

Гидрометеорология и экология. 2024. 74. С. 105—119.

Hydrometeorology and Ecology. 2024;(74):105—119.

Научная статья

УДК [556.535.5:621.396.96](282.256.6)

doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-105-119

Картирование различного строения ледяного покрова на заторооопасном участке реки Лены методом георадиолокации

Максим Петрович Фёдоров, Лариса Лукинична Федорова

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск, Российская
Федерация, mpfedoroff@gmail.com

Аннотация. В данной статье представлены результаты изучения строения ледяного покрова рек методом георадиолокации с борта летательного аппарата. На основе анализа полевых георадарных данных, полученных на заторооопасном участке р. Лены у с. Партизан в апреле 2022 г. и 2023 г., уточнены особенности волновых картин (радарограмм) ледяного покрова различного строения в предвесенний период. Использование разработанного алгоритма обработки и интерпретации данных георадиолокации позволило построить карту с отображением пространственного распределения толщины льда и его строения на исследуемом участке специальными маркерами. В практических целях результаты георадиолокации позволяют уточнить краткосрочный прогноз сроков вскрытия рек и скорректировать план превентивных мероприятий по разрушению ледяного покрова с толщиной, превышающей установленный норматив.

Ключевые слова: толщина льда, модели строения ледяного покрова, георадиолокация.

Благодарности: Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-27-00751, <https://rscf.ru/project/22-27-00751/>. Раздел «Методы исследований» выполнен в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0020, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800086-1) с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант № 13.ЦКП.21.0016).

Для цитирования: Фёдоров М. П., Федорова Л. Л. Картирование различного строения ледяного покрова на заторооопасном участке реки Лены методом георадиолокации // Гидрометеорология и экология. 2024. № 74. 105—119. doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-105-119.

Original article

Mapping of different ice cover structure in the jam-prone section of the Lena River by ground penetrating radar method

Maksim P. Fedorov, Larisa L. Fedorova

Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk,
Russian Federation, mpfedoroff@gmail.com

Summary. This article discusses the materials of studying the structure of river ice cover by the ground penetrating radar (GPR) method from the light-engine aircraft. Field GPR studies of the ice cover of the

Lena River were conducted on an area of 6 km² near the village of Partizan in April 2022 and 2023. An ice jam forms on this site each spring during the ice drift process. On the basis of the analysis of field GPR data the features of wave patterns (radargrams) of ice cover of different structure in the pre-spring period were specified. The use of the developed algorithm for processing and interpretation of the GPR data made it possible to construct a map showing the spatial distribution of ice thickness and its structure in the study area. According to the color classification of the ice thickness range, it was determined that the ice thickness in the studied area is heterogeneous. It was found that in 2022 the ice cover with a thickness of 100—150 cm prevails. And in 2023, lower values of ice thickness in the range of 50—100 cm are mainly observed. This is connected with abundant snowfalls in the winter of 2022—2023, which resulted in the slowing down of the ice cover growth process. At the same time, localised ice cover massifs of increased thickness within 150—200 cm were detected. With the help of special markers mapped and indicating the different structure of the ice cover, it was revealed in 2022 that monolithic ice was spread by 50 %, hummock ice occupies 49 % and fast ice only 1 %. According to the data for 2023, monolithic ice covers 36 % of the study area, hummocky ice covers 60 % of it, and fast ice covers only 4 % of it. At the same time, it should be noted that hummocky ice prevails in 24 % of cases compared to monolithic ice. For practical purposes, the results of the GPR can be used to refine the short-term forecast of river opening dates and adjust the plan of preventive measures to destroy the ice cover with a thickness exceeding the established norm.

Keywords: ice thickness, ice cover structure models, ground penetrating radar.

Acknowledgements: “This work has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF 22-27-00751, <https://rscf.ru/project/22-27-00751/>”. The section “Research Methods” was performed within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 0297-2021-0020, reg No. 122011800086-1) with the use of equipment of the Shared core facilities of the Federal Research Center ‘YSC SB RAS’ (grant No. 13.SCF.21.0016).

For citation: Fedorov M. P., Fedorova L. L. Mapping of different ice cover structure in the jam-prone section of the Lena River by ground penetrating radar method. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(74):105—119. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-105-119.

Введение

Вопрос борьбы с опасными ледовыми явлениями на водных объектах, оценка их потенциального риска на арктических территориях России актуальны для своевременного прогнозирования и принятия эффективных мер по их предотвращению. Например, ледовые заторы льда, формирующиеся в процессе вскрытия северных рек, сопровождаются резким подъёмом уровня воды, что приводит к опасным наводнениям. Так, ущерб, причинённый наводнениями экономике Республики Саха (Якутия) за период с 1998 г. по 2013 г., составил примерно 17,1 млрд. руб. [1].

В настоящее время в России и за рубежом в качестве дистанционного метода измерения толщины льда с борта летательного аппарата активно применяется метод георадиолокации, который решает следующие задачи: мониторинг толщины и состояния ледовых переправ на реках, определение толщины льда на участках речных переходов инженерных сооружений (трубопроводов, мостов и т. д.). При этом недостаточно изучается вопрос определения строения ледяного покрова [2]. Существующая потребность в разработке новых подходов к изучению ледяного покрова различного строения на масштабных территориях дистанционным методом измерений определяет актуальность представленных материалов исследований.

Изучение строения ледяного покрова рек методом георадиолокации рассмотрено на примере крупнейшей в Восточной Сибири реки Лены, которая течет

в северном направлении и впадает в море Лаптевых. Ежегодно с приходом холодной и продолжительной зимы на реке формируется ледяной покров. Ледообразование на реке Лене обычно начинается в октябре и быстро распространяется по всей длине реки [3, 4]. Процесс замерзания реки завершается установлением ледостава на средней Лене в районе г. Якутска, что происходит в первой декаде ноября. В период ледостава ледяной покров характеризуется строением, толщиной и прочностью льда, которые определяют несущую способность ледяного покрова, его способность разлома и сопротивления воздействию внешних сил [5—7].

По данным полевых наблюдений и аналитического обзора [8, 9], на реке Лене в основном преобладают береговой, монолитный и торосовый лёд, также встречаются наледный лёд у склонов надпойменных террас и шуговой лёд. Для описания строения льда была использована классификация Д. В. Козлова [3, 9], из которой следует, что монолитный лёд обычно образуется из однородных кристаллов, которые сформировались в спокойной обстановке, создавая гладкий прозрачный лёд с включенными воздушными пузырьками. Монолитный лёд прослеживается на спокойных участках реки. На мелководных участках реки ледяной покров при снижении уровня воды оседает на грунт с последующим примерзанием, такой лёд называется береговым. Сильные ветра и течения в реке вызывают взлом монолитного льда и его нагромождения, образуя торосовый лёд. При послойном замерзании воды, поступающей на поверхность ледяного покрова, образуется наледный лёд [10].

Толщина льда на реке Лене в период ледостава интенсивно увеличивается и достигает максимальных значений в апреле. В конце ледостава толщина льда может варьировать в пределах 100—250 см. Прочность ледяного покрова на сжатие и изгиб, по данным К. Н. Коржавина [9], при температуре, близкой к нулю градусов по Цельсию, составляет 450—650 кПа. С приходом весны ледяной покров подвергается тепловому воздействию солнечной радиации. При поглощении льдом тепла происходит поверхностное и внутреннее таяние, приводящее к увеличению пор, прослоек и появлению воды, под воздействием чего уменьшается толщина и прочность льда. По данным [11], прочность льда в период таяния снижается до 30 кПа.

При весеннем ледоходе характеристикой сопротивляемости ледяного покрова разрушению является относительная прочность, зависящая от типа строения льда и его толщины. Под воздействием динамических нагрузок со стороны водного потока и ветра, превышающим остаточную прочность льда, происходит дальнейший распад ледяного покрова на поля и льдины. В случае недостаточности кинетической энергии потока воды для дальнейшего разрушения скопления ледовых полей, находящегося ниже по течению участка, возможно образование ледового затора.

Таким образом, целью работы является изучение характеристик ледяного покрова на затороопасном участке реки Лены с применением разработанной методики георадиолокационного исследования с борта летательного аппарата.

Методы и материалы исследования

Георадиолокация – это геофизический метод, основанный на излучении электромагнитных волн с последующим приёмом сигналов, отражённых от границ раздела слоёв зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства [12—16]. Результатом георадарных исследований среды является радарограмма, представляющая собой набор трасс, каждая из которых показывает изменение во времени массива амплитуд сигнала. На радарограмме сигналы, отражённые от границ раздела сред, наблюдаемые максимумы и минимумы сигналов, а также их фазы, прослеживающиеся на соседних трассах, представлены в виде линии, известной как ось синфазности. Минимум полуволны отражённого сигнала отображается на оси синфазности в белом цвете, а максимум полуволны — в чёрном цвете.

В исследуемой среде (воздух—лёд—вода) возникают интенсивные отражения электромагнитных волн, которые обусловлены большой разницей в значениях диэлектрической проницаемости. Диэлектрическая проницаемость воздуха составляет $\varepsilon' = 1$ [13]. В диапазоне радиочастот диэлектрическая проницаемость пресного льда по материалам исследований [16—19] равна 3,2, а у воды — 81 [16]. Распространение электромагнитных волн в среде характеризуется скоростью

$\left(V, \frac{M}{нс}\right)$, которая вычисляется по формуле: $V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'}}$, где $c = 0,3 \frac{M}{нс}$ — скорость распространения волны в вакууме.

На радарограмме, определяя время задержки сигнала ($\Delta t, нс$), отражённого от границ исследуемой среды, и зная скорость распространения волны в этой среде, можно определить её толщину

$$H = \frac{V \Delta t}{2} \quad [12, 13].$$

Экспериментальные исследования распространения электромагнитных волн в ледяном покрове различного строения в естественных условиях были выполнены на тестовых участках реки Лены около г. Якутска в марте—апреле 2022 г. и на затороопасном участке в районе села Партизан в апреле 2022 г. [20, 21], 2023 г. (рис. 1). Затороопасный участок расположен между Кангаласским мысом и местом впадения реки Алдан в реку Лену. Как следует из источника [22], в строении русла сочетаются особенности разных морфодинамических типов, Верхний участок русла извилист, образуя изгибы с периодичностью около 8—11 км, и имеет разветвления. Также на нем наблюдается многорукавность поймы. Средний и нижний участки русла разделены на рукава, которые направлены в сторону правого берега. Поймы на этой территории преимущественно расположены на левом берегу и имеют ширину 12—15 км. По этим причинам в этом месте происходят самые масштабные и значительные наводнения, вызываемые формированием заторов и приводящие к затоплению населенных пунктов (Едейцы, Партизан, Графский берег, II Хомустах) и пригородов г. Якутска [23].

До полевых измерений на исследуемом участке площадью 6 км² были намечены в геоинформационной системе QGIS три параллельных маршрута измерений

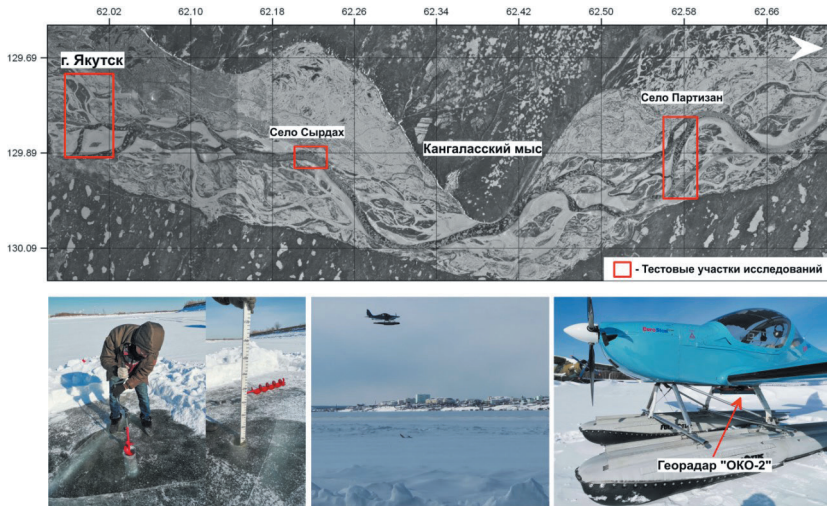


Рис. 1. Обзорный спутниковый снимок р. Лены на котором отмечены тестовые участки георадарных измерений с борта самолета EuroStar SLW.

Fig. 1. Overview satellite image of the Lena River, showing test sites of GPR measurements from the EuroStar SLW airplane.

вдоль русла реки. При этом были использованы спутниковые снимки предзимнего периода (Sentinel—2), так как на весенних спутниковых снимках сложно определить границы русла реки под снежным покровом. На снимках, сделанных перед началом зимы, хорошо видно незамерзшее русло, позволяющее спланировать маршруты измерений.

В ходе экспериментальных и полевых работ применялся георадар «ОКО-2» с модернизированным антенным блоком АБ400, позволяющим проводить дистанционные исследования. При апробации данного антенного блока на реке Лене абсолютная погрешность георадарных измерений толщины ледяного покрова составила 1,0 см, а относительная погрешность — 1,0 % [24]. При исследованиях ледяного покрова в районе с. Партизан применялся легкомоторный самолет EuroStar SLW. Такой выбор обусловлен рядом преимуществ данного типа самолетов: дальность полета до 1300 км, минимальная скорость полета 100 км/ч (крейсерская скорость 200 км/ч), возможность выполнения полетов на малых высотах и доступная стоимость аренды самолета. Создан специальный комплект креплений для монтажа антенного блока к днищу самолёта. В процессе измерений скорость полёта самолёта варьировалась от 100 до 150 км/ч при высоте полета 20—30 м. Навигация по маршруту измерений и привязка данных георадиолокации осуществлена посредством спутникового приемника. Управление георадаром «ОКО-2» во время измерений, ввод оптимальных параметров сканирования, наблюдение за процессом измерений и сохранение полевых данных осуществлялись посредством мобильного полевого компьютера с программным обеспечением

«GeoScan32». В рамках работ были получены 6 георадарных профилей, состоящих из 121 000 точек зондирования. Общая протяжённость профилей составила 53 км.

На тестовых участках было проведено бурение лунок, в которых измерена толщина льда ледомерной рейкой для заверки данных георадиолокации. После схода снежного покрова в первых числах мая 2023 г. были выполнены фотосъёмки поверхности ледяного покрова на затороопасном участке камерой квадрокоптера для уточнения результатов интерпретации.

Результаты исследований

По данным экспериментальных исследований ледяного покрова различного строения на тестовых участках, выполнен анализ волновых характеристик радарограмм (симметричность, субгоризонтальность, нарушенность, фрагментность осей синфазности отраженных волн, амплитуда и фаза отражений). По итогам анализа были разработаны георадарные волновые картины моделей ледяного покрова различного строения: береговой лёд, монолитный лёд, торосовый лёд, ледяной покров, на поверхности которого вода [20, 21]. На рис. 2 приведены схемы рассмотренных моделей и их радарограммы.

Для отображения различных типов строения ледяного покрова на картах были предложены специальные маркеры, позволяющие оперативно проследить тип льда на исследуемом участке. Далее следует описание признаков волновых характеристик ледяного покрова различного строения:

— На радарограмме *берегового льда* наблюдаются устойчивые, прослеживаемые субгоризонтальные оси синфазности отраженных волн от верхней границы. Нижняя граница льда, контактирующая с грунтом, представлена слабоконтрастными осями синфазности с низкой амплитудой отраженных волн.

— На радарограмме *монолитного льда* отображаются протяженные субгоризонтальные оси синфазности отраженных волн от верхней границы. Нижняя граница монолитного льда в контакте с водой представлена субгоризонтальными осями синфазности, высокой амплитудой и сменой фазы отраженных волн.

— На радарограмме *торосового льда* прослеживаются нарушенные оси синфазности от верхней границы. На нижней границе прослеживаются оси синфазности отраженных и дифрагированных волн. Нижняя граница торосового льда в контакте с водой характеризуется высокой амплитудой и сменой фазы отраженных волн.

— На радарограмме *ледяного покрова*, на поверхности которого вода, прослеживаются контрастные оси синфазности отраженных волн и их многократные переотражения. Отражения на границе «воздух—вода» отмечаются высокой амплитудой.

По данным георадарных исследований физических моделей берегового льда, монолитного льда и торосового льда, выполнен статистический анализ амплитудных значений сигналов, отраженных от границ льда [20, 21]. Результаты показали, что средняя амплитуда от верхней границы берегового льда и монолитного

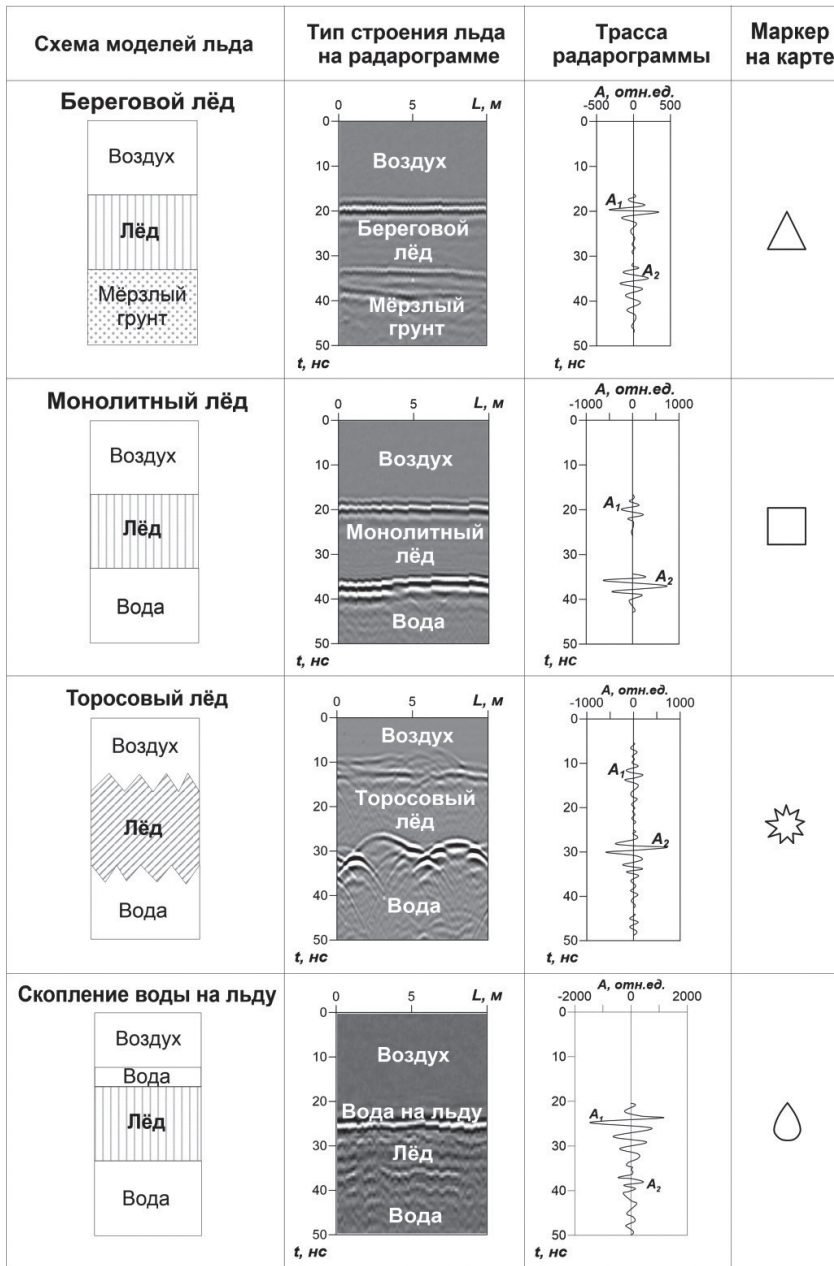


Рис. 2. Схемы моделей ледяного покрова различного строения и их георадарные волновые картины.

Fig. 2. Schematics of ice cover models of various structures and their GPR wave patterns.

льда — 360 и 225 отн. ед., от нижней границы — 161 и 629 отн. ед. соответственно. Коэффициент вариации амплитуд от верхней границы берегового и монолитного льда составил 18 % и 14 %, от нижней границы — 20 % и 19 % соответственно. На радарограмме торосового льда прослеживаются нарушенные оси синфазности отраженных и дифрагированных волн от границ льда. Амплитуда сигнала, отраженного от верхней границы торосового льда $A_1 = 381$ отн. ед., от нижней границы $A_2 = 1202$ отн. ед. Коэффициент вариации амплитуд от верхней границы торосового льда — 28 %, от нижней границы — 48 %. Высокие значения коэффициента вариации амплитуд отражений свидетельствуют о неровном, нарушенном ледяном покрове. Установлено, что значение коэффициента вариации амплитуды отраженных волн от ледяного покрова является одним из признаков определения типа строения ледяного покрова: меньше 20 % — береговой или монолитный лед; больше 28 % — торосовый лед.

Применение разработанного алгоритма обработки и интерпретации [20] позволило данные георадарных измерений в районе с. Партизан представить в виде карты. На первом этапе алгоритма в программе «GeoScan32» были применены следующие инструменты обработки радарограмм: редактирование полученного набора трасс; устранение помех и прямого сигнала; восстановление разрешения полезных сигналов и привязка точек зондирования с географическими координатами по полученным данным GPS приёмника. На втором этапе была интерпретация обработанных радарограмм с помощью признаков ледяного покрова различного строения [20, 21]. На третьем этапе применен модуль программы «Слои на профиле», с помощью которого выделены установленные оси синфазности отражённых волн от верхней и нижней границы льда. Инструментом модуля «Выпрямление» устранено влияние нестабильной высоты полёта самолёта на радарограммах. Временной разрез с выделенными границами льда был преобразован с учётом диэлектрической проницаемости пресного льда в глубинный разрез.

В качестве примера приведён фрагмент радарограммы (рис. 3), на которой прослеживаются оси синфазности отражённых волн от верхней (I) и нижней (II) границ льда. По признакам были определены монолитный лёд и торосовый лёд. Также установлено, что лёд контактирует с водой по наличию высокой амплитуды сигналов отражённых волн от нижней границы льда. В результате обработки проинтерпретированных радарограмм была создана база данных, содержащая набор данных о толщине и строении льда с географическими координатами.

На последнем этапе обработки реализуется разработанный нами алгоритм визуализации данных георадиолокации в геоинформационной системе QGIS. Эта система позволяет отображать, редактировать и управлять данными, а также создавать на их основе информационные продукты. Процесс визуализации включает в себя: создание нового проекта, загрузку слоя карты OpenStreetMap и добавление слоя из текстового файла. Далее следует настройка стиля маркеров для отображения строения льда, а также настройка стиля и классификация значений толщины льда. Дополнительно осуществлена цветовая заливка толщины льда по маршруту исследования в соответствии с классификацией. Затем создан макет карты, который экспортируется в виде изображения. Также можно создать интерактивную

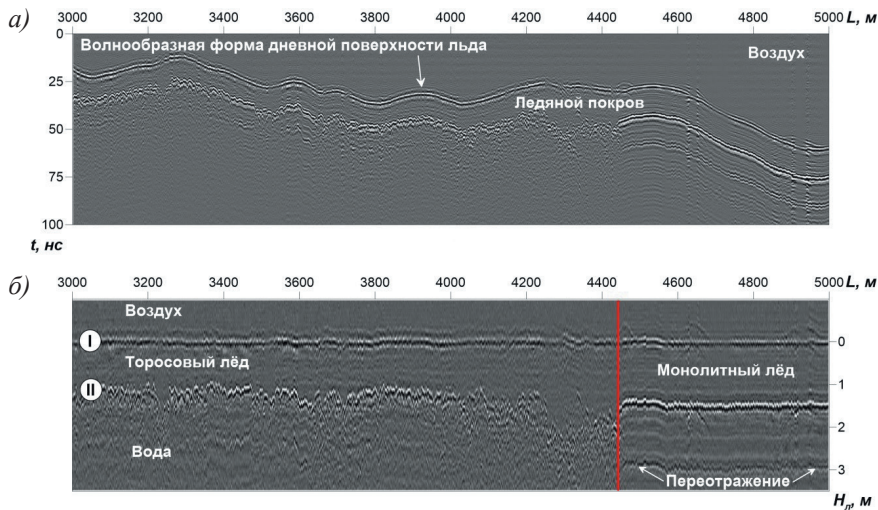


Рис. 3. Результат георадарных исследований ледяного покрова:

- а)* исходный фрагмент радарограммы;
б) проинтерпретированный фрагмент радарограммы с установленным строением льда.

Fig. 3. Result of GPR studies of the ice cover:

- a)* initial fragment of the radargram;
b) interpreted fragment of the radargram with the established ice structure.

веб-страницу в формате html, содержащую информацию о толщине и строении льда.

На рис. 4 представлены карты с маршрутами георадарных исследований, созданные с помощью QGIS. Влияние сильного ветра в процессе измерений с борта самолета привело к отклонению от заданного маршрута, что отразилось на карте в виде непрямолинейных маршрутов исследования и залетов на осередки, обозначенные на маршруте коричневым цветом. Максимальное расстояние между маршрутами было 400 м, а минимальное расстояние — 50 м. На рис. 4 маркеры представлены с интервалом 80 м, что позволяет наглядно показать пространственную изменчивость толщины и строения льда.

Данные георадиолокации показали, что ледовая обстановка в конце ледостава 2022 г. и 2023 г. имела различные условия формирования ледяного покрова. В 2022 г. преобладает ледяной покров толщиной 100—150 см (рис. 4 *а*). В 2023 г. по маршрутам наблюдаются в основном пониженные значения толщины льда в пределах 50—100 см (рис. 4 *б*). Это связано с обильными снегопадами зимой 2022—2023 гг., которые привели к замедлению процесса нарастания ледяного покрова. При этом выявлены локализованные массивы ледяного покрова повышенной толщины в пределах 150—200 см. Специальными маркерами обозначены установленные типы строения ледяного покрова на карте. По маркерам можно проследить изменения строения льда по маршруту исследования. Анализ данных

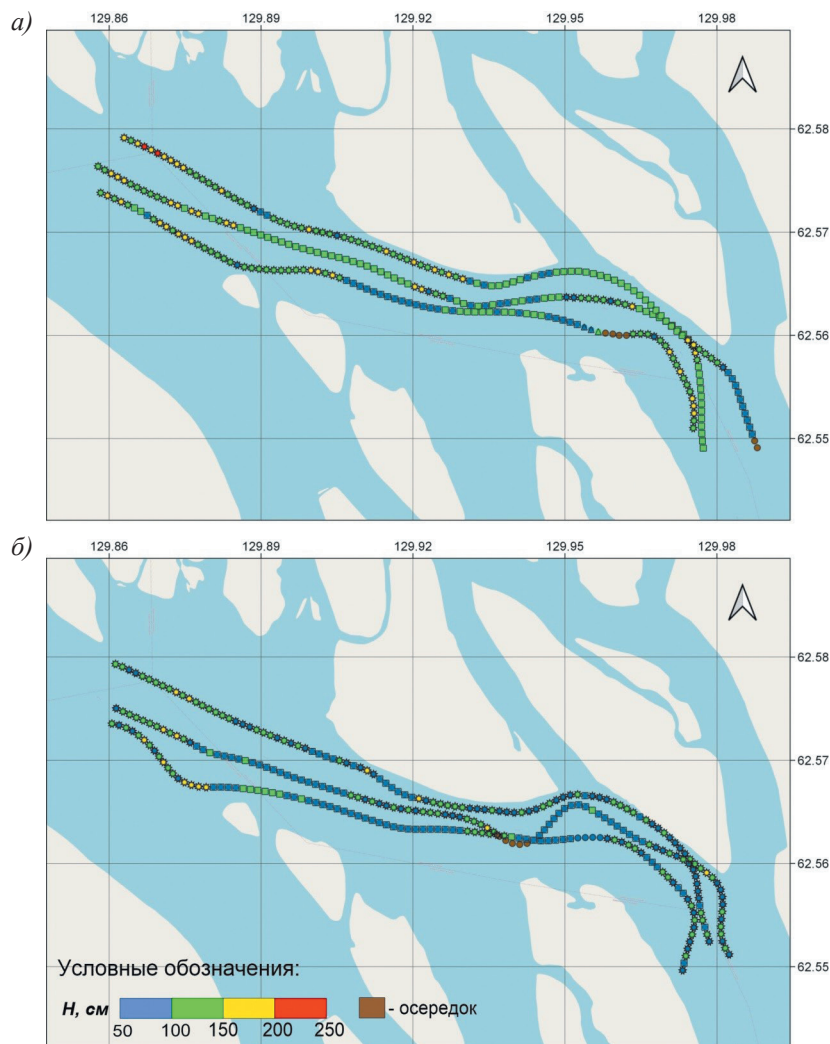


Рис. 4. Карта распределения толщины и строения льда около села Партизан, по данным георадиолокации, полученным в апреле 2022 г. (а) и 2023 г. (б).

Fig. 4. Map of ice thickness distribution and structure near Partizan village according to the GPR data obtained in April 2022 (a) and 2023 (b).

о строении льда показал, что в 2022 г. монолитный лед был распространен на 50 %, торосовый лед — на 49 % и береговой лед — на 1 %. По данным 2023 г., на участке исследования монолитный лёд распространён на 36 %, торосовый лёд — на 60 % и береговой лёд — на 4 %. При этом отмечается, что торосовый лёд преобладает на 24 % по сравнению с монолитным льдом.



Рис. 5. Фотография поверхности ледяного покрова около села Партизан.

Fig. 5. Photograph of the ice cover surface near Partizan village.

Установленные различные типы строения, по данным георадиолокации, подтверждаются фотографиями поверхности ледяного покрова. На рис. 5 представлен пример снимка, полученного со стороны северо-западного направления. Визуальный анализ снимков показал, что ледяной покров в русле реки выражен от темного до светло-серого оттенка. Темная зона поверхности ледяного покрова соответствует монолитному льду, а светло-серая зона относится к торосовому льду.

Из работы [11] следует, что монолитный лёд обладает высоким коэффициентом прозрачности, в среднем 0,96—0,98. Неоднородный лёд (торосовый лёд и шуговой лёд), состоящий из беспорядочно смёрзшихся кристаллов, содержащих большое количество пузырьков воздуха и твёрдых частиц, является малопрозрачным. Коэффициент прозрачности такого льда колеблется в пределах от 0,47 до 0,52. Он характеризуется неравномерным поглощением и рассеянием солнечной радиации. Следовательно, наибольшая интенсивность внутреннего таяния у монолитного льда, в то время как у торосового льда таяние происходит с поверхности. Можно предположить, что участки монолитного льда в большей степени готовы к динамическому разрушению, нежели участки торосового льда.

Заключение

На примере реки Лены рассмотрено изучение различного строения ледяного покрова рек методом георадиолокации. По материалам исследований были разработаны георадарные волновые картины моделей ледяного покрова различного строения: береговой лёд, монолитный лёд, торосовый лёд, ледяной покров, на поверхности которого вода. При этом установлены соответствия характеристик осей синфазности отраженных волн (симметричность, субгоризонтальность, нарушенность, фрагментность) типу строения ледяного покрова. Статистический

анализ амплитудных значений сигналов, отраженных от границ ледяного покрова различного строения, показал, что значение коэффициента вариации амплитудных значений сигналов, отраженных от границ льда, является одним из признаков определения типа строения ледяного покрова: меньше 20 % — береговой или монокристаллический лёд; больше 28 % — торосовый лёд.

Усовершенствован метод планирования маршрутов с применением спутниковых снимков, полученных в предзимний период, что позволяет повысить результативность исследований. Следование по запланированному маршруту и пространственная привязка положения точек зондирования георадара осуществляется при помощи GPS приёмника. Разработан алгоритм обработки данных георадарных исследований, обеспечивающий достоверное определение толщины льда и распознавание типов строения ледяного покрова. Разработан алгоритм визуализации результатов георадиолокации с применением геоинформационной системы QGIS, позволяющий построить карты с отображением толщины и строения ледяного покрова по маршрутам исследований.

Апробация разработанной методики георадиолокационного исследования ледяного покрова северных рек позволила построить карты пространственного распределения толщины и строения ледяного покрова на заторопленном участке р. Лены в районе села Партизан. Установлено, что ледовая обстановка в конце ледостава 2022 г. и 2023 г. имела различные условия формирования ледяного покрова. В 2022 г. преобладает ледяной покров толщиной 100—150 см. В 2023 г. по маршрутам наблюдаются в основном пониженные значения толщины льда в пределах 50—100 см. При этом выявлены локализованные массивы ледяного покрова повышенной толщины в пределах от 150 до 200 см. Анализ данных о строении льда показал, что в 2022 г. монокристаллический лёд был распространён на 50 %, торосовый лёд — на 49 % и береговой лёд — на 1 %. По данным 2023 г., на участке исследования монокристаллический лёд распространён — на 36 %, торосовый лёд — на 60 % и береговой лёд — на 4 %. При этом отмечается, что торосовый лёд преобладает на 24 % по сравнению с монокристаллическим льдом.

В практических целях результаты георадиолокации позволяют уточнить краткосрочный прогноз сроков вскрытия рек и скорректировать план превентивных мероприятий по разрушению ледяного покрова с толщиной, превышающей установленный норматив, для обеспечения безопасного прохождения льда в период весеннего ледохода.

Список литературы

1. Бурцева Е. И., Парфенова О. Т. Экономический ущерб от наводнений на реках Республики Саха (Якутия) // Проблемы современной экономики. 2015. № 1(53). С.256—259.
2. Федоров А. А., Шамаев С. Д., Давыдова Т. А. Аналитический обзор современного состояния георадиолокационных исследований ледяного покрова рек // Сборник трудов VI международной конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». М.: Перо, 2022. С. 232—235.
3. Козлов Д. В. Лед пресноводных водоемов и водотоков. М.: МГУП, 2000. 263 с.
4. Голубев В. Н. Формирование ледового покрова на пресноводных водоемах и водотоках // Вестник Московского университета. Сер.5. География. 2014. № 2. С. 9—16.

5. Аржакова С. К. Зимний сток рек криолитозоны России. М.: РГГМУ, 2001. 209 с.
6. Лобанов В. А., Горошкова Н. И. Характеристики ледового режима рек Республики Саха (Якутия) и их климатические изменения // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 55. С. 86—98. doi: 10.33933/2074-2762-2019-55-86-98.
7. Чижов А. Н. Формирование ледяного покрова и пространственное распределение его толщины. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 128 с.
8. Зайцев А. А., Кирик О. М., Михайлов В. С. Взаимодействие речного льда с руслом на р. Лене и её притоках // Эрозия почв и русловые процессы. 2008. Вып. 16. С. 242—262.
9. Козлов Д. В. Моделирование ледовых явлений. М.: ИВП, 2020. 145 с.
10. Козлов Д. В., Бузин В. А., Фролова Н. Л. и др. Опасные ледовые явления на реках и водохранилищах России. М.: РГАУМСХА им. К.А. Тимирязева, 2015. 348 с.
11. Донченко Р. В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 248 с.
12. Мачерет Ю. Я. Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
13. Владов М. Л., Судакова М. С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений. М.: ГЕОС, 2017. 240 с.
14. Дьяков А. Ю., Калашник А. И. Методические основы георадарных исследований горнотехнических объектов. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2021. 110 с. doi: 10.37614/978.5.91137.443.3
15. Jol H. M. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Elsevier Amsterdam Netherlands. 2009. 544 p.
16. Annan A. P. Ground Penetrating Radar Applications Procedures & Principles. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://geolportal.sdsu.edu/jiracek/sage/documents/Sensors and Software GPR Manual.pdf> (дата обращения 20.05.2023).
17. Matzler C., Wegmuller U. Dielectric properties of fresh-water ice at microwave frequencies // J. Physics D: Applied Physics. 1987. Vol. 20. P. 1623—1630. doi:10.1088/0022-3727/20/12/013
18. Fujita F., Matsuoka T., Ishida T., et al. A summary of the complex dielectric permittivity of the in the megahertz range and its application for radar sounding of polar ice sheets // Physics of the ice core (ed. Hondoh). Hokkaido University Press, 2000. P. 185—212.
19. Matsuoka T., Fujita F., Morishima S., Mae S. Precise measurement of dielectric anisotropy in ice Ih at 39 GHz // J. Applied Physics. 1997. Vol. 81. №5. P. 2344—2348.
20. Fedorov M. P., Fedorova L. L. Identification of River Ice Cover Structure by Ground Penetrating Radar Data // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2022. doi: 10.1109/LGRS.2022.3225560. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9966564>. (дата обращения: 20.05.2023)
21. Фёдоров М. П., Федорова Л. Л. Исследование строения ледяного покрова на затороопасных участках р. Лена методом георадиолокации // Успехи современного естествознания. 2022. № 10. С. 130—135. doi:10.17513/use.37920
22. Андросов И. М., Завадский А. С. Оценка негативного воздействия вод реки Лены на населенные пункты Республики Саха (Якутия) // Труды VIII Международной научно-практической конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». М.: РУДН, 2014. Т. 1. С. 5—16.
23. Федеральное агентство водных ресурсов ФГУ «Востсибрегионводхоз» Аналитический отчет о результатах наблюдений за состоянием водных объектов в зоне деятельности ФГУ «Востсибрегионводхоз» за 2011 г. Иркутск, 2012. 128 с.
24. Fedorov M. P., Fedorova L. L., Omelyanenko A. V. Investigation of the Lena river ice cover by GPR from helicopter / 14th International Conference on Ground Penetrating Radar, 2012. doi: 10.1109/ICGPR.2012.6254958 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6254958/> (дата обращения: 20.05.2023).

References

1. Burtseva E. I., Parfenova O. T. Economic damage caused by floods of the rivers in Sakha Republic (Yakutia). *Problemy sovremennoj ekonomiki = Problems of modern economics*. 2015; 1(53): (256—259). (In Russ.).

2. Fedorov A. A., Shamaev S. D., Davydova T. A. Analytical review of the current state of georadiolocation studies of river ice cover. *Sbornik trudov VI mezhdunarodnoj konferencii Gidrometeorologiya i ekologiya: dostizheniya i perspektivy razvitiya = Proceedings of the VI International Conference Hydrometeorology and ecology: achievements and prospects of development*. Moscow: Pero, 2022; (232—235). (In Russ.).
3. Kozlov D. V. *Led presnovodnykh vodoemov i vodotokov = Ice in freshwater reservoirs and watercourses*. Moscow: MSUP, 2000: 263 p. (In Russ.).
4. Golubev V. N. Formation of ice cover on fresh-water reservoirs and water courses. *Vestnik Moskovskogo universiteta = Moscow University Bulletin*. 2014; (2): (9—16). (In Russ.).
5. Arzhakova S. K. *Zimnij stok rek kriolitozony Rossii = Winter runoff of rivers of the cryolithozone of Russia*. Moscow: RSHMU, 2001: 209 p. (In Russ.).
6. Lobanov V. A., Goroshkova N. I. Characteristics of the ice regime of the rivers of the Sakha Republic (Yakutia) and their climatic changes. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific Notes of the RSHMU*. 2019; (55): (86—98). (In Russ.). doi: 10.33933/2074-2762-2019-55-86-98.
7. Chizhov A. N. *Formirovanie ledyanogo pokrova i prostranstvennoe raspredelenie ego tolshhiny = Ice cover formation and spatial distribution of its thickness*. Leningad: Hydrometeoizdat, 1990: 128 p. (In Russ.).
8. Zaitsev A. A., Kirik O. M., Mikhailov V. S. Interaction of river ice with the channel on the Lena River and its tributaries. *Eroziya pochv i ruslovyje processy = Soil erosion and channel processes*. 2008; (16): (242—262). (In Russ.).
9. Kozlov D. V. *Modelirovanie ledovykh yavlenii = Modeling of ice phenomena*. Moscow, 2020: 145 p. (In Russ.).
10. Kozlov D. V., Buzin V. A., Frolova N. L. et al. *Opasnye ledovye yavleniya na rekakh i vodokhranilishchakh Rossii = Dangerous ice phenomena on rivers and reservoirs in Russia*. Moscow: RGAUMSHA, 2015: 348 p. (In Russ.).
11. Donchenko R. V. *Ledovyyi rezhim rek SSSR = Ice regime of the rivers of the USSR*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987: 248 p. (In Russ.).
12. Macheret Y. Ya. *Radiozondirovanie lednikov = Radiosounding of glaciers*. Moscow: Nauchny Mir, 2006: 392 p. (In Russ.).
13. Vladov M. L., Sudakova M. S. *Georadiolokatsiya. Ot fizicheskikh osnov do perspektivnykh napravlenii = GPR. From physical foundations to promising directions*. Moscow: GEOS, 2017: 240 p. (In Russ.).
14. Dyakov A. Y., Kalashnik A. I. *Metodicheskie osnovy georadarnykh issledovaniy gornotekhnicheskikh ob"ektov = Methodical bases of GPR studies of mining objects*. Apatity: FIC KSC RAS, 2021: 110 p. (In Russ.). doi: 10.37614/978.5.91137.443.3
15. Jol H. M. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. *Elsevier Amsterdam Netherlands*. 2009: 544 p.
16. Annan A. P. Ground Penetrating Radar Applications Procedures and Principles. Available at: <https://geolportal.sdsu.edu/jiracek/sage/documents/Sensors and Software GPR Manual.pdf> (accessed on 20.05.2023).
17. Matzler C., Wegmuller U. Dielectric properties of fresh-water ice at microwave frequencies. *J. Physics D: Applied Physics*. 1987; (20): 1623—1630. doi:10.1088/0022-3727/20/12/013
18. Fujita F., Matsuoka T., Ishida T., et al. A summary of the complex dielectric permittivity of the in the megahertz range and its application for radar sounding of polar ice sheets. *Physics of the ice core (ed. Hondoh)*. Hokkaido University Press. 2000: 185—212.
19. Matsuoka T., Fujita F., Morishima S., Mae S. Precise measurement of dielectric anisotropy in ice Ih at 39 GHz. *J. Applied Physics*. 1997; 81(5): 2344—2348.
20. Fedorov M.P., Fedorova L.L. Identification of River Ice Cover Structure by Ground Penetrating Radar Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2022. doi: 10.1109/LGRS.2022.3225560. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9966564>. (accessed on: 20.05.2023)
21. Fedorov M. P., Fedorova L. L. Study of the structure of the ice cover in the ice hazardous areas of the Lena River by GPR method. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in current natural sciences*. 2022; (10): (130—135). (In Russ.). doi:10.17513/use.37920
22. Androsov I. M., Zavatsky A. S. Assessment of the negative impact of the Lena River waters on the settlements of the Republic of Sakha (Yakutia). *Trudy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi*

konferentsii «Dinamika i termika rek, vodokhranilishch i pribrezhnoi zony morei» = Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference «Dynamics and thermodynamics of rivers, reservoirs and coastal zones of seas». Moscow: RUDN, 2014; (1): (5—16).

23. Federal Agency for Water Resources FGU “Vostsibregionvodkhoz” Analytical report on the results of observations of the state of water bodies in the area of FGU “Vostsibregionvodkhoz” for 2011. Irkutsk, 2012: 128 p. (In Russ.).
24. Fedorov M. P., Fedorova L. L., Omelyanenko A. V. Investigation of the Lena river ice cover by GPR from helicopter. 14th International Conference on Ground Penetrating Radar, 2012. doi: 10.1109/ICGPR.2012.6254958 Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6254958/> (accessed on: 20.05.2023).

Информация об авторах

Максим Петрович Фёдоров, Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, Якутск, научный сотрудник, mpfedoroff@gmail.com.

Лариса Лукинична Федорова, канд. техн. наук, доцент, Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, Якутск, ведущий научный сотрудник, Lar-fed-90@rambler.ru.

Information about authors

Maksim Petrovich Fedorov, Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, researcher.

Larisa Lukinichna Fedorova, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor. Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, leading researcher.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 10.08.2023

Принята к печати после доработки 15.02.2024

The article was received on 10.08.2023

The article was accepted after revision on 15.02.2024