

УДК 556.555.5:551.321.6 + 551.312 (282.247.181.1)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА И ПАРАМЕТРОВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА ИМАНДРА МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

Ю. С. Новикова<sup>1\*</sup>, П. А. Рязанцев<sup>2</sup>, Ю. А. Дворников<sup>3,4</sup>,  
Н. В. Двоеглазова<sup>5,6</sup>, А. В. Толстикова<sup>1</sup>, М. Н. Игнатьева<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030), \*NovYuliana@gmail.com

<sup>2</sup> Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

<sup>3</sup> Научный центр «Смарт-технологии устойчивого развития городской среды в условиях глобальных изменений», Аграрно-технологический институт, Российский университет дружбы народов (ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198)

<sup>4</sup> Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (Пыжевский пер., 3, Москва, Россия, 119017)

<sup>5</sup> Балтийский федеральный университет им. И. Канта (ул. А. Невского, 14, Калининград, Россия, 236041)

<sup>6</sup> Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Нахимовский проспект, 36, Москва, Россия, 117997)

<sup>7</sup> Московский государственный университет (Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991)

В рамках Второй школы-практики полярных лимнологов в г. Апатиты на научной базе «Тиетта» Кольского научного центра РАН участники получили базовые навыки георадарной съемки для решения задач лимнологии. Георадиолокация выполнялась на покрытом льдом озере Имандра для изучения параметров льда и донных отложений в пространственном разрезе. Выполнение ручных измерений и георадарной съемки льда позволили определить толщину снежного покрова, белого и кристаллического слоев льда. В результате георадарной съемки также выделены особенности морфологии дна и определены глубины залегания литологических границ. Достоверность определения глубины подтверждена измерениями STD-зондирования.

Ключевые слова: озеро Имандра; георадиолокация; STD-зондирование; толщина льда; параметры донных отложений

Для цитирования: Новикова Ю. С., Рязанцев П. А., Дворников Ю. А., Двоеглазова Н. В., Толстикова А. В., Игнатьева М. Н. Определение структуры ледяного покрова и параметров донных отложений озера Имандра методом георадиолокации // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 6. С. 23–31. doi: 10.17076/lim1799

**Iu. S. Novikova<sup>1\*</sup>, P. A. Ryazantsev<sup>2</sup>, Yu. A. Dvornikov<sup>3,4</sup>, N. V. Dvoeglazova<sup>5,6</sup>,  
A. V. Tolstikov<sup>1</sup>, M. N. Ignatieva<sup>7</sup>. SURVEY OF ICE-COVER STRUCTURE AND SEDIMENT  
PARAMETERS OF LAKE IMANDRA BY GROUND-PENETRATING RADAR**

<sup>1</sup> Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences  
(50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), \*NovYuliana@gmail.com

<sup>2</sup> Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St.,  
185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

<sup>3</sup> Smart Urban Nature Research Laboratory, Agrarian-technological Institute, Peoples' Friendship  
University of Russia (6 Miklukho-Maklaya St., 117198 Moscow, Russia)

<sup>4</sup> A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences (3 Pyzhyovskiy Per.,  
119017 Moscow, Russia)

<sup>5</sup> Immanuel Kant Baltic Federal University (14 Al. Nevsky St., 236041 Kaliningrad, Russia)

<sup>6</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (36 Nakhimovskiy prospect, 117997,  
Moscow, Russia)

<sup>7</sup> Moscow State University (1 Leninskie gory, 119991 Moscow, Russia)

Participants of the 2nd hands-on school for polar limnologists in Apatity at the Tietta Research Station of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences taught basic skills of using ground-penetrating radar (GPR) survey to solve limnology problems. GPR survey was carried out on the ice-covered Lake Imandra to study the parameters of ice and bottom sediments in the spatial resolution. With the help of manual measurements and GPR sensing of the ice, the participants determined the thickness of the snowcover, white and crystalline ice layers. As a result of the GPR survey, the bottom morphology and the bedding depth of lithological boundaries were determined. The depth determinations were validated by CTD measurements.

**Keywords:** Lake Imandra; ground-penetrating radar (GPR) survey; CTD measurement; ice thickness; sediment parameters

**For citation:** Novikova Iu. S., Ryazantsev P. A., Dvornikov Yu. A., Dvoeglazova N. V., Tolstikov A. V., Ignatieva M. N. Survey of ice-cover structure and sediment parameters of Lake Imandra by ground-penetrating radar. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2023. No. 6. P. 23–31. doi: 10.17076/lim1799

## **Введение**

Изучение строения котловин озер и слагающих их донных осадков традиционно проводится в зимний период, поскольку работа со льда упрощает отбор стратиграфических колонок. При выборе точек пробоотбора важно понимать глубину водоема и особенности толщи озерных осадков. Зачастую для оценки глубины водоемов используется эхолокация. Однако при работе со льда у нее есть ряд недостатков, например малая дискретизация, так как под каждую точку лоцирования нужно подготовить отдельную лунку. Также эхолокация не предоставляет данных о строении донных осадков. Альтернативным способом для картографирования батиметрии озер выступает георадиолокация – метод, основанный на регистрации отраженной высокочастотной электромагнитной волны. Георадиолокация кроме определения положения кровли донных осадков с поверхности льда позволяет получить информацию об их строении и составе [Moorman, 2002]. При этом георадиолокация также не лишена ряда недо-

статков, таких как ограниченная глубина зондирования, связанная с электропроводностью воды, влиянием приповерхностных неоднородностей, в первую очередь слоя льда [Arcone et al., 2006; Лаломов, Глазунов, 2017].

Георадиолокация хорошо зарекомендовала себя при палеолимнологических исследованиях малых озер, обеспечивая сбор большого количества данных о строении котловин и мощности донных осадков, трассирование седиментационных границ и поиск тектонических разломов [Moorman, 2002; Sambuelli, Bava, 2012; Lachhab et al., 2015]. Следует отметить ряд успешных примеров георадарной съемки на озерах Карело-Кольского региона, что связано в том числе с низкой минерализацией природных вод в регионе [Родионов и др., 2018; Старовойтов и др., 2019; Ryazantsev et al., 2021].

Наряду с изучением котловин озер актуальной задачей является установление параметров ледяного покрова. Изучение льда на водоемах является важной задачей для умеренных и высоких широт, поскольку образование, разрушение и длительность периода устойчивого

ледяного покрова напрямую влияют на гидрологические и биогеохимические процессы водоемов. Многие авторы отмечают изменение в сроках установления и вскрытия льда на озерах, а также сокращение времени ледостава ввиду наблюдающихся глобальных изменений температуры воздуха, других климатических и локальных геоморфологических параметров [Sharma и др., 2019]. По имеющимся оценкам, большую роль играют региональные особенности водоемов, поскольку фенология льда определяется широтой и морфометрией места, теплообменом, ветровой обстановкой, осадками, что в значительной степени усложняет моделирование и прогноз будущих изменений [Sharma и др., 2019]. Изменение параметров льда, таких как его толщина, прозрачность и структура, малоизучены, однако также являются важными с точки зрения геоэкологических процессов озер и безопасности нахождения на льду. Например, оценки проб льда на озерах арктической и умеренной зон в период теплой зимы 2020–2021 гг. показали, что толщина льда увеличивалась в течение периода ледостава, а доля белого льда становилась преобладающей над кристаллическим на конец зимы – начало весны, что существенно уменьшает его несущую способность [Weyhenmeyer et al., 2022]. Образование белого льда происходит на поверхности установившегося ледяного покрова путем таяния и замерзания накапливающегося снега, выпадения дождя на снежный покров, а также просачивания озерной воды через трещины и замерзания образовавшейся водно-снежной массы. Все эти процессы возможны при колебаниях температуры около точки замерзания [Kirillin et al., 2012]. Впоследствии увеличение толщины белого льда влечет за собой изменение процессов внутри водоема – уменьшается поступление солнечной радиации непосредственно под лед из-за его малой прозрачности, в связи с чем ослабевает теплообмен между слоями воды и снижается скорость фотосинтеза как начальной стадии жизненного цикла организмов [Jansen et al., 2021]. Актуальным вопросом остается изменчивость параметров льда по площади озер в течение периода ледостава ввиду слабой изученности, поэтому возникает необходимость использования новых методов его оценки.

С учетом описанных выше вопросов, стоящих перед лимнологией, а также малой апробацией метода георадиолокации весьма актуальны опытно-методические георадиолокационные работы в различных природных условиях и сравнение полученных результатов с данными, полученными другими методами.

Цель работы заключалась в создании методики совместного использования георадиолокации, зондирования водной толщи STD-зондом и измерений слоев озерного льда для изучения изменчивости толщины и структуры озерного льда по площади озер, уточнения глубин акватории и изучения структуры донных отложений.

## Материалы и методы

В основе исследования лежат полевые материалы, полученные в апреле 2023 г. со льда на оз. Имандра в рамках работы Второй школы-практики полярных лимнологов в г. Апатиты (научная станция «Тиетта» Кольского научного центра РАН).

Озеро Имандра располагается на северо-западе европейской территории России и является самым крупным водоемом в Мурманской области, площадь которого около 900 км<sup>2</sup>. Озеро представляет интерес наряду с другими водными объектами Арктического региона в спектре последствий изменения климата. Котловина озера находится в тектонической депрессии, которая простирается с севера на юг от Кольского залива Баренцева моря до Кандалакшского залива Белого моря. Озеро подвержено сильной антропогенной нагрузке из-за множества месторождений полезных ископаемых в регионе и развития обширного производственного комплекса, в который входят предприятия горнодобывающей промышленности (АО «Апатит»), металлургической промышленности (цветная металлургия – ОАО «Североникель»; черная металлургия – ОАО «Олкон» и ОАО «Ковдорский ГОК»), энергетического комплекса (каскад Нивских ГЭС, Кольская АЭС, Апатитская ТЭЦ). Свой вклад вносят и хозяйственно-бытовые стоки городов Оленегорска, Мончегорска, Кировска, Апатитов и других населенных пунктов, расположенных на водосборе озера [Даувальтер, Кашулин, 2019]. Поскольку значимость антропогенной нагрузки на озеро становится сопоставимой с природной, остается актуальным вопрос о необходимости проведения комплексного мониторинга и отслеживания динамики гидрофизических, гидробиологических и гидрохимических показателей воды.

На первом этапе работы было выбрано направление трассы от научной базы в сторону открытой части озера (рис. 1). Для оценки структуры льда проводилось сопоставление толщины и структуры выпиленного блока ледяного покрова оз. Имандра и данных георадиолокационного профилирования. Далее по

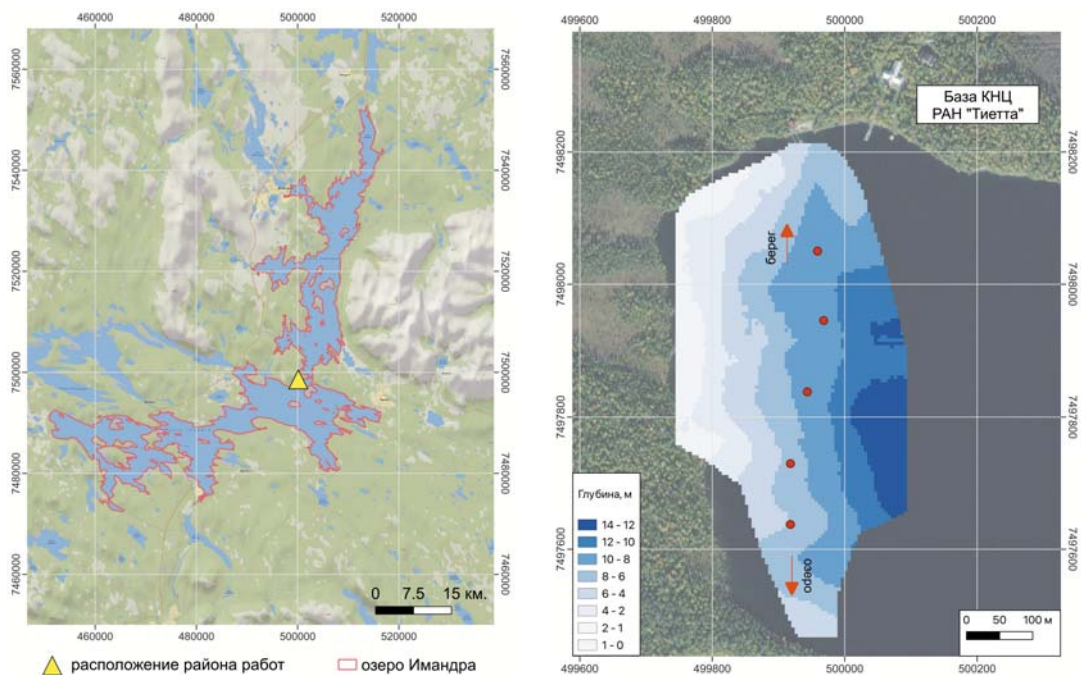


Рис. 1. Расположение научной станции «Тьетта» (слева) и карта-схема района исследования (справа). Маршрут исследования построен в направлении берег-озеро. Точками обозначены станции CTD-зондирования

Fig. 1. Location of the Tietta research station (left) and the schematic map of the study area (right). The research track was in the coast-lake direction. The dots indicate CTD-measuring stations

профилям выполнялось картирование дна. В качестве вспомогательного оборудования для корректировки полученных радарограмм использовался CTD-зонд CastAway (США) со встроенным GPS-приемником, который предназначен для получения информации о распределении температуры, давления и электропроводности водной толщи с точностью до сотых. Значения давления, измеренные CTD-зондом, позволили скорректировать границу вода-дно, полученную при помощи георадиолокации.

Метод георадиолокации основан на генерировании электромагнитного импульса и регистрации отраженного сигнала от физических неоднородностей изучаемой среды [Владов, Старовойтов, 2004]. В данной работе глубина зондирования сигнала зависит от электрофизических свойств воды и донных осадков. Лед из-за своих электрофизических свойств является благоприятным объектом для георадарных исследований. При благоприятных условиях глубина зондирования может быть несколько метров в зависимости от центральной частоты антенного блока. Ограничивающим фактором служит вода на поверхности и внутри ледового монолита. Наличие такого контрастного слоя создает множественные переотражения сигнала, которые ухудшают качество записи и могут

привести к полной невозможности выявления границы. Особенно такие эффекты наблюдаются при измерениях в весенний период.

Для выполнения исследований использовался георадар «ОКО-2» («Логис-Геотех», Россия) с двумя антенными блоками с центральной частотой 100 и 400 МГц. Антенна 100 МГц применялась для изучения донных осадков, а 400 МГц – для изучения свойств льда. Съёмка выполнялась путем буксирования георадара по льду и регистрации дистанции одометром. Регистрация отраженного сигнала осуществлялась во временном окне до 800 нс. Шаг георадарных трасс по профилю составлял 5 см. Данные записываются в виде трассы, имеющей такие параметры, как время прихода, амплитуда и фаза сигнала. Набор таких трасс формирует радарограмму, представленную временным разрезом, где горизонтальная ось – положение трасс, а вертикальная – время прихода сигнала. При съёмке со льда на радарограмме формируются высокоамплитудные резонансные отражения [Arcone et al., 2006], поэтому верхняя часть полученного профиля была довольно сильно зашумлена. В связи с этим проводилась дополнительная обработка первичных записей в программе GeoScan32 («Логис-Геотех», Россия). Для дальнейшей интерпретации

и анализа данных осуществлялся переход от временного разреза к глубинному посредством скоростного анализа, который заключался в определении скорости распространения сигнала в различных средах.

### Результаты исследования

Результаты георадарной оценки толщины льда на примере станции отбора ледяного блока приведены на рис. 2. На фрагменте радарограммы фиксируется несколько четких осей синфазности, соответствующих основным границам слоев льда. Границы пикировались по максимальной амплитуде отраженного сигнала. Первая ось соответствует границе белого льда под снегом. Ручные измерения показали толщину снежного покрова равную 9 см, в результате чего для этого слоя была рассчитана скорость георадарного сигнала ( $V$ ) равная 9,7 см/нс. Ниже располагается слой белого льда, толщина которого составила 43,5 см, что позволяет вычислить  $V = 7,8$  см/нс. Третий слой соответствует кристаллическому льду толщиной 23 см и вычисленной скорости  $V = 11,2$  см/нс. Следует отметить, что на границе белого и кристаллического льда обнаружился слой воды толщиной около 3 см. Однако вертикальной разрешаю-

щей способности антенного блока с центральной частотой 400 МГц было недостаточно для его выделения, вследствие чего отраженный от этого слоя сигнал сливается с сигналом, отраженным от кровли кристаллического льда.

С использованием скоростей сигнала георадара, установленных на основе ручных замеров, были пикированы границы льда на радарограмме на протяжении всего профиля озера длиной 500 м. В результате определено, что средние значения толщины белого льда вдоль профиля составляют 30,2 см, при минимальном значении 29,6 см и максимальном 48,9 см. Оценка толщины кристаллического льда показала среднее значение 24,4 см, а также 19,9 и 31,5 см для минимального и максимального значений соответственно. Максимальные показатели льда фиксировались в прибрежной части, что, вероятно, связано с большим количеством снега, из которого образуется белый лед.

Обнаружение данной вариативности толщины льда может говорить о неравномерном нарастании и таянии льда в связи с разными причинами – например, с неоднородностью накопления снега на поверхности льда, вследствие его ветрового перераспределения по площади озера, а также с гидрологическими процессами, происходящими непосредствен-

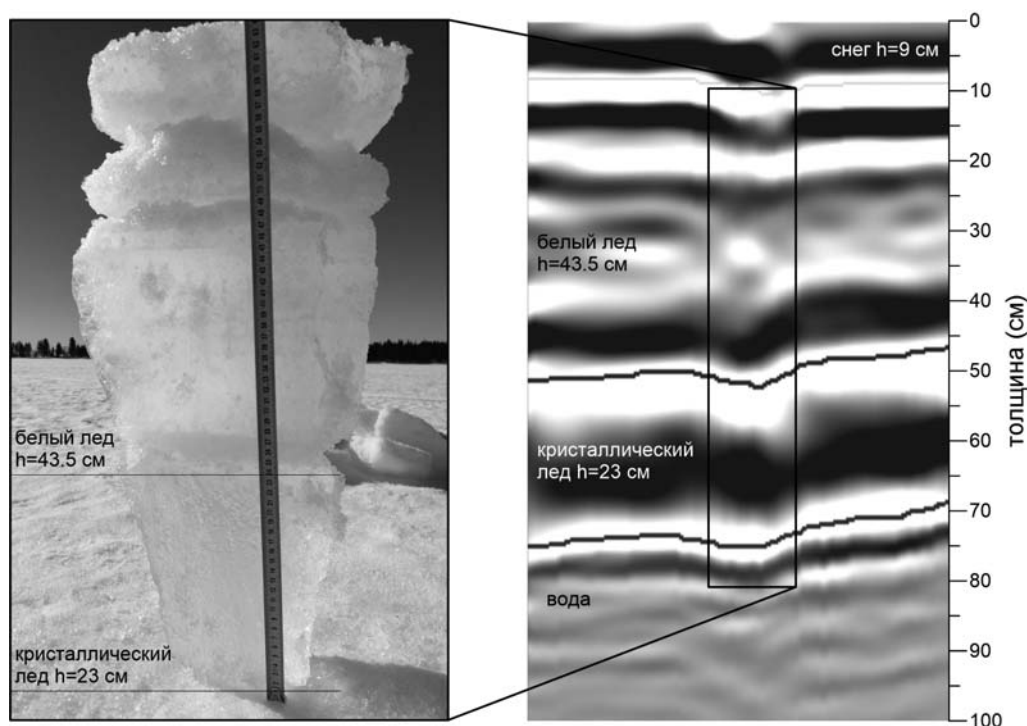


Рис. 2. Фрагмент радарограммы и соответствующий образец озерного льда  
 Fig. 2. A fragment of the GPR cross-section and a corresponding lake ice sample

но подо льдом. В этой связи, например, изучалось влияние гидродинамики подледного слоя на величину теплового потока из воды в лед [Kirillin et al., 2020].

Георадиолокационный профиль с использованием антенны 100 МГц, проходящий от берега на протяжении 500 м, демонстрирует изменчивость морфологии дна, а также некоторую неоднородность состава донных отложений (рис. 3). При скоростном анализе для каждого из выделенных слоев рассчитаны характерные скорости для слоя льда ( $V = 10,6$  см/нс), воды ( $V = 3,3$  см/нс), ила ( $V = 3,8$  см/нс) и минеральных грунтов ( $V = 6,7$  см/нс). Скорости определялись путем анализа дифрагированной волны, который позволяет определить диэлектрическую проницаемость ( $\epsilon$ ) по наклону крыльев гиперболы, сформированных на локальных объектах, залегающих в толще исследуемого слоя. Для льда и воды использованы характерные справочные значения  $\epsilon$ , равные 4 и 81 соответственно. На основе средних величин диэлектрической проницаемости, в илах равной 60 и в минеральном грунте равной 30, рассчитывалась скорость георадарного сигнала. Кроме того, привлекались справочные материалы по донным осадкам озер [Moogman, 2002]. В среднем глубина озера вдоль профиля наблюдений составила 8,2 м с минимумом 4,2 м и максимумом 9,6 м. Что касается литологических неоднородностей, то по радарограмме явно читается локальная котловина на пикетах 0–180 м, заполненная толщей органического ила мощностью до 1,9 м, что выражено в субгоризон-

тальной георадарной фации. При этом на большей части дна вдоль профиля органический ил имеет мощность примерно 0,5–1 м. Под илом расположено минеральное основание дна озера, представленное, вероятно, мореной, о чем свидетельствует «хаотичная» георадарная фация. В диапазоне пикетов 360–420 м обнаружено поднятие дна, сложенное преимущественно каменистым материалом, на что указывает большое количество гипербол дифрагированной волны. Высота такого поднятия 1,4 м, а угол склонов  $2^\circ$ , таким образом, предполагается, что это луда.

Исследование гидрофизических параметров водной толщи STD-зондом продемонстрировало характерный профиль температуры для покрытого льдом озера – почти однородный конвективно-перемешанный слой с относительно тонким стратифицированным слоем у поверхности. Также анализ радарограммы совместно с измерениями STD-зонда показывает, что в области повышенной мощности органических илов фиксируется небольшое увеличение температуры и электропроводности в придонном слое. Сопоставление измерений глубин по данным георадиолокации и STD-зонда продемонстрировало сходимость полученных оценок (рис. 4). Использование небольшой выборки не позволяет точно рассчитать невязку и определить ее источники. На данном этапе можно отметить возрастание невязки с глубиной из-за уменьшения резкости отражающих границ и, как следствие, проблематичность их выявления и пикирования.

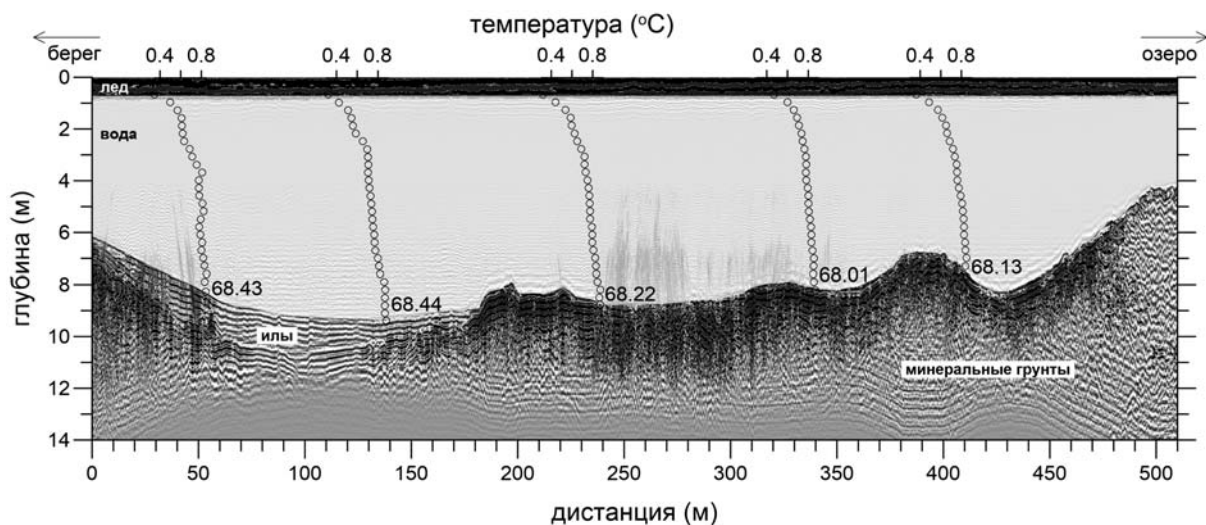


Рис. 3. Радарограмма с нанесенными профилями температуры по данным STD-зонда. Для каждой станции STD-зондирования указано значение электропроводности у дна в мкС/см

Fig. 3. GPR cross-section and profiles of temperature by CTD-measuring. Bottom conductivity values are given for each CTD-measuring station in  $\mu\text{S}/\text{cm}$

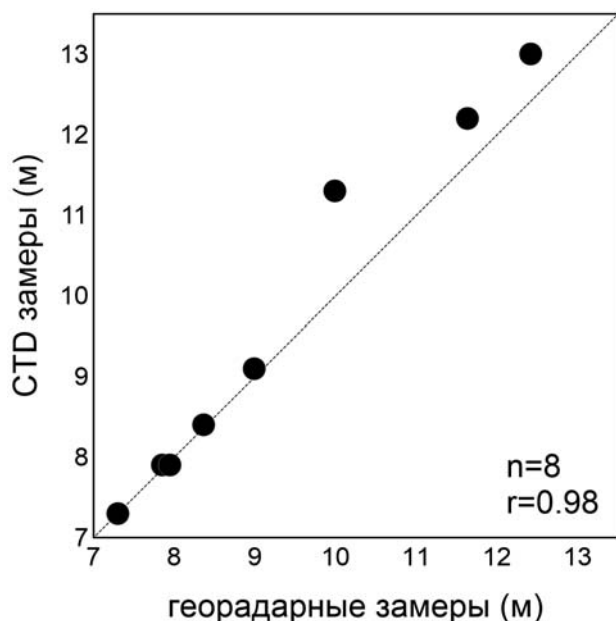


Рис. 4. Сопоставление контактных (СТД-зонд) и бесконтактных (георадар) оценок глубины озера Имандра  
 Fig. 4. Comparison of CTD-measuring and GPR-survey assessments of the Lake Imandra depth

## Выводы

Сопоставление ручных измерений слоев образца озерного льда и снега и результатов георадиолокации с антенной 400 МГц позволило определить скорость распространения сигнала в каждом из слоев. Полученные скорости можно использовать для исследований других водных объектов, однако в этом случае необходимо понимать конструкцию льда в каждый измеряемый период. Толщина белого и кристаллического льда может варьироваться, может наблюдаться разная толщина прослоев воды и степень влажности снега на поверхности, в результате чего значительно меняется и скорость в верхней части профиля. Последующая пространственная съемка по акватории озера позволила установить толщину и структуру озерного льда. Такой подход позволяет быстро оценивать изменчивость толщины и структуры льда по акватории озера и производить картографирование этих параметров.

Выполненные исследования показали высокую сходимость измерения глубины на пространственном разрезе бесконтактным и контактным способом. Полученные результаты позволяют рассматривать метод георадиолокации как вспомогательный при выполнении гидрологических работ в зимний период на малых водоемах с максимальными глубинами

около 10 м. Предварительная съемка георадаром по профилям позволяет выявить особенности строения дна и оптимизировать сеть точек СТД-наблюдений и отбора колонок донных отложений.

## Литература

Владов М. Л., Старовойтов А. В. Введение в георадиолокацию. Учебное пособие. М.: МГУ, 2004. 153 с.

Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Фоновые содержания элементов в донных отложениях озера Имандра // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. Т. 10, № 4. С. 13–30. doi: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.4.13-30

Лаломов Д. А., Глазунов В. В. Установление зависимости между минерализацией и добротностью на основе георадиолокационных данных // Георесурсы. 2017. Т. 1, № 19. С. 69–77. doi: 10.18599/grs.19.1.11

Родионов А. И., Николаева С. Б., Рязанцев П. А. Оценка возможностей георадиолокации при изучении сейсмогенных нарушений и деформаций в донных осадках (на примере озера Уполокшское, северо-восток Фенноскандинавского щита) // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 4. С. 1189–1203. doi: 10.5800/GT-2018-9-4-0390

Старовойтов А. В., Валиуллина К. З., Ошкин А. Н., Пятилова А. М. Строение осадочного чехла на пресноводных озерах полуострова Киндо вблизи Беломорской биологической станции МГУ по данным георадиолокации и бурения // Вестник Московского университета. 2019. № 6. С. 87–99. doi: 10.33623/0579-9406-2019-6-87-98

Arcone S. A., Finnegan D. C., Liu L. Target interaction with stratigraphy beneath shallow, frozen lakes: Quarter-wave resonances within GPR profiles // Geophysics. 2006. Vol. 71, no. 6. P. K119–K131. doi: 10.1190/1.2358404

Jansen J., MacIntyre S., Barrett D. C., Chin Y.-P., Cortés A., Forrest A. L., Hrycik A. R., Martin R., McMeans B. C., Rautio M., Schwefel R. Winter limnology: How do hydrodynamics and biogeochemistry shape ecosystems under ice? // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2021. Vol. 126, no. 6. e2020JG006237. doi: 10.1029/2020JG006237

Kirillin G., Aslamov I., Kozlov V., Zdorovenov R., Granin N. Turbulence in the stratified boundary layer under ice: observations from Lake Baikal and a new similarity model // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2020. Vol. 24, no. 4. P. 1691–1708. doi: 10.5194/hess-24-1691-2020

Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A., Granin N., Bernhardt J., Engelhardt Ch., Efremova T., Golosov S., Palshin N., Sherstyankin P., Zdorovenova G., Zdorovenov R. Physics of seasonally ice-covered lakes: a review // Aquat. Sci. 2012. Vol. 74. P. 659–682. doi: 10.1007/s00027-012-0279-y

Lachhab A., Booterbaugh A., Beren M. Bathymetry and sediment accumulation of Walker Lake, PA using two GPR antennas in a new integrated method // J. Environ. Eng. Geophys. 2015. Vol. 20, no. 3. P. 245–255. doi: 10.2113/JEEG20.3.245

Moorman B. J. Ground-penetrating radar applications in paleolimnology // Tracking Environmental

Change Using Lake Sediments. Developments in Paleoenvironmental Research / Eds. W. M. Last, J. P. Smol. Springer, 2002. Vol. 1. P. 23–47. doi: 10.1007/0-306-47669-X\_3

Ryazantsev P., Rodionov A., Subetto D. Waterborne GPR mapping of stratigraphic boundaries and turbidite sediments beneath the bottom of Lake Polevskoye, Karelia, NW Russia // *Journal of Paleolimnology*. 2021. Vol. 66, no. 3. P. 261–277. doi: 10.1007/s10933-021-00205-w

Sambuelli L., Bava S. Case study: A GPR survey on a morainic lake in northern Italy for bathymetry, water volume and sediment characterization. // *J. Appl. Geophys.* 2012. Vol. 81. P. 48–56. doi: 10.1016/j.jappgeo.2011.09.016

Sharma S., Blagrove K., Magnuson J. J., O'Reilly C. M., Oliver S., Batt R. D., Magee M. R., Straile D., Weyhenmeyer G. A., Winslow L., Woolway R. I. Widespread loss of lake ice around the Northern Hemisphere in a warming world // *Nat. Clim. Chang.* 2019. Vol. 9, no. 3. P. 227–231. doi: 10.1038/s41558-018-0393-5

Weyhenmeyer G. A., Oberegger U., Rudebeck H., Jakobsson E., Jansen J., Zdorovenova G., Bansal Sh., Block B. D., Carey C. C., Doubek J. P., Dugan H., Erina O., Fedorova I., Fischer J. M., Grinberga L., Grosart H.-P., Kangur K., Knoll L. B., Laas A., Lepori F., Meier J., Palshin N., Peternell M., Pulkkanen M., Rusak J. A., Sharma S., Wain D., Zdorovenov R. Towards critical white ice conditions in lakes under global warming // *Nat. Commun.* 2022. Vol. 13. no. 1. P. 1–8. doi: 10.1038/s41467-022-32633-1

## References

Arcone S. A., Finnegan D. C., Liu L. Target interaction with stratigraphy beneath shallow, frozen lakes: Quarter-wave resonances within GPR profiles. *Geophysics*. 2006;71(6):K119–K131. doi: 10.1190/1.2358404

Dauvalter V. A., Kashulin N. A. Background levels of chemical elements in the sediments of Lake Imandra. *Transactions of the Kola Science Centre RAS*. 2019;10(4):13–30. doi: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.4.13-30 (In Russ.)

Jansen J., MacIntyre S., Barrett D. C., Chin Y.-P., Cortés A., Forrest A. L., Hrycik A. R., Martin R., McMeans B. C., Rautio M., Schwefel R. Winter limnology: How do hydrodynamics and biogeochemistry shape ecosystems under ice? *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2021;126(6):e2020JG006237. doi: 10.1029/2020JG006237

Kirillin G., Aslamov I., Kozlov V., Zdorovenov R., Granin N. Turbulence in the stratified boundary layer under ice: observations from Lake Baikal and a new similarity model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2020;24(4):1691–1708. doi: 10.5194/hess-24-1691-2020

Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A., Granin N., Bernhardt J., Engelhardt Ch., Efremova T., Golosov S., Palshin N., Sherstyankin P., Zdorovenova G., Zdorovenov R. Physics of seasonally ice-covered lakes: a

review. *Aquat. Sci.* 2012;74:659–682. doi: 10.1007/s00027-012-0279-y

Lachhab A., Booterbaugh A., Beren M. Bathymetry and sediment accumulation of Walker Lake, PA using two GPR antennas in a new integrated method. *J. Environ. Eng. Geophys.* 2015;20(3):245–255. doi: 10.2113/JEEG20.3.245

Lalomov D. A., Glazunov V. V. Establishing the dependence between the salinity and quality factor based on GPR data. *Georesources*. 2017;1(19):69–77. doi: 10.18599/grs.19.1.11 (In Russ.)

Moorman B. J. Ground-penetrating radar applications in paleolimnology. *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Developments in Paleoenvironmental Research*. Springer; 2002. Vol. 1. P. 23–47. doi: 10.1007/0-306-47669-X\_3

Rodionov A. I., Nikolaeva S. B., Ryazantsev P. A. Evaluation of GPR capabilities in the study of seismogenic faulting and deformation in the bottom sediments of Lake Upoloksha (northeast of the Fennoscandian Shield). *Geodynamics & Tectonophysics*. 2018;9(4):1189–1203. doi: 10.5800/GT-2018-9-4-0390 (In Russ.)

Ryazantsev P., Rodionov A., Subetto D. Waterborne GPR mapping of stratigraphic boundaries and turbidite sediments beneath the bottom of Lake Polevskoye, Karelia, NW Russia. *Journal of Paleolimnology*. 2021;66(3):261–277. doi: 10.1007/s10933-021-00205-w

Sambuelli L., Bava S. Case study: A GPR survey on a morainic lake in northern Italy for bathymetry, water volume and sediment characterization. *J. Appl. Geophys.* 2012;81:48–56. doi: 10.1016/j.jappgeo.2011.09.016

Sharma S., Blagrove K., Magnuson J. J., O'Reilly C. M., Oliver S., Batt R. D., Magee M. R., Straile D., Weyhenmeyer G. A., Winslow L., Woolway R. I. Widespread loss of lake ice around the Northern Hemisphere in a warming world. *Nat. Clim. Chang.* 2019;9(3):227–231. doi: 10.1038/s41558-018-0393-5

Starovoitov A. V., Valiullina K. Z., Oshkin A. N., Piatilova A. M. The structure of the sedimentary cover in freshwater lakes of the Kindo Peninsula near the White Sea Biological station of Moscow state university according to data of ground penetration radar and boring. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2019;(6):87–98. doi: 10.33623/0579-9406-2019-6-87-98 (In Russ.)

Vladov M. L., Starovoitov A. V. Introduction to GPR. Moscow State University; 2004. 153 p. (In Russ.)

Weyhenmeyer G. A., Oberegger U., Rudebeck H., Jakobsson E., Jansen J., Zdorovenova G., Bansal Sh., Block B. D., Carey C. C., Doubek J. P., Dugan H., Erina O., Fedorova I., Fischer J. M., Grinberga L., Grosart H.-P., Kangur K., Knoll L. B., Laas A., Lepori F., Meier J., Palshin N., Peternell M., Pulkkanen M., Rusak J. A., Sharma S., Wain D., Zdorovenov R. Towards critical white ice conditions in lakes under global warming. *Nat. Commun.* 2022;13(1):1–8. doi: 10.1038/s41467-022-32633-1

Поступила в редакцию / received: 02.08.2023; принята к публикации / accepted: 13.09.2023.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.



## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

### **Новикова Юлия Сергеевна**

инженер-исследователь лаборатории географии  
и гидрологии

*e-mail: NovYuliana@gmail.com*

### **Рязанцев Павел Александрович**

канд. геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник

*e-mail: chthonian@yandex.ru*

### **Дворников Юрий Александрович**

канд. геол.-мин. наук, младший научный сотрудник,  
доцент агроинженерного департамента АТИ РУДН;  
научный сотрудник ИФА РАН

*e-mail: ydvornikow@gmail.com*

### **Двоеглазова Надежда Вадимовна**

аспирант БФУ им. И. Канта; старший лаборант  
лаборатории прибрежных систем Атлантического  
отделения ИО РАН

*e-mail: nadya2eyes@mail.ru*

### **Толстик Алексей Владимирович**

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник,  
руководитель лаборатории географии и гидрологии

*e-mail: alexeytolstikov@mail.ru*

### **Игнатьева Мария Николаевна**

*e-mail: mariyaignatieva@mail.ru*

## **CONTRIBUTORS:**

### **Novikova, Iuliia**

Research Engineer, Laboratory of Geography and Hydrology

### **Ryazantsev, Pavel**

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher

### **Dvornikov, Yury**

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Junior Researcher,  
Assistant Professor at the Agroengineering Department,  
Agrarian-Technological Institute, RUDN University,  
Researcher at the IAP RAS

### **Dvoeglazova, Nadezhda**

Doctoral Student at Immanuel Kant Baltic Federal University;  
Senior Assistant at the Laboratory of Coastal Systems Study,  
Atlantic Branch of IO RAS

### **Tolstikov, Alexey**

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher, Head of the Laboratory  
Geography and Hydrology

### **Ignatieva, Maria**