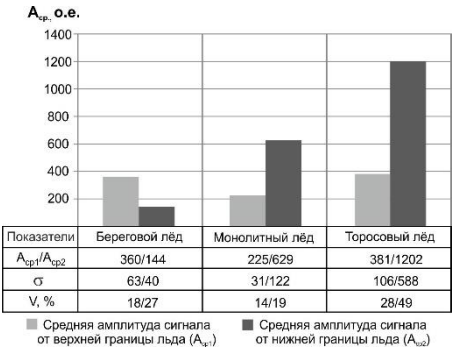
В заключении приведены полученные основные результаты диссертационного исследования.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Георадиолокационные признаки, полученные в результате изучения структуры волновых картин различного строения ледяного покрова рек в натурных условиях, позволяют распознать основные типы строения ледяного покрова рек (береговой, монолитный и торосовый лёд) по материалам полевых исследований.

Ледяной покров р. Лена в естественных условиях характеризуется различным строением. По результатам полевых исследований ледяного покрова р. Лена основными типами строения льда являются береговой, монолитный и торосовый лёд. При описании строения льда была использована структурно-функциональная схема формирования пресного льда (Козлов, 2020).

Для интерпретации полевых данных георадиолокации выполнено экспериментальное изучение структуры волновых картин, полученных при георадиолокационном измерении основных типов строения ледяного покрова р. Лена в натурных условиях. В ходе экспериментальных работ применялся георадар с частотой 400 МГц. В результате получены радарограммы, на которых установлена конфигурация и протяжённость осей синфазности отражённых волн, амплитуда и фаза сигналов, отражённых от границ основных типов строения ледяного покрова реки (таблица 1).



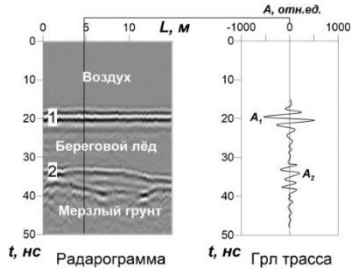
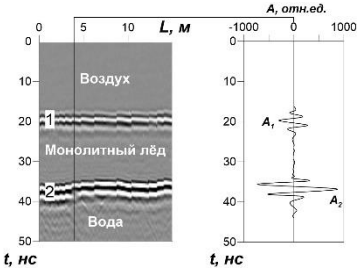
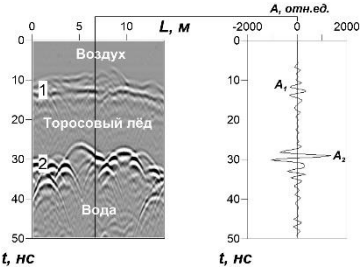
Показатели	Береговой лёд	Монолитный лёд	Торосовый лёд
$A_{ср1}/A_{ср2}$	360/144	225/629	381/1202
σ	63/40	31/122	106/588
V, %	18/27	14/19	28/49

Рис. 1. Гистограмма средних амплитуд сигналов, отражённых от границ льда

Результаты визуальной интерпретации радарограмм подтверждены оценкой средних значений амплитуд сигналов, отражённых от верхней и нижней границы льда (рис. 1). Низкие значения амплитуд сигналов, отражённых от нижней границы льда, от-

носятся к контакту льда с грунтом. Высокие значения амплитуд сигналов, отражённых от нижней границы льда, указывают на контакт льда с водой. Статистический расчёт амплитудных значений показал, что величина коэффициента вариации амплитуд указывает на тип строения льда. Коэффициент вариации меньше 20% соответствует береговому или монолитному льду, больше 20% - торосовому льду.

Таблица 1. Радарограммы основных типов строения ледяного покрова р. Лена

Тип строения /Радарограмма	Признаки на радарограмме
Береговой лёд 	1 - Устойчивые контрастные прослеживаемые оси синфазности отражённых волн соответствуют верхней границе льда. 2 - Слабоконтрастные, субгоризонтальные оси синфазности отражённых волн относятся к нижней границе льда. Низкие амплитуды и смена фазы отражённых волн (2) указывают, что ледяной покров в контакте с мёрзлым грунтом (дно).
Монолитный лёд 	1 - Симметричные, протяжённые, прослеживаемые оси синфазности отражённых волн соответствуют верхней границе льда. 2 - Контрастные, симметричные, протяжённые, прослеживаемые оси синфазности отражённых волн соответствуют нижней границе льда. Высокие амплитуды и смена фазы отражённых волн (2) указывают, что ледяной покров контактирует с водой.
Торосовый лёд 	1 - Слабоконтрастные нарушенные оси синфазности отражённых волн соответствуют верхней границе льда. 2 - Контрастные нарушенные формы гиперболических осей синфазности отражённых волн относятся к нижней границе льда. Низкие амплитуды и смена фазы отражённых волн (2) указывают, что ледяной покров в контакте с водой.

Результат интерпретации фрагмента радарограммы ледяного покрова р. Лена в районе Табагинского мыса представлен на рис. 2. На радарограмме прослежены участки ледяного покрова различного строения. По установленным

признакам выявлено, что симметричные оси синфазности отражённых волн соответствуют монолитному льду, а нарушенные оси синфазности отражённых волн относятся к торосовому льду. По амплитудным значениям сигналов, отражённых от нижней границы льда установлено, что лёд контактирует с водой. Толщина монолитного льда составляет примерно 1 м, а толщина торосового льда варьируется от 1 м до 2.5 м.

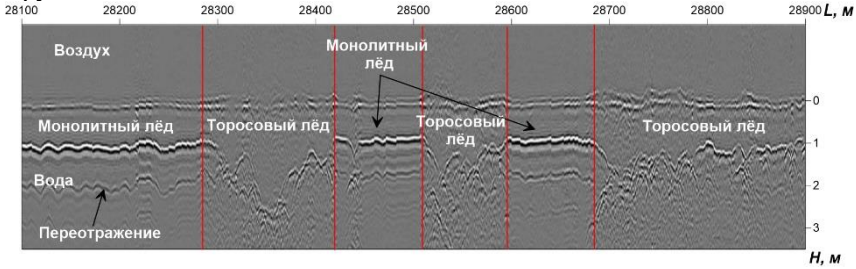


Рис. 2. Результат интерпретации фрагмента радарограммы

2. Методика георадиолокационного исследования ледяного покрова рек с борта воздушного судна, включающая профилирование запланированных маршрутов со скоростью до 150 км/ч с установленными параметрами измерений и географической привязкой точек измерений с помощью системы спутникового позиционирования, что обеспечивает определение толщины льда и основных типов строения льда (береговой, монолитный и торосовый лёд) на протяжённых участках исследования.

Методика георадиолокационных исследований ледяного покрова рек включает в себя планирование маршрута исследований на затороопасных участках; выбор антенного блока; ввод параметров георадиолокационных измерений; алгоритм обработки и интерпретации данных георадиолокации и визуализации полученных результатов.

Планирование маршрута в предвесенний период на участках исследований осуществлялось по спутниковым снимкам, полученных в период замерзания реки, на которых чётко выделено её незамёрзшее основное русло. Маршрут на участках исследования прокладывался в основном по фарватеру реки. На узких участках реки шириной до 1 км намечались продольные маршруты на левом и правом заберегах и один по фарватеру. На широких участках больше 1 км прокладывались поперечные маршруты и один маршрут по фарватеру. Расположение маршрутов позволяет выявить наличие контакта ледяного покрова с дном реки. Следование воздушного судна по запланированному маршруту осуществлялось с помощью спутникового навигатора.

В качестве измерительного прибора применялся георадар с частотой 400 МГц. Антенный блок георадара на самолёте EuroStar SLW был закреплён к днищу при помощи специального монтажного крепления. Управление георадаром, настройка синхронизации спутникового приёмника с георадаром, ввод параметров перед началом измерений, наблюдение за процессом измерений и сохранение

полученных данных реализовывалось посредством мобильного полевого компьютера с программой GeoScan32. По результатам опытно-методических георадиолокационных измерений, выполненных на различных скоростях и высотах полёта самолёта, установлены параметры измерений (таблица 2).

Таблица 2. Параметры георадиолокационных измерений

Наименование параметра измерений	Значение параметра
Количество отсчётов	512
Количество трасс на радарограмме	30000
Накопление грл трасс	4
Диэлектрическая проницаемость среды (пресный лёд)	3.2
Развёртка, нс	300
Режим измерений	Непрерывный

В процессе опытно-методической обработки данных георадиолокации, полученных при исследовании ледяного покрова р. Лена с борта воздушного судна, разработан алгоритм, включающий 4 этапа: обработка данных георадиолокации; интерпретация обработанных радарограмм; преобразование результатов интерпретации радарограмм в электронную таблицу и визуализация табличных данных.

Обработка полевых данных георадиолокации проводилась в программе GeoScan32, включающей набор процедур (вычитание среднего, редактирование трасс, фильтрация, коррекция дистанции с помощью данных системы спутникового позиционирования) для повышения информативности радарограмм. Интерпретация обработанных радарограмм выполнена с помощью установленных георадиолокационных признаков. В процессе интерпретации проводился визуальный анализ волновых характеристик: наличие на радарограмме осей синфазности отражённых волн и переотражений, изменение амплитуд и фаз отражений, форма осей синфазности отражённых волн (протяжённость, прослеживаемость, симметричность, субгоризонтальность, нарушенность), в ходе которого устанавливались участки с аналогичными волновыми характеристиками. Волновые характеристики участков, определённых на радарограмме, сравнивались с установленными признаками типов строения ледяного покрова (береговой, монолитный и торосовый лёд), и, при их совпадении, этот участок определялся как соответствующий тип строения льда. По амплитудным значениям сигналов, отражённых волн от нижней границы льда, уточнялся контакт льда с водой или грунтом. Обнаружение аномалии в виде схождения осей синфазности отражённых волн указывает на мёрзлые пески (осередки). Выделение распознанных границ льда в программе GeoScan32 для преобразования временного разреза в глубинный разрез позволило экспортировать данные в электронную таблицу.

Усовершенствован алгоритм визуализации табличных данных на базе геоинформационной системы QGIS 3.34.3. В системе создан проект с картой OpenStreetMap и векторным слоем, содержащий информацию о толщине и типе строения льда в каждой точке измерений, включая географические координаты каждой точки. Значения толщины льда отображены на карте посредством цветовой классификацией диапазонов толщин льда (таблица 3). Для отображения на карте основных типов строения льда применены маркеры (таблица 4). Итоговым результатом алгоритма является веб-карта.

Таблица 3. Классификация толщины льда

Диапазон толщины льда	Цвет заливки	Характеристика	Примечание
50 - 100 см	Синий	Тонкий лёд	-
100 - 150 см	Зелёный	Средний лёд	-
150 - 200 см	Жёлтый	Толстый лёд	Затороопасный лёд
200 - 250 см	Красный	Максимально толстый лёд	
250 - 300 см	Тёмно красный	Опасно толстый лёд	

Изложенная методика георадиолокационных исследований применялась при изучении характеристик ледяного покрова р. Лена в районе сел Сырдах и Партизан в апреле 2023 г. (рис. 3а). На широком участке Сырдах выполнены исследования по поперечным маршрутам. На узком участке Партизан выполнены по продольным маршрутам. На исследуемых участках отображено пространственное распределение толщины и типов строения льда (рис. 3б,в).

Таблица 4. Классификация типов строения льда

Тип льда	Маркер
Береговой	△
Монолитный	□
Торосовый	✸

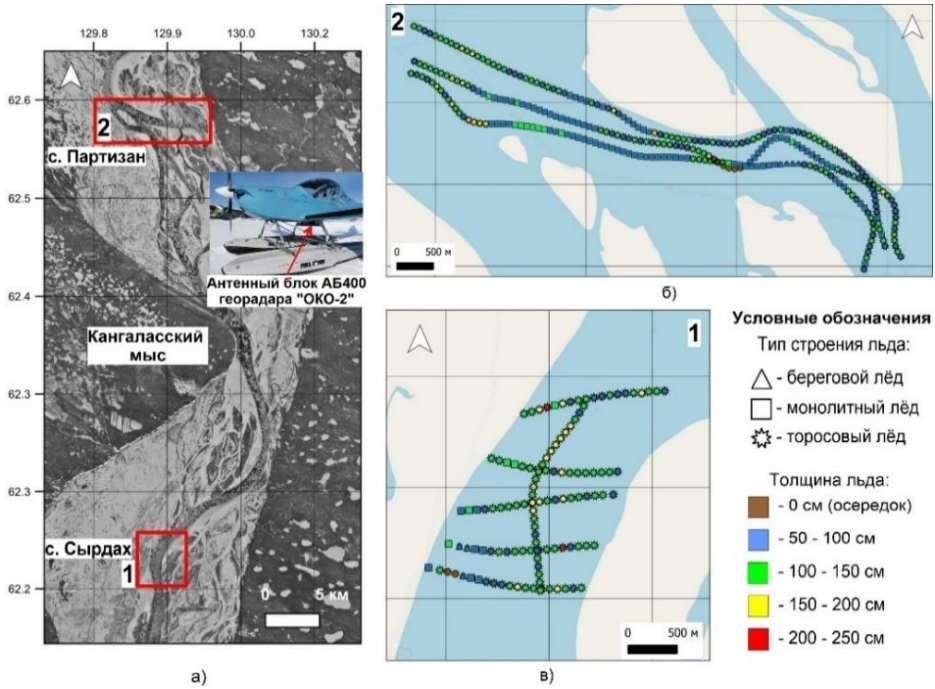


Рис. 3. Схема участков исследования ледяного покрова р. Лена (а) с картами распределения толщины и типов строения льда вблизи сел Партизан (б) и Сырдах (в)

3. Гидрологические и георадиолокационные данные позволяют выявить комплекс факторов (водность предшествующего периода, распределение уклонов водной поверхности, повышенная толщина льда, ледяной покров торосового строения), определяющих уровень заторной опасности реки (на примере участка реки Лена от Табагинского мыса до Кангаласского мыса).

Определение уровня заторной опасности на участке р. Лена выполнено по данным АИС ГМВО с 2008 г. по 2020 г. на трёх гидрологических постах Табага, Якутск и Кангалассы. По данным уровня воды летне-осеннего сезона произведён расчёт суммарных и средних значений уровней воды. Суммарные уровни воды распределены по группам водности на основе средних значений. Также были проанализированы данные об уровне воды в предледоставный период и конце ледостава. Установлены ключевые показатели: опорное значение предледоставного уровня воды и минимальное значение уровня воды в конце ледостава. Для определения характера влияния уровня воды на толщину льда и верификации установленных опорных значений уровня воды применён способ расчёта толщины льда. Способ основан на эмпирическом уравнении, которое описывает зависимость максимальной толщины льда $h_л$ от величины зимнего падения уровня воды $\Delta H_{зп}$ (Тананаев, 2005):

$$h_л = \frac{(1-A_р)\times\Delta H_{зп}}{A_р} \quad (1)$$

Зимнее падение уровня воды $\Delta H_{зп}$ представляет собой разницу между значениями опорного предледоставного уровня воды $H_{оп.}$ и минимальным уровнем воды в конце ледостава $H_{мин}$:

$$\Delta H_{зп} = H_{оп.} - H_{мин} \quad (2)$$

Расчёт регионального параметра $A_р$ для гидрологических постов:

$$A_р = C \times \ln(\Delta H_{зп}) + D \quad (3)$$

где коэффициенты C и D учитывают географическое расположение гидрологических постов и их влияние на региональный параметр $A_р$.

По формулам (1), (2), (3) выполнены расчёты значений толщины льда для постов Табага, Якутск и Кангалассы. Сравнение результатов расчётов с данными гидрологических постов позволило оценить величину погрешности. Абсолютная погрешность варьирует от – 0.28 м до 0.44 м. Средняя погрешность не превышает 3%, что указывает на близкое соответствие инструментальным данным. Результаты расчётов толщины льда показали хорошую согласованность с установленными опорными значениями предледоставного уровня воды и минимальным уровнем воды в конце ледостава.

По опорным значениям предледоставного уровня воды и минимальным значениям уровня воды в конце ледостава реки определен уклон водной поверхности на постах. Выполнено преобразование показателей уровня воды из местной системы высот в Балтийскую систему для дальнейшего анализа и построения графика изменения уклона. На рис. 4а представлен уклон водной поверхности до ледовых явлений. Данные за 2008 г., 2009 г. и 2012 г. отражены в

первом положении уклона. Данные 2011, 2014, 2017, 2018 и 2020 гг. демонстрируют второе положение уклона. Третье положение уклона представляют данные за 2010, 2013, 2016, 2019 гг. Четвёртое положение отражают данные за 2015 г. Снижение уровня воды до конца ледостава составило в среднем 2 м. На рис. 4б представлен уклон водной поверхности в конце ледостава. Данные первого положения за 2009-2010 гг. показывают линейный спад. Данные второго положения (2012, 2013 гг.), третьего положения (2011, 2018 гг.) и четвёртого положения (2014-2016 гг., 2017 г., 2019-2020 гг.) демонстрируют последовательность падения. Падение реки на участке Табага - Якутск составило 3.2 м, а на участке Якутск - Кангалассы - 1.3 м. Зафиксированные ледовые заторы наблюдались в положениях 2, 3 и 4.

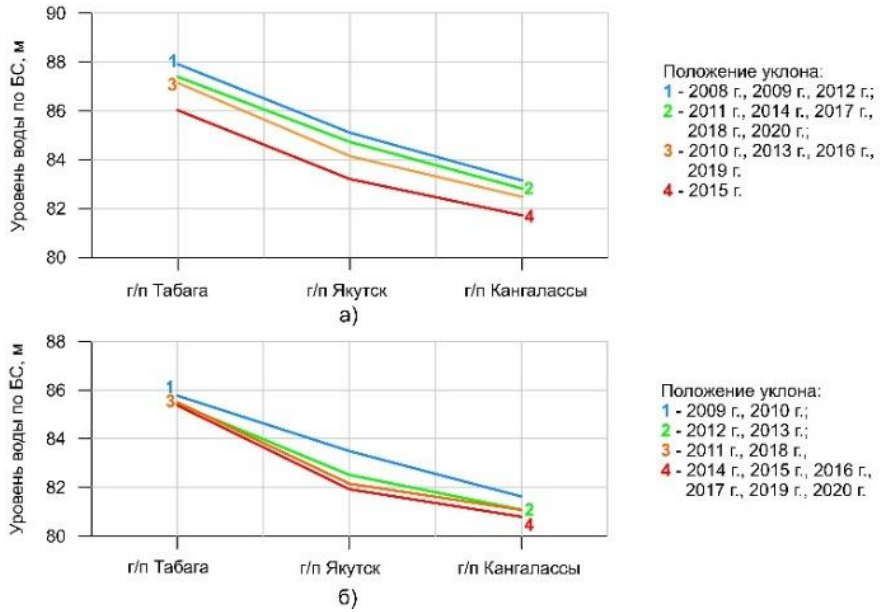


Рис. 4. Распределение уклонов водной поверхности до ледовых явлений (а) и в конце ледостава (б) на исследуемом участке р. Лена

На рис. 5 представлены графики, отражающие водность реки за период 2008-2020 гг. на трёх постах. На графиках прослеживаются линии тренда маловодья и полноводья. Показано влияние установленных опорных значений предледоставного уровня воды на толщину льда в зависимости от водности реки. При полноводье наблюдаются высокие значения толщины льда. В условиях маловодья отмечаются низкие значения толщины льда. В таблице 5 представлены результаты анализа гидрологических данных поста Табага, распределенные по группам водности реки. Аналогичные таблицы по другим постам приведены в диссертационной работе.

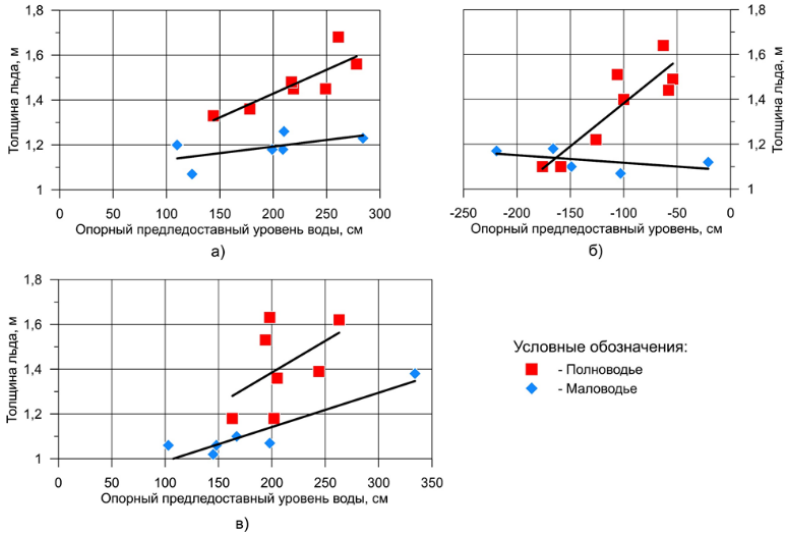
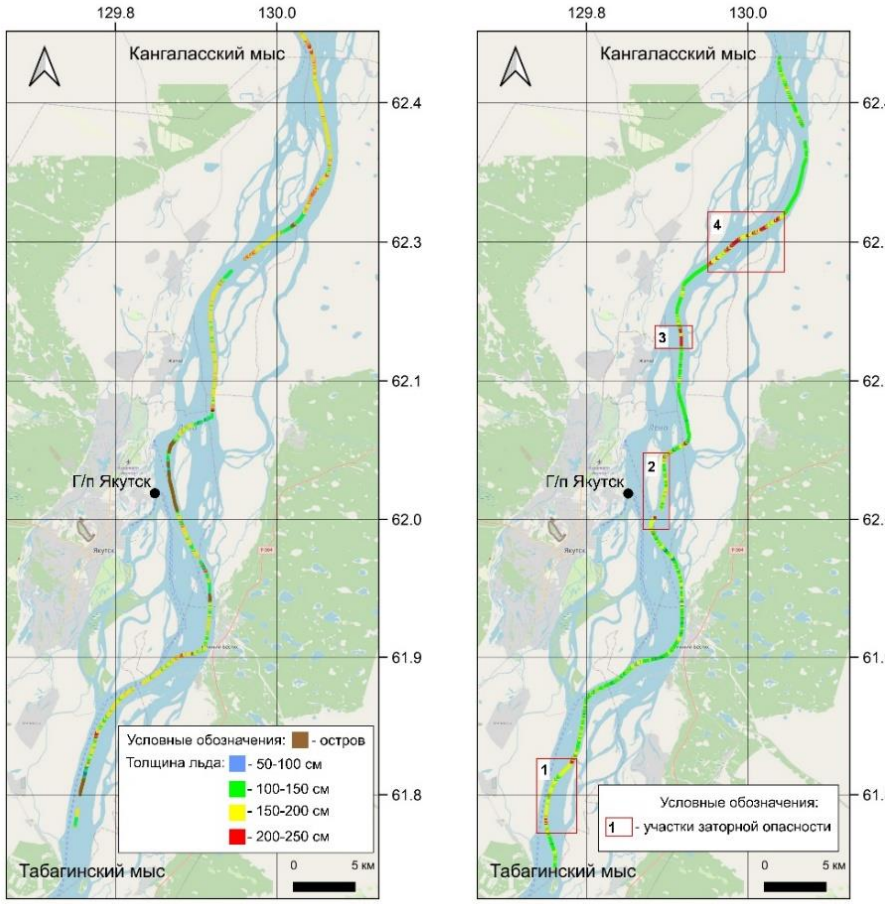


Рис. 5. Толщина льда в зависимости от опорного предледоставного уровня воды р. Лена по данным г/п Табага (а), Якутск (б) и Кангалассы (в)

Таблица 5. Водность р. Лена по данным г/п Табага

Водность реки	Период	$\Sigma H_{ур}$, см	$H_{оп.}$, см	$h_{бур.}$, м	I, ‰
Маловодье (М)	2010/2011	1662	209	1.18	0.059
	2011/2012	1471	284	1.23	0.082
	2014/2015	1443	199	1.18	0.084
	2015/2016	1204	110	1.20	0.081
	2019/2020	1140	124	1.07	0.085
Полноводье (П)	2008/2009	1956	261	1.68	0.069
	2009/2010	1837	278	1.56	0.056
	2012/2013	2128	249	1.45	0.071
	2013/2014	1988	178	1.36	0.078
	2016/2017	1997	144	1.33	0.084
	2017/2018	1909	219	1.45	0.085
	2018/2019	1792	217	1.48	0.083
Средние значения		1711	206	1.35	0.08

По результатам георадиолокационных исследований ледяного покрова реки Лена с борта воздушного судна в 2013 г. и 2018 г. получены карты пространственного распределения толщины льда на участке Табагинского мыса - Кангалласского мыса (рис. 6) (Фёдоров, 2022). В этих годах были зафиксированы ледовые заторы. На рис. 6а наблюдается количественное преобладание значений толщины льда в диапазоне 150-200 см. На карте (рис. 6б) отображены участки ледяного покрова толщиной 150-250 см в районе села Табага, поста Якутск, посёлка городского типа Жатай и села Тулагино. На исследуемом участке реки преобладает торосовый лёд.



а) б)

Рис. 6. Карта распределения толщины ледяного покрова р. Лена на участке Табагинский мыс - Кангаласский мыс в 2013 г.(а) и 2018 г. (б)

Определение факторов, влияющих на заторную опасность на участке реки, выполнено по следующему алгоритму:

1. Применение относительной бальной оценки гидрологических данных по следующим условиям, представленным в таблице 6;
2. Суммирование и сортирование полученных баллов по группам водности реки в зависимости от наличия и отсутствия заторной опасности на постах;
3. Формирование матрицы взаимного распределения суммированных баллов по категориям (Кобзарь, 2006).

4. Определение связи гидрологических данных с заторной опасностью посредством корреляционного анализа на основе коэффициентов ассоциации (Q) и контингенции (V) (Кобзарь, 2006).

Коэффициент ассоциации определяется по следующему выражению:

$$Q = \frac{a_{11} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{21}}{a_{11} \cdot a_{22} + a_{12} \cdot a_{21}} \quad (4)$$

В случае нулевого значения по баллам не применяется критерий ассоциации Q, вместо него используется коэффициент контингенции V:

$$V = \frac{a_{11} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{21}}{\sqrt{(a_{11}+a_{12}) \cdot (a_{11}+a_{21}) \cdot (a_{22}+a_{12}) \cdot (a_{22}+a_{21})}} \quad (5)$$

Таблица 6. Условия оценки гидрологических данных на участке реки

Наименование	1 балл	2 балла
Суммарный уровень воды летней межени*	$\Sigma H_{ур.} < \Sigma H_{ср.ур.}$	$\Sigma H_{ур.} > \Sigma H_{ср.ур.}$
Опорный предледоставный уровень воды	$H_{оп.} < H_{оп.ср.}$	$H_{оп.} > H_{оп.ср.}$
Распределение уклонов в конце ледостава	$I < 0{,}06‰$	$I > 0{,}06‰$
Толщина льда	$h_{бур.} < 1.5$ м	$h_{бур.} > 1.5$ м
Ледовый затор (Лз)	Отсутствие	Наличие

*сумма высших значений уровня воды на гидропосту с июля по сентябрь

По данным таблиц 5 и 6 реализован алгоритм определения факторов, влияющих на заторную опасность. Результаты относительной оценки гидрологических данных поста Табага за рассмотренные года, а также суммы баллов приведены в таблице 7.

Таблица 7. Результаты оценки гидрологических данных г/п Табага

Период	$\Sigma H_{ур.}$	$H_{оп.}$	$h_{бур.}$	I	Лз	Полноводье (отсут. Лз)	Маловодье (отсут. Лз)	Полноводье (нал. Лз)	Маловодье (нал. Лз)
2008/2009	2	2	2	1	1	8	0	0	0
2009/2010	2	2	2	1	2	0	0	9	0
2010/2011	1	2	1	2	1	0	7	0	0
2011/2012	1	2	1	2	1	0	7	0	0
2012/2013	2	2	1	2	1	8	0	0	0
2013/2014	2	1	1	2	2	0	0	8	0
2014/2015	1	1	1	2	2	0	0	0	7
2015/2016	1	1	1	2	1	0	6	0	0
2016/2017	2	1	1	2	1	7	0	0	0
2017/2018	2	2	1	2	2	0	0	9	0
2018/2019	2	2	1	2	1	8	0	0	0
2019/2020	1	1	1	2	1	0	6	0	0
Сумма						31	26	26	7

Для Табаги получены следующие значения: $a_{11} = 26; a_{12} = 31; a_{21} = 7; a_{22} = 26$, которые отражены в сформированной матрице (таблица 8). По данным таблицы с использованием формул (4) и (5) были получены расчётные значения

коэффициента ассоциации 0.5 и -0.5 для постов Табага, Якутск соответственно. Коэффициент контингенции для поста Кангалассы составил 0.6. Полученные значения показывают наличие средней связи между гидрологическими данными и уровнем заторной опасности. Положительный коэффициент на постах Табага и Кангалассы указывает на связь гидрологических данных в полноводье с заторной опасностью. Отрицательный коэффициент на посту Якутск указывает на заторную опасность при маловодье.

Таблица 8. Заторная опасность в зависимости от водности р. Лена в районе г/п Табага

Уровень	Полноводье	Маловодье	Всего
Наличие заторной опасности	26	7	33
Отсутствие заторной опасности	31	26	57
Всего	57	33	90

Результат анализа заторной опасности на участке р. Лена от Табагинского мыса до Кангалласского мыса представлен на рис. 7, на котором приведены данные о распределении предледоставного уровня воды (2011, 2012, 2016 и 2017 гг.). Отражены данные о толщине ледяного покрова в конце ледостава (2012, 2013, 2017 и 2018 гг.).

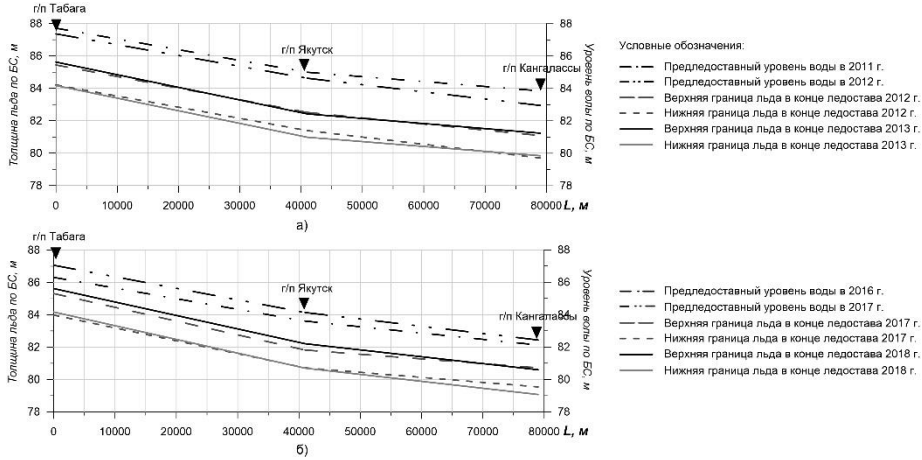


Рис. 7. Распределение данных о предледоставном уровне воды и толщине ледяного покрова на участке р. Лена от Табагинского мыса до Кангалласского мыса

На отрезке перелома уклона водной поверхности в районе поста Якутск (рис. 7а) и участке Табага-Кангалассы (рис. 7б) наблюдаются повышенные толщины льда. По данным георадиолокации выявлены локальные области повышенной толщины (рис. 6а,б). В ходе весеннего половодья 2013 г. возник ледовый затор ниже поста Кангалассы. В 2018 г. наблюдались ледовые заторы,

зарегистрированные на всех трёх постах. Гидрологические и георадиолокационные данные за период 2011-2012 гг. и 2016-2017 гг. позволили выявить отсутствие заторной опасности. По данным 2012-2013 гг. и 2017-2018 гг. выявлены факторы заторной опасности.

Русло реки на исследуемом участке характеризуется сложной геоморфологической структурой, включающей широкие поймы, систему разветвлений и единые островные массивы. Устойчивые выступы коренных пород в районе Табагинского и Кангаласского мыса (рис. 3а) образовали узкие участки, ограничивающие пропускную способность русла и создающие локальный гидравлический подпор. В этих местах реки отмечается большая глубина, которая способствует накоплению льдин. Эти особенности русла реки создают благоприятные условия для формирования ледовых заторов.

В период вскрытия реки динамическое взаимодействие потока с локальными областями неразрушенного ледяного покрова повышенной толщины приводит к их смещению вниз по течению. Пологий уклон водной поверхности вызывает замедление течения реки, выраженное заметнее в период полноводья, что способствует к накоплению ледовых полей в зоне сужения. Водный поток в условиях ограниченного пространства вызывает механическое разрушение, накопление и блокировку битых ледовых полей, что приводит к формированию головы ледового затора. При сочетании установленных гидрологических факторов и геоморфологических особенностей русла реки можно предположить местоположение формирования ледового затора, смещённое на один-два затороопасных участка вниз по течению относительно области повышенной толщины льда.

По результатам анализа гидрологических и георадиолокационных данных установлено, что весной 2009, 2010, 2013 и 2018 гг. на постах Табага, Якутск и Кангалассы наблюдались случаи ледовых заторов при сочетании определённых факторов: высокая водность предшествующего периода, распределение уклонов водной поверхности (0.056‰), наличие ледяного покрова торосового строения и повышенной толщины (150-250 см). По установленным факторам можно установить вероятность возникновения заторной опасности и его пространственное положение на участке реки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано решение важной научно-практической задачи - разработки методики георадиолокационного исследования ледяного покрова р. Лена и использование, совместно с гидрологическими данными, для оценки заторной опасности на протяжённых участках реки. Автором получены следующие основные результаты, имеющие научную и практическую значимость:

1. На основе результатов натурных исследований и анализа структуры волновых картин различного строения ледяного покрова р. Лена были установлены и описаны георадиолокационные признаки, обеспечивающие определение типа строения льда: береговой, монолитный, торосовый.

2. Разработана и апробирована методика георадиолокационного исследования ледяного покрова рек с борта воздушного судна, включающая профилирование запланированных маршрутов со скоростью до 150 км/ч с установленными параметрами измерений и географической привязкой точек измерений с помощью системы спутникового позиционирования, которая обеспечивает определение толщины льда и типа строения льда на протяжённых участках исследования.
3. Разработан и реализован алгоритм обработки и интерпретации данных георадиолокации, обеспечивающий обработку радарограмм ледяного покрова различного строения с определением типов строения льда по установленным георадиолокационным признакам, что позволяет получить информацию о толщине и типе строения льда в каждой точке измерений с географическими координатами.
4. Усовершенствован алгоритм картографического отображения данных георадиолокации на базе ГИС, включающий применение цветовой классификации значений толщины льда и маркировки основных типов строения ледяного покрова рек, что позволяет отобразить на картах пространственное распределение толщины и типов строения льда.
5. Адаптирован способ расчёта толщины льда, учитывающий предледоставный уровень воды, минимальный уровень воды в конце ледостава и региональные особенности исследуемого участка реки, что позволяет определить толщину льда на основе динамики уровня воды на реках в условиях отсутствия гидрологических постов.
6. На основе анализа гидрологических и георадиолокационных данных установлен комплекс факторов, способствующих определению заторной опасности на исследуемом участке реки: водность предшествующего периода, распределение уклонов водной поверхности, наличие областей ледяного покрова торосового строения и повышенной толщины.

Важнейшим практическим результатом диссертационной работы является применение разработанной методики в производственных работах с 2011 г. по 2023 г. при измерении толщины льда на р. Лена в предвесенний период по маршруту от села Рассолода до устья реки Алдан. Полученные результаты измерений переданы в Центр мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций ГБУ РС (Я) «Служба спасения РС (Я)» для составления схемы прохождения весеннего половодья.

ПЕРСПЕКТИВЫ

Для оперативной обработки данных георадиолокации необходим модуль автоматического выделения границ льда на радарограммах. Необходима разработка геоинформационной системы для оперативной обработки, визуализации и статистического анализа пространственных данных георадиолокации. Реализация предложенного способа анализа гидрологического режима на затороопасных участках северных рек.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные положения диссертации опубликованы в следующих изданиях:

В научных изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:

1. Фёдоров, М. П. Исследование структуры речного льда методом георадиолокации / М. П. Фёдоров, Л. Л. Федорова, А. В. Омельяненко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 12. – С.198-201.
2. Фёдоров, М. П. Оценка пространственной неоднородности ледяного покрова р. Лена методом георадиолокации / М. П. Фёдоров, Л. Л. Федорова, А. В. Омельяненко // Известия Уральского государственного горного университета. – 2019. – Вып. 4 (56). – С. 7-20.
3. Фёдоров, М. П. Методика георадиолокационных исследований ледяного покрова р. Лена на участке Табагинский мыс-Кангаласский мыс / М. П. Фёдоров // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2022. – № 5. – С.18-32.
4. Фёдоров, М. П. Исследование строения ледяного покрова на затороопасных участках р. Лена методом георадиолокации / М. П. Фёдоров, Л. Л. Федорова // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 10. – С. 130-135.
5. Фёдоров, М. П. Картирование различного строения ледяного покрова на затороопасном участке реки Лена методом георадиолокации / М. П. Фёдоров, Л. Л. Федорова // Гидрометеорология и экология. – 2024. – Вып. 74. – С.105-119.
6. Фёдоров, М. П. Оценка заторной опасности на участке среднего течения реки Лена по гидрологическим и георадиолокационным данным / М. П. Фёдоров, Н. И. Тананаев // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2025. – № 1 (76). – С.53-66.

В научных изданиях, включённых в «Белый список»:

7. Fedorov, M. P. Identification of River Ice Cover Structure by Ground Penetrating Radar Data [Электронный ресурс] / M. P. Fedorov, L. L. Fedorova // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2022. – V. 19. – Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org/document/9966564 **(К1)**

Патенты и свидетельства РФ:

8. Патент № 2548920 Российская Федерация, МПК G01S 13/95. Способ прогнозирования гидрологической обстановки на затороопасных участках рек: № 2013146507/28 ; заявл. 18.10.2013 ; опубл. 20.04.2015 / Н. А. Находкин, А. Н. Быков, А. В. Омельяненко, Л. Л. Федорова, М. П. Фёдоров, И. И. Христофоров, К. И. Кайгородов, П. А. Омельяненко; патентообладатель ГБУ АН РС (Я). – Бюл. № 11. – 6 с.
9. Свидетельство о государственной регистрации базы данных «База данных толщины и строения ледяного покрова реки Лена на затороопасных участках в районе сел Сырдах и Партизан Республика Саха (Якутия) в предвесенний период 2022 г. и 2023 г. (по данным георадиолокации)»: № 2023623351; зарегистрировано в Реестре баз данных 05.10.2023 / М. П. Фёдоров, С. Д. Шамаев, Л. Л. Федорова; правообладатель ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

10. Свидетельство о государственной регистрации базы данных «Данные исследования ледяного покрова реки Лена от Табагинского мыса до Кангаласского мыса (Республика Саха (Якутия)) георадаром воздушного базирования в предвесенний период 2022 г. и 2023 г.»: № 2023624919; зарегистрировано в Реестре баз данных 22.12.2023 / Л. Л. Федорова, М. П. Фёдоров, С. Д. Шамаев; правообладатель ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Подписано в печать 16.09.2025.
Печать цифровая. Формат 148х210мм.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ №16257. Отпечатано в ИП Суханова О.И.
Центр полиграфии «MAYAPRINT»
677027, г. Якутск, ул. Петровского, д. 32/2, офис 125.
Тел. +7 (4112) 24-01-99. E-mail: mayaprint@mail.ru