

УДК 551.326.83:621.396.96:[001+571.56]

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРОЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА НА ЗАТОРООПАСНЫХ УЧАСТКАХ Р. ЛЕНА МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

<sup>1</sup>Фёдоров М.П., <sup>2</sup>Федорова Л.Л.

<sup>1</sup>*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения  
Российской академии наук, Якутск, e-mail: mpfedoroff@gmail.com;*

<sup>2</sup>*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения  
Российской академии наук, Якутск, e-mail: lar-fed-90@rambler.ru*

На реке Лена ежегодно наблюдаются опасные ледовые заторы, которые возникают на участке Кангаласский мыс – устье реки Алдан. Образование заторов на этом участке вызывает затопление населенных пунктов Намского района и угрожает г. Якутску. Для прогнозирования условий прохождения весеннего половодья необходима информация о строении и толщине ледяного покрова в предвесенний период. Информацию о характеристиках ледяного покрова на акваториях позволяет получать метод георадиолокации с борта летательного аппарата. В статье представлены установленные георадиолокационные признаки различного строения ледяного покрова, которые позволяют достоверно распознавать участки монолитного и торосового льда. Монолитный лед на радарограмме отображается симметричными, прослеживаемыми осями синфазности отраженных волн. Торосовый лёд характеризуется асимметричными осями синфазности различной пилообразной и параболической формы отраженных волн. Результаты апробации установленных признаков позволили получить пространственную информацию о толщине и строении ледяного покрова реки Лена в районе села Партизан в апреле 2022 г. По интерпретированным данным георадиолокации с помощью метода интерполяций «Кригинг» в программе «Surfer» построена карта пространственного распределения толщины льда на исследуемом участке реки. Толщина монолитного льда варьирует в диапазоне 50-150 см. Толщина торосового льда находится в широких пределах 100-250 см. При этом торосовый лед распространен на 21% больше по сравнению с монолитным льдом. В результате исследований установлены георадиолокационные признаки и показано, что по особенностям динамических характеристик волновых полей радарограмм можно определить различное строение ледяного покрова рек.

**Ключевые слова:** ледяной покров, толщина льда, строение льда, река Лена, георадиолокация, воздушное судно

## STUDY OF THE STRUCTURE OF THE ICE COVER IN THE ICE-HAZARDOUS AREAS OF THE LENA RIVER BY GPR METHOD

<sup>1</sup>Fedorov M.P., <sup>2</sup>Fedorova L.L.

<sup>1</sup>*Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk,  
e-mail: mpfedoroff@gmail.com;*

<sup>2</sup>*Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk,  
e-mail: lar-fed-90@rambler.ru*

Dangerous ice jams are observed annually on the Lena River, which occur on the Kangalassky Cape section – the mouth of the Aldan River. The formation of congestion in this area causes flooding of settlements in the Namsky district and threatens the city of Yakutsk. To predict the conditions of the spring flood, information on the structure and thickness of the ice cover during the pre-spring period is required. Information about the characteristics of the ice cover in the waters can be obtained by the GPR method from the aircraft. The article presents the established GPR signs of the different structure of the ice cover, which allow us to reliably recognize areas of monolithic and hummock ice. Monolithic ice on the radargram is displayed as symmetrical, traceable axes of in-phase of reflected waves. Hummock ice is characterized by asymmetric axes of in-phase of various sawtooth and parabolic forms of reflected waves. The results of testing the established features made it possible to obtain spatial information on the thickness and structure of the ice cover of the Lena River near the village of Partizan in April 2022. According to the interpreted of GPR data using the “Kriging” interpolation method in the “Surfer” program, a map of the spatial distribution of ice thickness in the studied section of the river was built. The thickness of the monolithic ice varies in the range of 50-150 cm. The thickness of the hummock ice is in the wide range of 100-250 cm. At the same time, hummock ice is 21% more common than solid ice. As a result of the research, GPR signs were established and it was shown that by the features of the dynamic characteristics of the wave fields of radargrams, it is possible to determine the different structure of the ice cover of rivers.

**Keywords:** ice cover, ice thickness, ice structure, Lena River, ground penetrating radar, aircraft

Ледовые заторы в процессе вскрытия рек представляют собой опасное природное явление, характерное для текущих с юга на север рек России. Заторы льда приводят к значительному подъему уровня воды,

приводящему к наводнениям, тем самым подвергая высокому риску опасности населенные пункты, расположенные вблизи водных объектов. Например, крупнейшие наводнения на территории Республики Саха

(Якутия) произошли в 1998, 2001, 2007 гг. и нанесли экономический ущерб народному хозяйству. Для прогнозирования условий прохождения весеннего половодья необходима информация о строении и толщине ледяного покрова рек в предвесенний период. Систематические наблюдения за ледовыми характеристиками на реках выполняют на сети стационарных гидрологических постов Росгидромета. При этом существует ряд трудностей, такие как сложность проведения полевых наблюдений, ограниченность пунктов наблюдений и пространственного охвата исследований.

Информацию о состоянии ледяного покрова на обширных акваториях позволяет получать метод георадиолокации. Многие авторы применяли этот метод при решении таких задач, как мониторинг толщины ледовых переправ в северных регионах Канады и Аляски [1; 2], определение толщины льда на водоемах Республики Коми при инженерно-изыскательских работах [3], оценка пространственного изменения толщины речного льда в Финляндии [4]. Особое место занимают работы [2; 5], в которых представлены результаты исследований по разработке георадиолокационной методики оперативного определения толщины ледяного покрова рек. В материалах [2; 3; 5] выявлены особенности ледяного покрова, контактирующего с водой и мёрзлым грунтом. Также отмечено, что вода на поверхности льда затрудняет оценку толщины льда. Материалы георадиолокационных исследований показывают, что слабо изучен вопрос определения строения ледяного покрова рек. Актуальной задачей в этой связи представляются исследования по определению признаков различных типов строения ледяного покрова рек на затороопасных участках по данным георадиолокации.

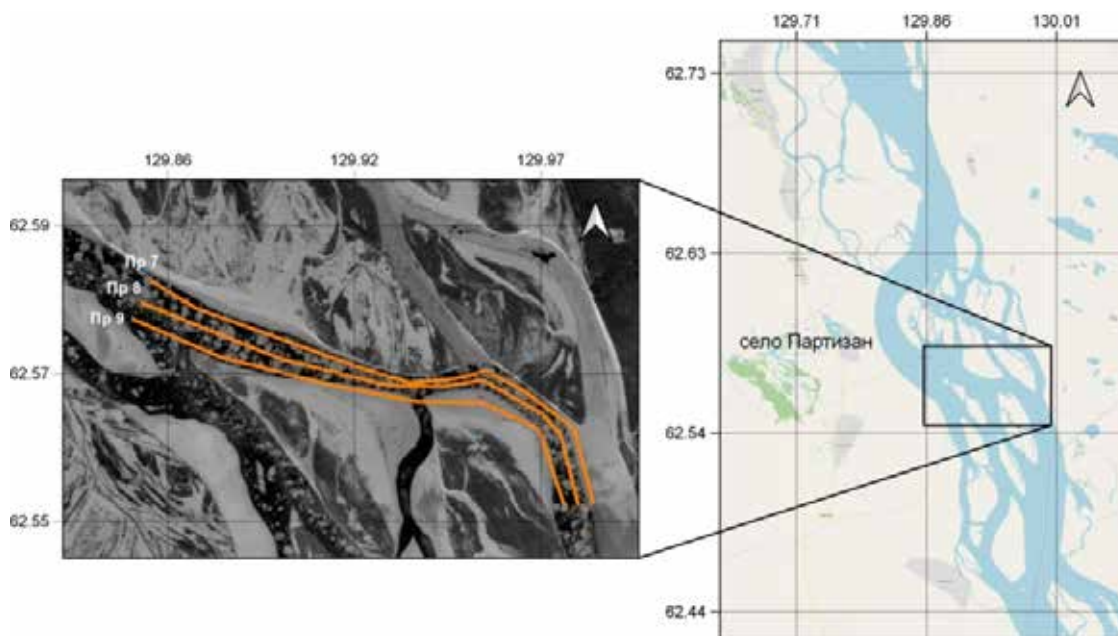
#### **Материалы и методы исследования**

Целью исследования является определение георадиолокационных признаков различного строения ледяного покрова рек. В рамках исследования решены следующие задачи: ретроспективный анализ данных георадиолокационных исследований ледяного покрова рек; проведение натурных экспериментов по георадиолокационному исследованию различного строения ледяного покрова рек; проведение полевых георадиолокационных исследований ледяного покрова на затороопасном участке реки Лена.

Своеобразие морфологических и суровых погодных условий на реке Лена определяют сроки и продолжительность периода замерзания реки, при которых формируется неоднородность ледяного покрова рек [6; 7]. В настоящее время на реке Лена установлены основные затороопасные участки, которые образуются почти на всем ее протяжении. Преимущественную роль в процессе заторообразования играют погодные условия в период вскрытия и сохранившийся толстый ледяной покров, расположенный ниже по течению участка реки [8-10]. Наиболее затороопасные участки на р. Лена расположены начиная от Кангаласского мыса до устья реки Алдан. Образование заторов на этом участке вызывает затопление населенных пунктов Намского района. При мощном образовании затора на этих участках возможно даже затопление пригородов г. Якутска. Частота встречаемости заторов от общего числа лет наблюдений составляет 84% [11; 12].

Анализ данных проведенных ранее аэроледомерных исследований на реке Лена показывает, что по параметрам георадиолокационных сигналов определяется толщина льда, а по особенностям волновой картины можно оценить различное строение льда. Однако определение форм строения ледяного покрова на сложном по морфологическим характеристикам типе русла реки представляет собой трудоемкую задачу. Для изучения особенностей волновых картин радарограмм ледяного покрова реки Лена в районе г. Якутска были проведены бесконтактные измерения георадаром ОКО-2 с антенным блоком АБ400 в режиме профилирования на тестовом участке в марте-апреле 2022 г. Для заверки данных георадиолокации на участке эксперимента пробурены лунки во льду и произведены замеры толщины льда с помощью ледемерной рейки. Дополнительно, для фотофиксации строения льда, на каждом участке измерений в ледяном покрове пройдены шурфы с линейными размерами 100\*50\*50 см, из которых изъяты образцы льда с линейными размерами 30\*30\*30 см.

Для проведения георадиолокационных исследований на затороопасном участке реки Лена спланирован маршрут измерений в геоинформационной системе QGIS по данным спутниковых снимков Sentinel-2 (Scihub.copernicus.eu). На них хорошо прослеживается незамерзшее основное русло рек в период замерзания. По весенним спутниковым снимкам затруднительно определить границы русла реки из-за наличия снежного покрова.



*Рис. 1. Пример спутникового изображения русла р. Лена в районе села Партизан с планируемым маршрутом георадиолокационных измерений*

На рисунке 1 представлен маршрут георадиолокационных измерений на р. Лена около села Партизан. В апреле 2022 г. проведены полевые исследования ледяного покрова георадаром «ОКО-2» с антенным блоком АБ400. Привязка на местности выполнялось с помощью GPS-приемника. Антенный блок был закреплен к днищу самолета EuroStar SLW при помощи стальных стяжек за стойки шасси. По требованиям безопасности средняя скорость полета самолета составила 100 км/ч, высота полета – 20-30 м над уровнем ледяного покрова реки. Следование самолета по запланированному маршруту осуществлялось с помощью GPS-навигатора. Оператор с мобильным полевым персональным компьютером с установленной программой GeoScan32, находился внутри самолета, осуществлял управление работой георадара, ввод параметров измерений, контроль процесса измерений, запись полевых материалов.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

Результаты георадиолокационных исследований на тестовом участке в районе г. Якутска позволили установить признаки строения льда на волновой картине. На рисунке 2 приведены следующие формы строения льда: береговой лед, монолитный лёд и торосовый лёд. Монолитный лед

состоит из однородных кристаллов, сформировавшихся в спокойных условиях. В основном такой лед прозрачный с наличием воздушных пузырьков. Монолитный лед, контактирующий с мёрзлым грунтом, классифицируется как береговой лёд. На радарограмме берегового льда (рис. 2а) наблюдаются устойчивые прослеживаемые оси синфазности отраженных волн от верхней границы, а нижняя граница льда, контактирующая с мёрзлым грунтом, выражена слабоконтрастными, субгоризонтальными осями синфазности отраженных волн. Контакт нижней границы льда с мёрзлым грунтом характеризуется низкой амплитудой отраженных волн. Монолитный лёд в контакте с водой на радарограмме (рис. 2б) отображается симметричными, протяженными осями синфазности отраженных волн от границ льда. Нижняя граница льда характеризуется повышенной амплитудой, сменной фазы отраженных волн.

Торосовый лёд состоит из нагромождения обломков ледяных полей в результате сжатия ледяного покрова. Он в основном мутный и имеет нарушенное строение. На радарограмме торосового льда (рис. 2в) прослеживаются различные формы осей синфазностей отраженных и дифрагированных волн. Нижняя граница льда в контакте с водой характеризуется повышенной амплитудой отраженных и дифрагированных волн.

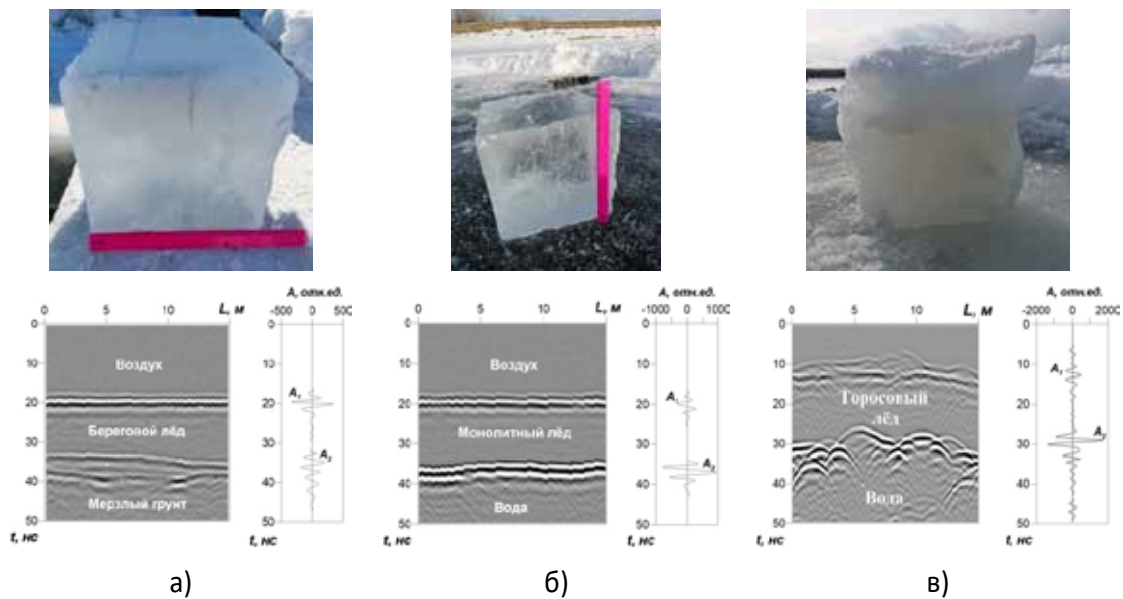


Рис. 2. Основные типы строения ледяного покрова р. Лена и их радарограммы, полученные в районе г. Якутска: а) береговой лёд, б) монолитный лёд, в) торосовый лёд

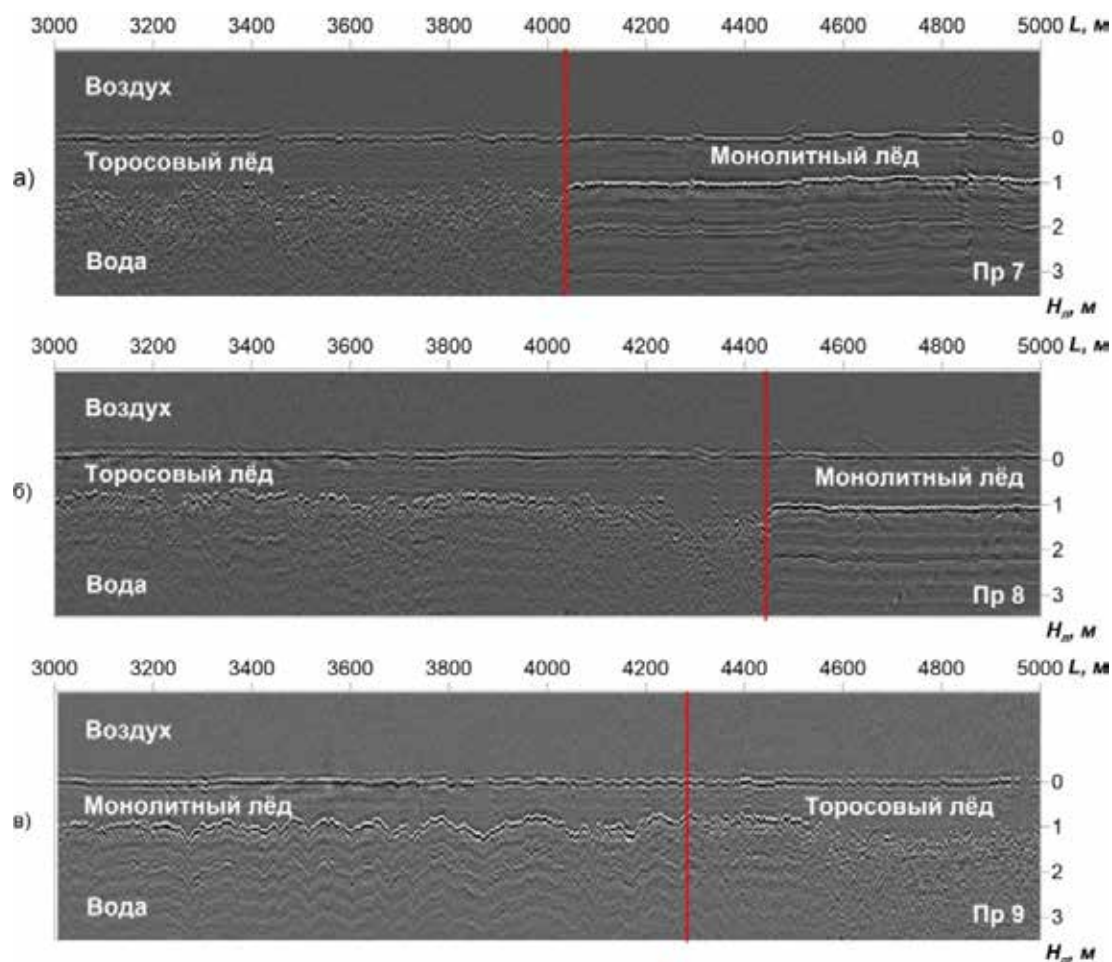


Рис. 3. Результаты интерпретации фрагментов радарограмм ледяного покрова р. Лена в районе села Партизан: а) Пр 7, б) Пр 8, в) Пр 9

На участке реки около села Партизан были пройдены три параллельных георадиолокационных профиля длиной около 8 км каждый, расстояние между профилями около 200 м. Обработка данных георадиолокации выполнена в программе GeoScan32 с применением следующих процедур: редактирование трасс, устранение помех и прямого сигнала, привязка георадиолокационного профиля к местности по GPS-данным, восстановление разрешения полезных сигналов. Интерпретация волновой картины радарограмм осуществлялась с помощью установленных георадиолокационных признаков строения льда. Выделенные проинтерпретированные границы льда преобразованы из временного разреза в глубинный разрез с учетом диэлектрической проницаемости льда, что позволило оценить толщину льда. На рисунке 3 представлены наиболее интересные фрагменты проинтерпретированных радарограмм протяженностью 2 км. На радарограммах прослеживаются две контрастные оси синфазности отраженных волн. Первая ось синфазности отраженных волн соответствует верхней границе льда. Вторая высокоамплитудная ось синфазности отраженных волн относится к нижней границе льда. Наличие высокой амплитуды показывает, что ледяной покров контактирует с водой. По симметричным осям синфазности отраженных волн распознан монолит-

ный лед. Наблюдаются кратные отражения от нижней границы монолитного льда. Нарушенные оси синфазности отраженных и дифрагированных волн на радарограмме характеризуют строение торосового льда. При этом отсутствуют кратные отражения от нижней границы льда.

Результаты обработки и интерпретации данных георадиолокации представлены в виде карты (рис. 4), которая построена с помощью метода интерполяции «Кригинг» в программе Surfer. На карте представлено изменение толщины льда в пределах от 50 до 250 см. Среднее значение толщины льда составило 119 см, стандартное отклонение – 33 см. В основном преобладает лед толщиной 100-150 см. Результаты интерпретаций строения ледяного покрова позволили установить распределение монолитного и торосового льда вдоль маршрутов георадиолокационных исследований. Стоит отметить, что торосовый лед распространен на 21% больше в сопоставлении с монолитным льдом. Такие льды под воздействием солнечной радиации тают по-разному. Интенсивность внутреннего таяния наибольшая у монолитного льда, в то время как у торосового льда таяние происходит с поверхности. Можно сказать, что участки монолитного льда более подготовлены к дальнейшему разрушению, чем участки торосового льда.

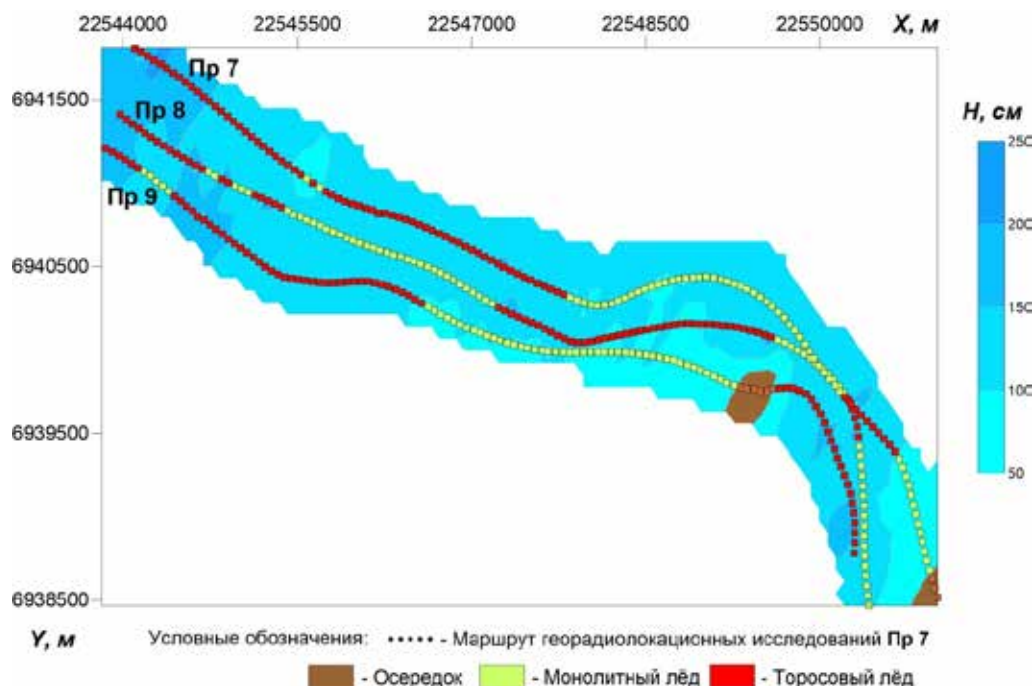


Рис. 4. Карта распределения толщины и строения льда около села Партизан по данным георадиолокации

### Заключение

В ходе проведенных исследований установлены георадиолокационные признаки различного строения льда, позволившие распознать монолитный и торосовый лёд на затороопасном участке реки Лена в районе села Партизан. Монолитный лед на радарограмме отображается симметричными осями синфазности отраженных волн от границ льда и отсутствием резких нарушений на осях синфазности. Торосовый лёд характеризуется асимметричными осями синфазности различной пилообразной и параболической формы отраженных волн от границ льда. По изменению амплитудных значений отраженных волн от нижней границы льда можно определить наличие контакта льда с водой или мерзлым грунтом.

Результаты апробации установленных признаков позволили получить пространственную информацию о толщине и строении ледяного покрова реки Лена в районе села Партизан. Такая информация может быть полезна для определения затороопасных участков при планировании мероприятий по ослаблению целостности ледяного покрова рек.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00751, <https://rscf.ru/project/22-27-00751/>.*

*Полевые исследования проводились на оборудовании ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант № 13.ЦКП.21.0016).*

### Список литературы

1. Proskin S.A., Parry N.S., Finlay P. Applying GPR in assessing the ice bridges, ice roads and ice platforms. 16th Workshop on River Ice, CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment (CRIPE). 2011. P. 341-354.
2. Annan A.P., Diamanti N., Redman J.D., Jackson S.R. Ground-penetrating radar for assessing winter roads. *Geophysics*. 2016. Vol. 81. Iss. 1. P. 1-9.
3. Ермаков А.П., Старовойтов А.В. Применение метода георадиолокации при инженерно-геологических исследованиях для оценки геокриологической обстановки // *Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология*. 2010. № 6. С. 91-96.
4. Maria Kamari, Petteri Alho, Alfred Colpaert, Eliisa Lottari Spatial variation of river-ice thickness in a meandering river. *Cold Regions Science and Technology*. 2017. Vol. 137. P. 17-29.
5. Robert B. Lower Churchill River Ice Thickness Survey from Helicopter-mounted Ground Penetrating Radar. Ottawa, 2018. 51 p.
6. Глушков А.В. Реки востока России: путеводитель-справочник. Якутск, 2016. 502 с.
7. Аржакова С.К. Зимний сток рек криолитозоны России: монография. СПб.: РГГМУ, 2001. 209 с.
8. Козлов Д.В., Бузин В.А., Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Бабурин В.Л., Банщикова Л.С., Горошкова Н.И., Завадский А.С., Крыленко И.Н., Савельев К.Л., Козлов К.Д., Бузина Л.Ф. Опасные ледовые явления на реках и водохранилищах России: монография. М.: РГАУМСХА им. К.А. Тимирязева, 2015. 348 с.
9. Struchkova G.P., Kapitonova T.A., Tarskaya L.E., Efimov V.M. Flood prediction on the Lena river. *Journal of International Scientific Publications: Ecology & Safety*. 2011. Vol. 5. Part 3. P. 16-24.
10. Бузин В.А. Зажоры и заторы льда на реках России. СПб.: ГГИ, 2016. 242 с.
11. 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.
12. 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 и водохранилищ*. М.: РУДН, 2014. Т. 1. С. 5-16.