

Оценка пространственной неоднородности ледяного покрова реки Лены методом георадиолокации

Максим Петрович ФЕДОРОВ^{1,*}
Лариса Лукинична ФЕДОРОВА^{1,**}
Александр Васильевич ОМЕЛЯНЕНКО^{2,***}

¹Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, Россия, Якутск

²Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Россия, Якутск

Актуальность. В период ледостава в комплексе гидрометеорологических условий и морфологических характеристик русла на разных участках реки наблюдается пространственная неоднородность ледяного покрова, состоящего из различных типов льда. В настоящее время данный вопрос по определению характеристик ледяного покрова рек методом георадиолокации недостаточно изучен. Авторами проводятся многолетние исследования ледяного покрова методом георадиолокации с борта воздушного судна (вертолет Ми-8, самолет Ан-2, самолет EuroStar SLW).

Цель работы. Исследование пространственной неоднородности толщины льда в зависимости от строения ледяного покрова на примере затороопасного участка р. Лены в районе острова Тинная.

Методы исследований. Для измерения ледяного покрова применен георадар «ОКО-2» (Группа компаний «Логис-Геотех») с модернизированным антенным блоком АБ-400 (центральная частота 400 МГц) с борта воздушного судна Ми-8. По данным георадиолокации выполнена количественная оценка пространственной неоднородности толщины в зависимости от строения ледяного покрова с применением статистического анализа.

Результаты исследований. Анализ полученных результатов георадиолокации показал, что в зоне заберегов прослеживается торосовый лед повышенной толщины с коэффициентом вариации 18–20 %. В зоне фарватера зафиксированы пониженные значения коэффициента вариации толщины монолитного льда 7–10 %. Установлена зональная закономерность пространственного распределения неоднородностей толщины льда от его строения на исследуемой территории, по которой можно проводить распознавание границ распространения различных типов льда в русле реки.

Выводы. Полученные результаты о пространственных характеристиках ледяного покрова могут быть полезны при анализе ледовой обстановки на реках в период весеннего половодья.

Ключевые слова: лед, толщина, типы строения ледяного покрова, река Лена, остров Тинная, георадиолокация.

Введение

В период ледостава с учетом комплекса гидрометеорологических условий и морфологических характеристик русла на разных участках реки наблюдается неоднородность ледяного покрова, состоящего из различных типов льда. На реках выделяют два основных типа строения льда – кристаллический (монолитный) и шуговой (торосовый) [1, 2]. В работе [3] представлены материалы о пространственной вариации толщины с различными характеристиками снежно-ледяного покрова, которые были получены на эталонных участках площадью 100 м². Результаты анализа данных показали, что запросы практики не могут быть удовлетворены дискретными измерениями на гидрологических постах.

Особое место занимают работы [3, 4], в которых выявлены особенности распределения толщины ледяного покрова, полученные по данным радиолокационных аэроледомерных съемок рек, озер, водохранилищ. Материалы георадиолокационных исследований [5–9] показывают, что не рассмотрены вопросы, связанные с определением характеристик ледяного покрова. Актуальной задачей в связи с этим представляются георадиолокационные исследования по определению зависимости пространственной неоднородности толщины льда от типов строения ледяного покрова.

Характеристика участка

Лена – крупнейшая река, протекающая по территории Северо-Восточной Сибири Российской Федерации. Длина вместе с дельтой – 4400 км. Истоком Лены считается небольшое озеро в 7 км к западу от озера Байкал. Река течет с юга на север и впадает в море Лаптевых. По характеру течения условно делится на три части. Верхнее течение – до впадения реки Витим, среднее течение – до впадения реки Алдан и нижнее течение – до дельты. В устье примерно в 150 км от моря начинается обширная дельта Лены [10].

Морфология русла играет важную роль в формировании ледяного покрова. Между реками Витим и Алдан река Лена течет по Приленскому плато в глубокой долине с высокими (до 300 м) крутыми, нередко обрывистыми бортами, изрезанными множеством распадков. Лишь ниже города Покровска река Лена выходит на равнину. Как следствие, происходит резкое расширение долины, а русло разветвляется на протоки. Только пойма имеет ширину 5–7 км, а местами и 15 км, а вся долина имеет ширину 20 км [10]. На этом участке реки толщина льда распределяется по-иному. При падении уровня воды в русле наблюдается лед на берегу малой толщины, а посередине реки – толстый [11].

Для исследования выбран интересный участок около острова Тинная (рис. 1). Русло реки Лены в данном месте однорукавное, с четко выраженной параболической формой. По данным источника [2], от острова Багамайский до острова Тинная ежегодно в период весеннего половодья происходит задержка вскрытия реки. На этом отрезке образуются скопления льдин протяженностью до 100 км, которые уменьшают открытое сечение русла реки до 80 %. Из-за наличия островов в русле реки происходит увеличение толщины льда до 200 см, что существенно ограничивает льдопропускную способность русла в период весеннего половодья.

Методика исследования

Исследования пространственной неоднородности толщины ледяного покрова р. Лены в период ледостава проведены на затороопасном участке в районе острова Тинная. По ранее проведенным исследованиям ледяного покрова была

*mpfedoroff@gmail.com

**Lar-fed-90@rambler.ru

***Omealex47@yandex.ru

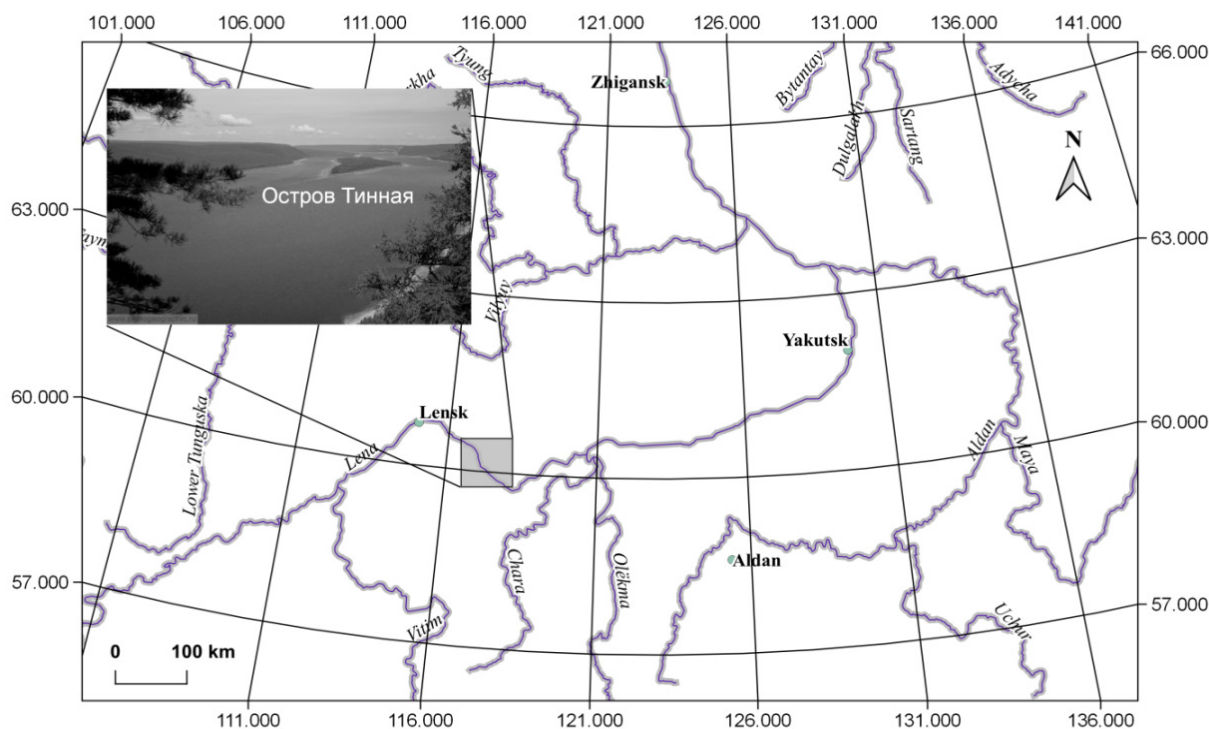


Рисунок 1. Участок исследования ледяного покрова р. Лены в районе острова Тинная.
Figure 1. Site of the study of the Lena ice cover in the area of the Tinnaya island

отработана методика георадиолокационных измерений с борта воздушного судна (вертолет Ми-8, самолет Ан-2, самолет EuroStar SLW). В результате были модернизированы приемно-передающее устройство, расположенное в антенном блоке АБ-400 (центральная частота 400 МГц) георадара «ОКО-2» (Группа компаний «Логис-Геотех») и система высокоскоростной записи информации, позволяющая регистрировать большой объем данных при высоких скоростях полета до 150 км/ч [12]. Антенный блок был закреплен с помощью специальной подвески за люк вертолета Ми-8. Высота полета воздушного судна составила примерно 20 м, а скорость – 50 км/ч. В процессе измерений были заданы следующие параметры сканирования. Количество точек по глубине – 512; развертка по глубине составила 200 нс, учитывающая временной интервал распространения электромагнитной волны в воздухе (высота полета) и в слое ледяного покрова (толщина льда); накопление георадиолокационных трасс в каждой точке с последующим усреднением – 4, шаг между трассами составил 1 м и диэлектрическая проницаемость пресноводного льда – 3.2 [3, 12].

В данном случае позиционирование данных георадиолокации к местности с использованием приемника GPS не применялось, так как не было необходимости, поскольку на участке исследований находились ориентиры (остров и судоводные знаки), которые были использованы для привязки данных георадиолокации к местности. План георадиолокационных профилей представлен на рис. 2. Три профиля протяженностью 7 км сняты вдоль реки параллельно друг другу, т. е. один пройден по фарватеру, остальные два профиля – по берегам. Два коротких профиля протяженностью 800 м получены поперек реки. Стрелки профилей на плане указывают направление полета вертолета. В результате измерений получено 5 георадиолокационных файлов.

На рис. 4 показана проинтерпретированная радарограмма поперечного профиля р4. Направление радарограммы реверсировано относительно профиля р2. На отрезках 0–275 м и 550–800 м, пролегающих в районе берегов, также выявлен торосовый лед. При этом на отрезке 275–550 м зафиксирован монолитный лед.

На фрагменте радарограммы профиля р3 (рис. 5) прослежен торосовый лед. Поскольку профиль пройден по берегу, то на дневной поверхности льда зафиксированы торосы. Нижняя граница торосового льда также имеет нарушенный характер.

Фрагмент радарограммы р0 демонстрирует состояние ледяного покрова в фарватере. Обращает на себя внимание тот факт, что в фарватере преобладает монолитный лед, но местами прослеживается торосовый лед (рис. 6). Радарограмма разделена сегментами из-за различия типов строений ледяного покрова. В сегментах I и III прослеживается торосовый лед, а во II сегменте – монолитный лед. Стоит отметить, что дневная поверхность ледяного покрова относительно ровная.

Результаты

По результатам обработки и интерпретации радарограмм построены графики толщины льда программой Golden Software Grapher. На рис. 7 представлен разрез ледяного покрова по данным профилей р2 и р4. Установлено, что в берегах прослеживается повышенная толщина торосового льда. Толщина льда по фарватеру меньше в сравнении с берегами. График на рис. 8, а, построенный по данным профиля р0, показывает приблизительно однородное распределение толщины льда в фарватере. Графики по данным профилей р1 и р3 демонстрируют неравномерное распределение толщины торосового льда на левом и правом берегу (рис. 8, б).

Примечательно, что основные типы строений ледяного покрова по характерным зонам достаточно дифференцированы на спутниковых снимках, полученных методом дистанционного зондирования Земли [17]. Существующие методы

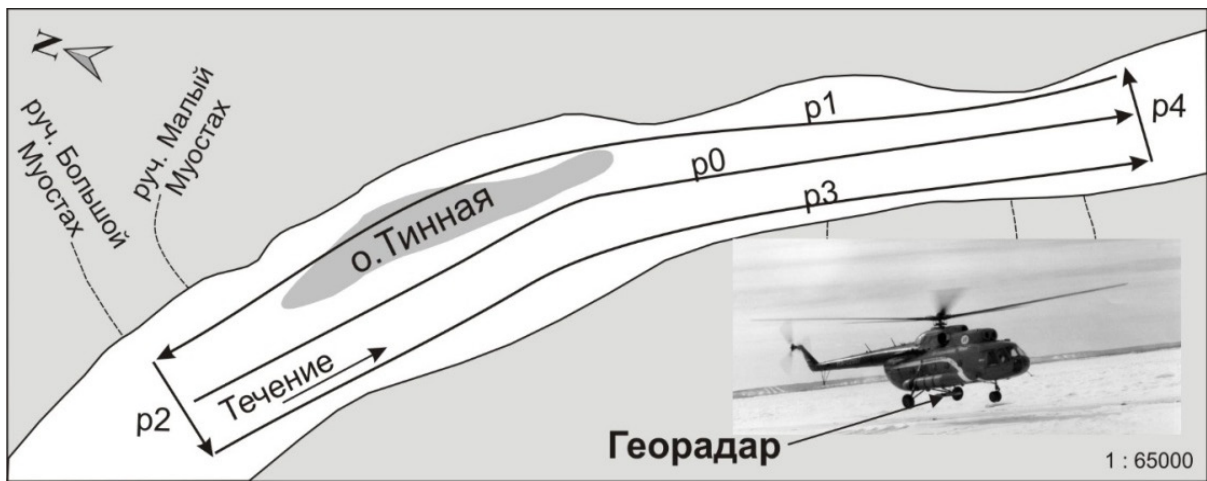


Рисунок 2. План измерений на участке о-ва Тинная.
Figure 2. Measurement plan for the area of Tinnaya Island

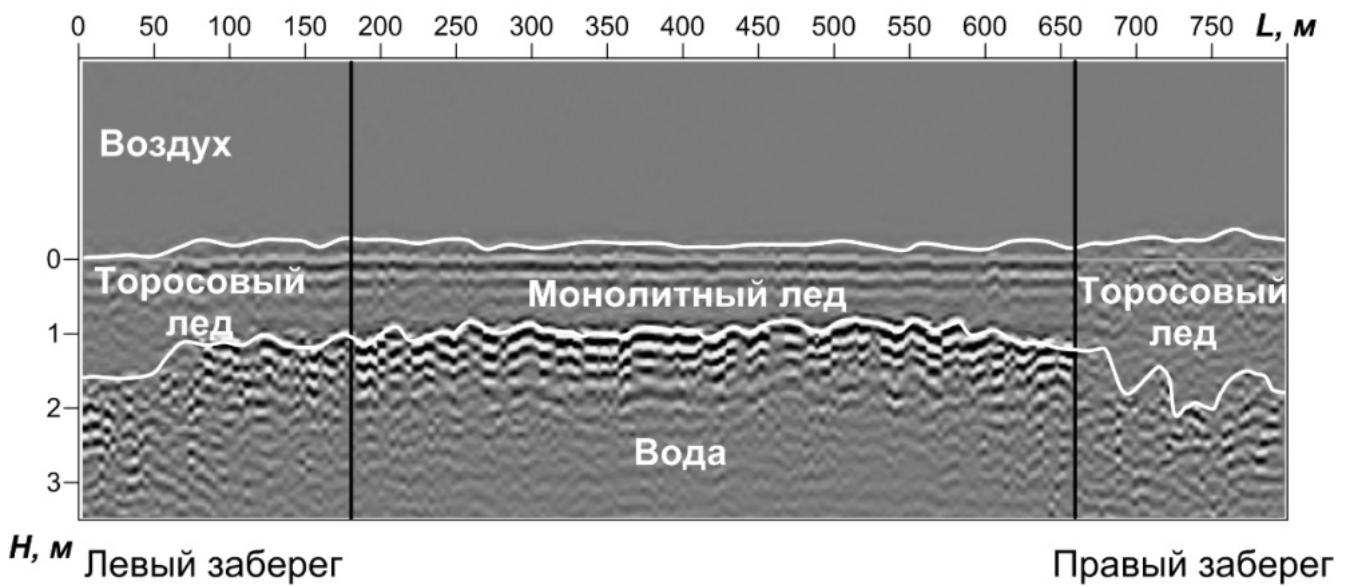


Рисунок 3. Проинтерпретированная радарограмма поперечного профиля p2.
Figure 3. Interpreted radargram of the transversal profile p2

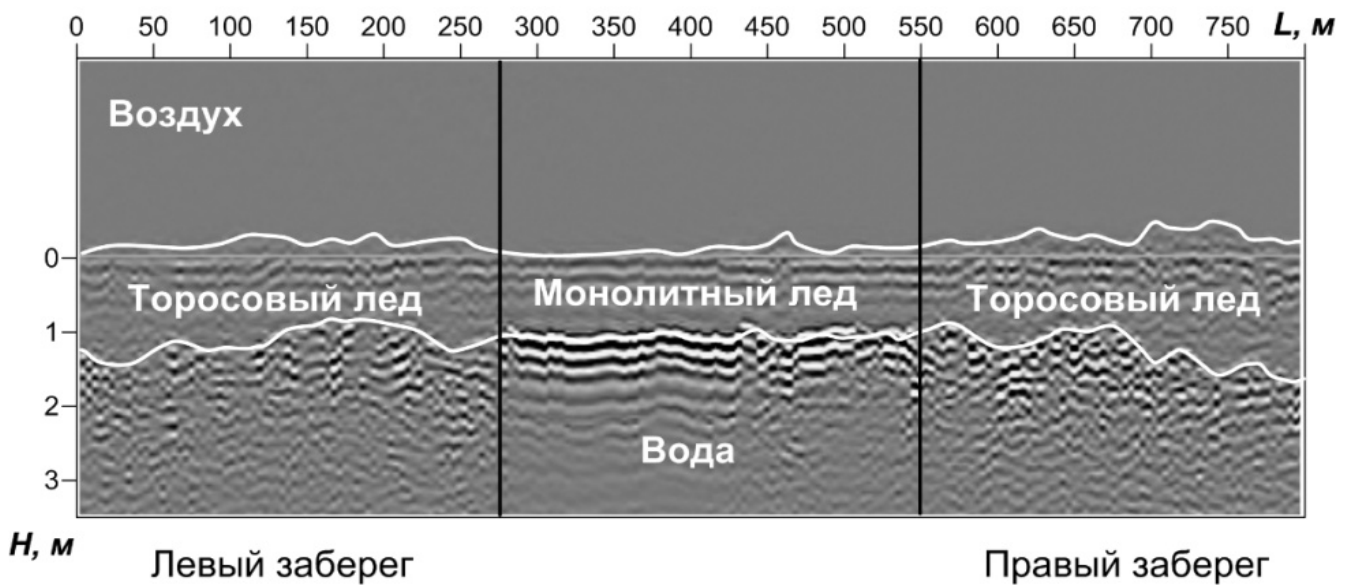


Рисунок 4. Проинтерпретированная радарограмма поперечного профиля p4.
Figure 4. Interpreted radargram of the transversal profile p4.

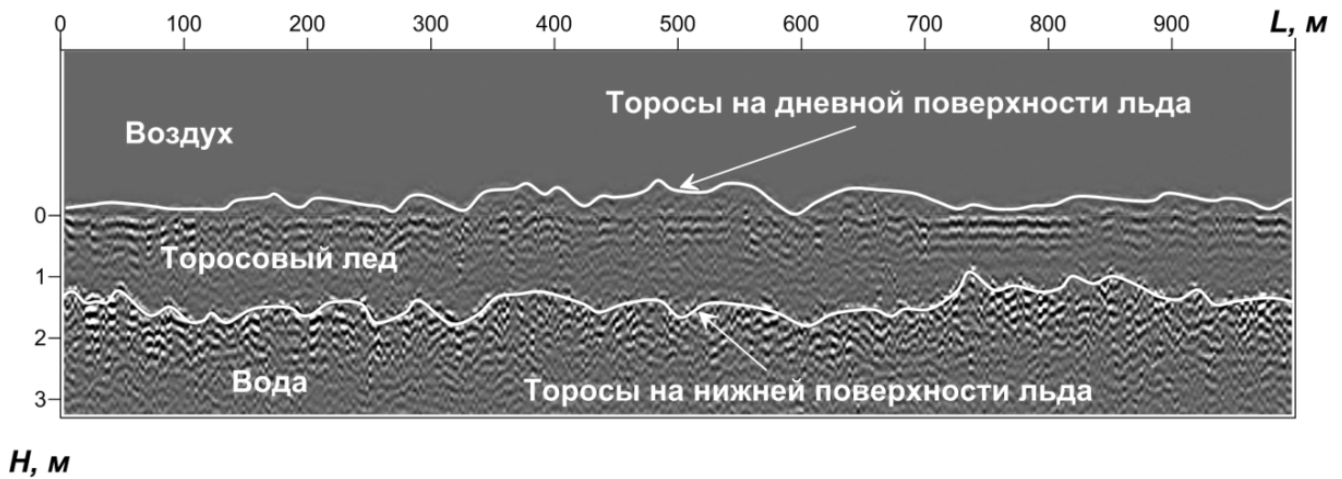


Рисунок 5. Фрагмент радарограммы продольного профиля р3.
Figure 5. Fragment of the radarogram of the longitudinal profile p3.

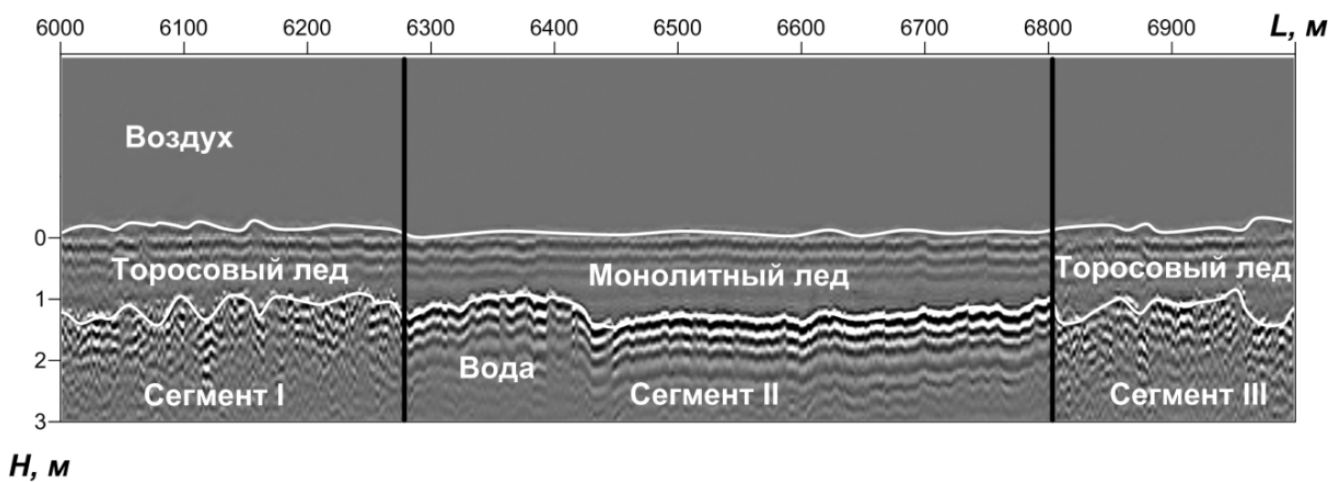


Рисунок 6. Фрагмент радарограммы продольного профиля р0.
Figure 6. Fragment of the radarogram of the longitudinal profile p0.

дешифрирования осуществляют переход от яркости изображения к характеристикам строения льда [18, 19]. При распознавании используется ряд признаков. Прямые признаки – тон, тональная структура и текстура изображения объекта, размеры и форма. Косвенные признаки – взаимная связь объектов с окружающей средой. Спутниковые снимки исследуемого участка в районе острова Тинная имеют низкое разрешение, что затрудняет произвести дешифровку.

Полученные результаты георадиолокационных измерений показали, что прослеживается изменчивость толщины льда в зависимости от расположения в русле реки и по типу строений ледяного покрова. Поэтому для количественной оценки пространственной неоднородности толщины льда применен статистический анализ. При определении вариации толщины льда использована система абсолютных и относительных статистических показателей:

- среднее значение толщины льда $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x}{n}$;
- среднее квадратическое отклонение $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$;
- коэффициент вариации $v = \frac{\sigma}{\bar{x}} 100 \%$.

В процессе выполнения расчетов выполнена выборка данных по профилям р2, р4 в соответствии с характерными зонами – фарватер, левый и правый заберег с целью получения достоверных данных по типу строений ледяного покрова. Сгруппированные данные по зонам представлены в табл. 1.

Результаты статистических показателей по данным р2 и р4 представлены в табл. 2. Данные показывают, что в зоне фарватера не выявлены заметные различия монолитного льда. Коэффициент вариации в зоне фарватера находится в пределах от 7 до 10 %. В заберегах прослеживается изменчивость повышенной толщины торосового льда с коэффициентом вариации 18–20 %.

Данные продольных профилей р0, р1 и р3 (табл. 3) также подтверждают характерные закономерности распределения толщины льда в заберегах и в фарватере. Сравнение данных левого и правого заберега показало, что вариация толщины льда составила 18–20 %. Также необходимо выделить профиль р0, пролегающий по фарватеру, в котором коэффициент вариации составил 14 % при среднем значении толщины льда 98 см. Завышенное значение коэффициента

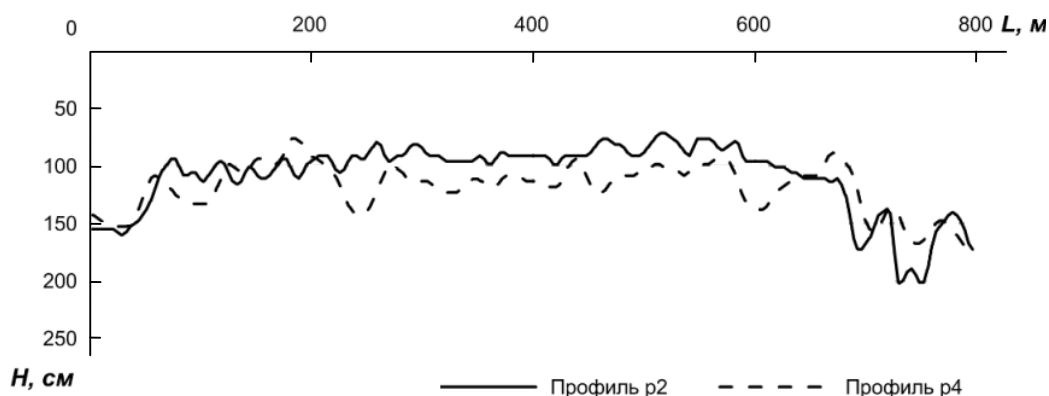


Рисунок 7. Графики толщины льда по данным поперечных профилей p2 и p4.
Figure 7. Graphs of ice thickness according to transversal profiles p2 and p4.

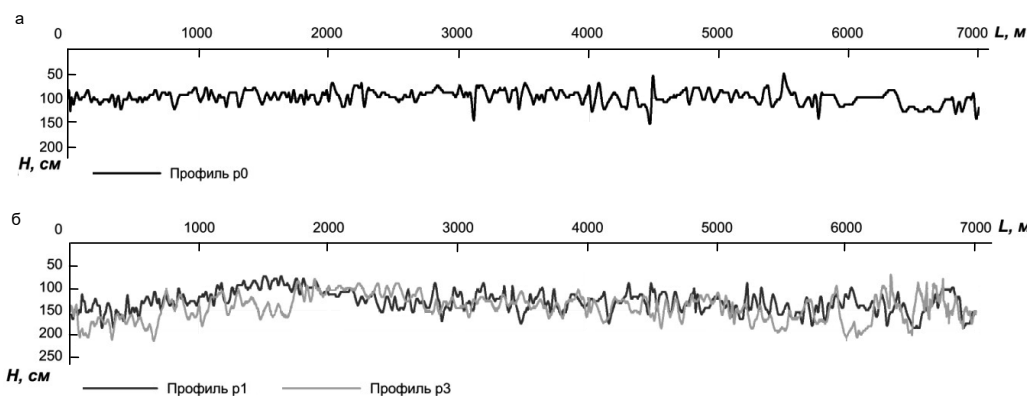


Рисунок 8. Графики толщины льда по данным продольных профилей p0, p1 и p3.
Figure 8. Graphs of ice thickness according to the longitudinal profiles p0, p1 and p3

вариации обусловлено различием типов строений ледяного покрова в фарватере. Подтверждение этому находим во фрагменте радарограммы p0 (рис. 6), в котором прослеживается чередование монолитного и торосового льда.

Заключение

Результаты георадиолокационных исследований пространственной неоднородности толщины ледяного покрова р. Лены получены на примере острова Тинная. На основе данных по толщине льда выполнен статистический анализ, который показал, что зона заберегов характеризуется повышенной толщиной торосового льда с коэффициентом вариации

Таблица 1. Группировка георадиолокационных данных по характерным зонам.
Table 1. Grouping GPR data by characteristic zones

Поперечные георадиолокационные профили	Зона левого заберега	Зона фарватера	Зона правого заберега
p2	0–180 м	180–660 м	620–800 м
p4	0–275 м	275–550 м	550–800 м

Таблица 2. Статистические показатели данных поперечных профилей p2 и p4.
Table 2. Statistical indicators of transversal profiles p2 and p4.

Статистические показатели	p2/p4		
	Зона левого заберега	Зона фарватера	Зона правого заберега
\bar{x}	120/117	91/111	157/129
σ	23/22	9/7	28/26
v	19/19	10/7	18/20

Таблица 3. Статистические показатели данных продольных профилей p0, p1 и p3.
Table 3. Statistical indicators of longitudinal profiles p0, p1 and p3.

Статистические показатели	p1 левый заберег	p0 фарватер	p3 правый заберег
\bar{x}	129	98	141
σ	23	14	28
v	18	14	20

18–20 %. В зоне фарватера отмечены пониженные значения коэффициента вариации толщины монолитного льда 7–10 %. При чередовании монолитного и торосового льда в зоне фарватера коэффициент вариации составил 14 %.

Установлена зональная закономерность распределения толщины ледяного покрова от его строения на исследуемой территории, по которой можно проводить распознавание границ распространения различных типов льда в русле реки. Полученные материалы исследований представляют качественно новую гидрологическую и гляциологическую информацию, позволяющую характеризовать ледяной покров по длине реки и могут быть полезны при анализе ледовой обстановки на реках в период весеннего половодья.

Благодарности

Авторы выражают свою благодарность начальнику отдела гидропрогнозов Федерального государственного бюджетного учреждения Якутского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды К. И. Кусатову за практические советы при проведении исследования и продуктивные дискуссии при написании статьи, благодарность начальнику ГКУ РС (Я) «Служба спасения РС (Я)» Н. А. Находкину и заместителю начальника А. Н. Быкову за организацию георадиолокационных исследований с борта воздушного судна (Ми-8).

ЛИТЕРАТУРА

1. Донченко Р. В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеиздат. 1987. 248 с.
2. Войтковский К. Ф. Основы гляциологии. М.: Наука, 1999. 256 с.
3. Финкельштейн М. И., Лазарев Э. И., Чижов А. Н. Радиолокационные аэроледомерные съемки рек и озер, водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 117 с.
4. Чижов А. Н. Формирование ледяного покрова и пространственное распределение его толщины. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 127 с.
5. Moldoveanu-Constantinescu M., Stewart R. 3D ground penetrating radar surveys on a frozen river lagoon // Recorder. Official publication of the Canadian Society of Exploration Geophysicists. 2004. Vol. 29, № 09. <https://csegrecorder.com/articles/view/3d-ground-penetrating-radar-surveys-on-a-frozen-river-lagoon>
6. Best H., McNamara J. P., Liberty L. Association of Ice and River Channel Morphology Determined Using Ground-penetrating Radar in the Kuparuk River, Alaska // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 2005. Vol. 37, № 2. P. 157–162.
7. Healy D., Katopodis C., Tarrant P. Application of Ground Penetrating Radar for River Ice Surveys // 14th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers. Quebec City, June 19–22, 2007. https://www.researchgate.net/publication/228894967_Application_of_ground_penetrating_radar_for_river_ice_surveys
8. Delaney A. J., Arcone S. A., Chacho E. Winter Short-Pulse Radar Studies on the Tanana River, Alaska // Arctic. 1990. Vol. 43, № 3. P. 244–254. <http://dx.doi.org/10.14430/arctic1618>
9. Galley R. J., Trachtenberg M., Langlois A., Barber D. G., Shafai L. Observations of geophysical and dielectric properties and ground penetrating radar signatures for discrimination of snow, sea ice and freshwater ice thickness // Cold Regions Science and Technology. 2009. Vol. 57, issue 1. P. 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.01.003>
10. Глушков А. В. Реки востока России: путеводитель-справочник. 2-е изд. Якутск, 2016. 502 с.
11. Fedorov M. P., Fedorova L. L., Omelyanenko A. V., Kulyandin G. A. Study of Formation of Lena River Ice Cover According of Decade Measurements by GPR // 15th International Conference on ground Penetrating Radar. 2014. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2014.6970434>
12. 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, June 4–8, 2012. Shanghai, China 2012. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2012.6254958>
13. Мачерет Ю. Я. Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
14. Ермаков А. П., Старовойтов А. В., Владов М. Л. Георадиолокационные исследования верхней части разреза при проектировании сейсмических работ в зимнее время // Технологии сейсморазведки. 2012. № 2. С. 89–97.
15. Fedorov M. P., Fedorova L. L., Savvin D. V., Kulizhnikov A. M. The study of the ice crossings on the rivers by the ground-penetrating radar // 16th International Conference of Ground Penetrating Radar. June 13–16, 2016. Hong Kong, China, 2016. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2016.7572625>
16. Michel B., Ramseier R. O. Classification of river and lake ice // Canadian Geotechnical Journal. 1971. Vol. 8. P. 36–45. <https://doi.org/10.1139/t71-004>
17. Аншаков Г. П., Журавель Ю. Н., Ращупкин А. В. Использование мульти- и гиперспектральных данных дистанционного зондирования для автоматизированного мониторинга рек и водоемов в весенний период // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39, № 2. С. 224–233.
18. Йоханнессен О. М., Александров В. Ю., Фролов И. Е. и др. Научные исследования в Арктике. Т. 3. Дистанционное зондирование морских льдов на Северном морском пути: изучение и применение. СПб.: Наука, 2007. 512 с.
19. Thuan Chu, Apurba Das, Karl-Erich Lindenschmidt. Monitoring the Variation in Ice-Cover Characteristics of the Slave River, Canada Using RADARSAT-2 Data – A Case Study // Remote Sensing. 2015. Vol. 7(10). P. 13664–13691. <https://doi.org/10.3390/rs71013664>

Статья поступила в редакцию 03 июля 2019 года

Estimation of spatial heterogeneity of the Lena River ice cover using the ground penetrating radar

Maksim Petrovich FEDOROV^{1,*}
Larisa Lukinichna FEDOROVA^{1,**}
Aleksandr Vasil'evich OMEL'YANENKO^{2***}

¹N. V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of RAS, Yakutsk, Russia

²Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of RAS, Yakutsk, Russia

Relevancy. During the period of ice formation, in a complex of hydrometeorological conditions and morphological characteristics of the river bed, spatial heterogeneity of the ice cover consisting of various types of ice is observed in different parts of the river. Currently, this issue of determining the characteristics of the ice cover of rivers by the method of georadar is not sufficiently studied. The authors carry out long-term studies of the ice cover using the georadar method from the aircraft (Mi-8 helicopter, An-2 aircraft, EuroStar SLW aircraft).

Purpose of the work. The study of the spatial heterogeneity of the ice thickness depending on the structure of the ice cover using the example of a hazardous section of the Lena river in the area of Tinnaya island.

Research methods. To measure the ice cover, OKO-2 ground-penetrating radar (Logis-Geotech Group of Companies) was used with the upgraded AB-400 antenna unit (center frequency is 400 MHz) on board Mi-8 aircraft. The spatial inhomogeneity of the thickness depending on the structure of the ice cover was quantified using statistical analysis.

Research results. The analysis of the obtained results of georadiolocation showed that there is ice ridge of increased thickness with a coefficient of variation of 18-20% in the ice-free area along the bank of the river. In the fairway channel zone, lower values of variation coefficient of 7-10% monolithic ice thickness were recorded. The zonal regularity of the spatial distribution of the heterogeneity of the ice thickness from its structure in the study area has been determined, which can be used to recognize the distribution boundaries of various types of ice in the river bed.

Conclusions. The results obtained on the spatial characteristics of the ice cover can be useful in analyzing the ice situation on the rivers during the spring flood.

Keywords: ice, thickness, types of structure of ice cover, the Lena, Tinnaya island, ground penetrating radar

REFERENCES

1. Donchenko R V. 1987, *Ledovyy rezhim rek SSSR* [Ice regime of the rivers of the USSR], 248 p.
2. Voitkovskiy K. F. 1999, *Osnovy glytziologii* [The basics of glaciology]. Moscow, 256 p.
3. Finkelstein M. I., Lazarev E. I., Chizhov A. N. 1984, *Radiolokatsionnyye aeorodometrnyye s"yemki rek i ozer, vodokhranilishch* [Radar airborne surveys of rivers and lakes, reservoirs], 117 p.
4. Chizhov A. N. 1990, *Formirovaniye ledyanogo pokrova i prostranstvennoye raspredeleniye yego tolshchiny* [Formation of ice cover and the spatial distribution of its thickness], 127 p.
5. Moldoveanu-Constantinescu M., Stewart R. 2004, 3D ground penetrating radar surveys on a frozen river lagoon. *Recorder. Official publication of the Canadian Society of Exploration*, vol. 29, no. 09. <https://csegrecorder.com/articles/view/3d-ground-penetrating-radar-surveys-on-a-frozen-river-lagoon>
6. Best H., McNamara J. P., Liberty L. 2005, Association of Ice and River Channel Morphology Determined Using Ground-penetrating Radar in the Kuparuk River, Alaska. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, vol. 37, no. 2, P. 157–162.
7. Healy D., Katopodis C., Tarrant P. 2007, Application of Ground Penetrating Radar for River Ice Surveys. *14th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers. Quebec City*. https://www.researchgate.net/publication/228894967_Application_of_ground_penetrating_radar_for_river_ice_surveys
8. Delaney A. J., Arcone S. A., Chacho E. 1990, Winter Short-Pulse Radar Studies on the Tanana River, Alaska. *Arctic*, vol. 43, no. 3, P. 244–254. <http://dx.doi.org/10.14430/arctic1618>
9. Galley R. J., Trachtenberg M., Langlois A., Barber D. G., Shafai L. 2009, Observations of geophysical and dielectric properties and ground penetrating radar signatures for discrimination of snow, sea ice and freshwater ice thickness. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 57, issue 1, P. 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.01.003>
10. Glushkov A. V. 2016, Rivers of the east of Russia: Guidebook. 502 p.
11. Fedorov M. P., Fedorova L. L., Omelyanenko A. V., Kulyandin G. A. 2014, Study of Formation of Lena River Ice Cover According of Decade Measurements by GPR. *15th International Conference on ground Penetrating Radar*. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2014.6970434>
12. Fedorov M. P., Fedorova L. L., Omelyanenko A. V. 2012, Investigation of the Lena river ice cover by GPR from helicopter. *14th International Conference on Ground Penetrating Radar, June 4–8. Shanghai, China 2012*. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2012.6254958>
13. Macheret Yu. Ya. 2006, *Radiozondirovaniye lednikov* [Radiosonde measurement of glaciers]. Moscow, 392 p.
14. Ermakov A. P., Starovoitov A. V., Vladov M. L. 2012, GPR studies of the upper section during the design of seismic works in winter. *Tekhnologii seismorazvedki* [Seismic Technologies], no. 2, P. 89–97. (In Russ.)
15. Fedorov M. P., Fedorova L. L., Savvin D. V., Kulizhnikov A. M. 2016, The study of the ice crossings on the rivers by the ground-penetrating radar. *16th International Conference of Ground Penetrating Radar. June 13–16. Hong Kong, China*. <https://doi.org/10.1109/ICG-PR.2016.7572625>
16. Michel B., Ramseier R. O. 1971, Classification of river and lake ice. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 8, pp. 36–45. <https://doi.org/10.1139/t71-004>
17. Anshakov G. P., Zhuravel Yu. N., Raschupkin A. V. 2015, The use of multi- and hyperspectral remote sensing data for automated monitoring of rivers and reservoirs in the spring. *Komp'yuternaya optika* [Computer optics], vol. 39, no. 2, P. 224–233. (In Russ.)
18. Johannessen O. M., Aleksandrov V. Yu., Frolov I. E. et al. 2007, *Nauchnyye issledovaniya v Arktike* [Scientific research in the Arctic]. Vol. 3. Remote sensing of sea ice on the Northern Sea Route: study and application. Saint Petersburg, 512 p.
19. Thuan Chu, Apurba Das, Karl-Erich Lindenschmidt. 2015, Monitoring the Variation in Ice-Cover Characteristics of the Slave River, Canada Using RADARSAT-2 Data – A Case Study. *Remote Sensing*, vol. 7(10), P. 13664–13691. <https://doi.org/10.3390/rs71013664>

The article was received on July 03, 2019

*mpfedoroff@gmail.com

**Lar-fed-90@rambler.ru

***Omealex47@yandex.ru