

УДК 551.321

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-1(73-80)

А. К. ТУЛОХОНОВ*, **Е. Ж. ГАРМАЕВ***, **Ю. Б. БАШКУЕВ****, **Ю. Л. ЛОМУХИН****, **В. Б. ХАПТАНОВ****,
М. Г. ДЕМБЕЛОВ**, **М. В. СЛИПЕНЧУК*****, **Б. Ч. ДОРЖИЕВ****, **О. Н. ОЧИРОВ****

*Байкальский институт природопользования СО РАН,
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8, Россия, aktulohonov@binm.ru, garend1@yandex.ru

**Институт физического материаловедения СО РАН,
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия, buddich@mail.ru, Lomukhin_Yuriy@mail.ru,
vkhaptanov@mail.ru, mdembelov@mail.ru, bchdorj@yandex.ru, 1_2_z@mail.ru

***Фонд содействия сохранению озера Байкал,
119049, Москва, ул. Донская, 13, Россия, info@baikalfund.com

РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА ОЗЕРА БАЙКАЛ

Представлены результаты зимней радиофизической экспедиции 2014 г., в рамках которой электромагнитными методами был исследован ледовый покров оз. Байкал. Основные задачи экспедиции — обнаружение неоднородностей ледового покрова, таких как становые трещины, пропарины, определение толщины льда и его структуры в районе пропарин методом георадарного зондирования. В экспериментах использованы георадар «ОКО-2» дециметрового диапазона и наносекундный радар с длиной волны 3 см. Измерения проведены с судна на воздушной подушке «Хивус» и с автомобиля УАЗ. Определена толщина льда оз. Байкал методами бесконтактных электромагнитных измерений. Представлены радарограммы отраженных от ледового покрова сигналов. Методом короткоимпульсной радиолокации установлены параметры сигналов, отраженных от искусственных неровностей покрова. Предложена концепция радиофизического мониторинга, позволяющая определять параметры ледового покрова водоема с высоким пространственным разрешением. Представленный в работе комплексный подход к исследованию состояния ледяного покрова направлен на интеграцию различных физико-химических методов диагностики изучаемых объектов. Дальнейшее развитие концепции комплексного исследования ледового покрова и создание сети мониторинга связано с решением ряда научно-технических задач, включающих разработку физических моделей, развитие информационно-измерительных комплексов, обоснование сети интегрированного мониторинга.

Ключевые слова: ледовый покров, Байкал, георадарное зондирование, короткоимпульсная радиолокация, толщина льда.

A. K. TULOKHONOV*, **E. Zh. GARMAEV***, **Yu. B. BASHKUEV****, **Yu. L. LOMUKHIN****, **V. B. KHAPTANOV****,
M. G. DEMBELOV**, **M. V. SLIPENCHUK*****, **B. Ch. DORZHIEV****, **O. N. OCHIROV****

*Baikal Institute of Nature Management, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Sakhyanovoi, 8, Ulan-Ude, 760047, Russia, aktulohonov@binm.ru, garend1@yandex.ru

**Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Sakhyanovoi, 6, Ulan-Ude, 760047, Russia, buddich@mail.ru, Lomukhin_Yuriy@mail.ru,
vkhaptanov@mail.ru, mdembelov@mail.ru, bchdorj@yandex.ru, 1_2_z@mail.ru

***Lake Baikal Protection Fund, ul. Donskaya, 13, Moscow, 110049, Russia, info@baikalfund.com

RADIOPHYSICAL MONITORING OF THE LAKE BAIKAL ICE COVER

Presented are the results of the winter 2014 radiophysical expedition, within the framework of which the Baikal ice cover was investigated by electromagnetic methods. The primary objectives the expedition were to detect irregularities in the ice cover, such as cracks and thawing steamed holes in the ice, and to determine the ice thickness and structure in the area of the thawing holes by the GPR sounding method. We used in the experiments the “OKO-2” GPR of the decimeter band and the nanosecond radar with the wavelength of 3 cm. The measurements were made carried out from the Khivus hovercraft and from the UAZ automobile. The ice thickness of Lake Baikal was determined by non-contact electromagnetic measurement methods. Radargrams of reflected signals from the ice cover are presented. Radar patterns of reflected signals from artificial irregularities of the ice cover were obtained by the short-pulse radar method. The concept of radiophysical monitoring is suggested, which provides a means of determining the ice cover parameters of a water body with high spatial resolution. We present an integral approach to investigating the state of ice cover in order to integrate different physicochemical methods for diagnosing the objects studied.

© 2018 Тулохонов А. К., Гармаев Е. Ж., Башкуев Ю. Б., Ломухин Ю. Л., Хаптанов В. Б.,
Дембелов М. Г., Слипечук М. В., Доржиев Б. Ч., Очиров О. Н.

A further development of the concept of integrated ice cover research, and the creation of the monitoring network involves solving a number of scientific and engineering tasks that include developing physical models and information and measurement systems as well as the rationale for an integrated monitoring network.

Keywords: ice cover, Baikal, GPR sounding, short-pulse radar, ice thickness.

ВВЕДЕНИЕ

В 2013 г. в рамках международной российско-швейцарской научно-исследовательской экспедиции «Трансевразийский перелет: Леман–Байкал» проведено мульти- и гиперспектральное дистанционное зондирование земной поверхности в оптическом диапазоне с борта дельталета для оценки состояния растительного и почвенного покрова, динамики эволюционных процессов в оз. Байкал и дельте р. Селенги. В марте 2014 г. при финансовой поддержке Фонда содействия сохранению оз. Байкал и Байкальского государственного природного биосферного заповедника была проведена зимняя экспедиция на оз. Байкал. Цель экспедиции — исследование ледового покрова методами георадиолокации и короткоимпульсной радиолокации, определение его структуры и динамики в районах пропарин и стантовых трещин. В экспедиции приняли участие сотрудники Байкальского института природопользования СО РАН и Института физического материаловедения СО РАН. Район исследований — прибрежная зона оз. Байкал, включая залив Сор Черкалово и дельту р. Селенги. При проведении ледовых измерений использовано судно на воздушной подушке «Хивус», а при летных измерениях — дельталет «Фрегат» российского производства.

Картографирование состояния ледового покрова имеет научное и практическое значение. Ледяная поверхность влияет на условия формирования энергетических потоков в системе водоем — атмосфера, определяет своеобразие всех элементов режима озера и воздействует на функционирование его экосистемы. Картографическая информация о ледовой обстановке необходима для планомерного проведения навигации и перевозки грузов по льду, правильной эксплуатации гидротехнических сооружений [1].

Ледовый покров водоемов обуславливает их гидрологические особенности, которые можно выявить при изучении структуры льда. Вместе с тем определение структуры ледового покрова является сложной задачей: во-первых, из-за необходимости отбора большого числа проб и, следовательно, трудоемкости прямых измерений; во-вторых, из-за экранирующего влияния снежного покрова, препятствующего проведению фотосъемки, и, в-третьих, из-за требований обеспечить определенные условия при транспортировке и работе с образцами [2, 3].

Задача существенно упрощается при использовании радиофизических методов дистанционного зондирования [4–8], в частности при установке измерительной аппаратуры на судно на воздушной подушке или летательные аппараты — самолеты или дельталеты. При измерениях использованы два метода радиозондирования подстилающей поверхности — георадарное зондирование на частотах 1700 и 400 МГц [9, 10] и короткоимпульсная радиолокация с использованием излучения электромагнитных волн на частоте 10 ГГц.

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОРАДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

С 18 по 20 марта 2014 г. проведены измерения ледового покрова на 87-километровом профиле акватории оз. Байкал (район пос. Истомино–дельта р. Селенги, Кабанский район Республики Бурятия) методом георадарного зондирования на частотах 1700 и 400 МГц. Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) «ОКО-2» предназначен для обнаружения точечных и протяженных металлических и неметаллических объектов в различных неметаллических средах (грунт, вода, строительные конструкции и т. п.). Результаты зондирования выводятся на экран регистрирующего устройства в реальном времени с последующим сохранением в файл для обработки и вывода на печатающее устройство. Прибор может эксплуатироваться при температуре окружающей среды от –20 до 50 °С при относительной влажности до 95 % [9].

Основной объем работы по георадарному зондированию ледового покрова оз. Байкал выполнен с борта катера на воздушной подушке «Хивус» Байкальского государственного заповедника. Антенный блок АБ-1700 был закреплен на носу катера на высоте 0,6 м. Блок управления георадара «ОКО-2» и компьютер находились на месте оператора в салоне катера. 19 марта 2014 г. георадарная съемка ледового покрова проведена в районе Сора Черкалово с выходом в открытый Байкал и вдоль дельты р. Селенги по направлению к базе Байкальского государственного заповедника (рис. 1, а).

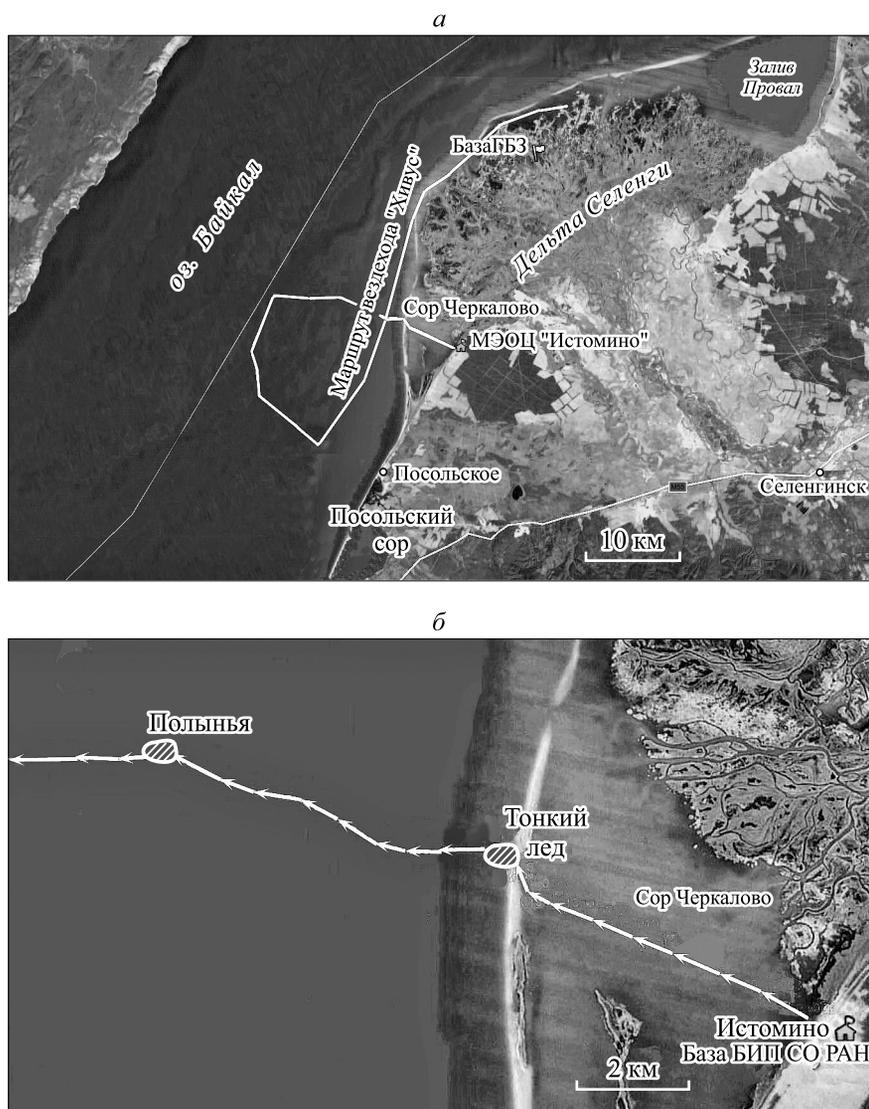


Рис. 1. Схемы георадарного маршрута протяженностью 87 км, снятого на борту катера на воздушной подушке «Хивус» (а), и георадарного зондирования по профилю «Истомино–полынья» протяженностью 13 км (б).

Важным объектом исследований на маршруте стала большая полынья (пропарина) диаметром около 50 м, образовавшаяся в месте сильного газовыделения со дна Байкала. Схема участка маршрута катера от береговой зоны научного стационара «Истомино» Байкальского института природопользования СО РАН до полыньи протяженностью 13 км представлена на рис. 1, б, радарограмма этого участка — на рис. 2, а. Антенный блок АБ-1700 с центральной частотой излучения 1700 МГц имеет разрешающую способность по глубине 3 см [9, 10], т. е. точность определения толщины слоя или положения границ определяется с погрешностью 3 см. Кажущаяся размытость верхней и нижней кромок ледового покрова обусловлена колебанием высоты антенного блока георадара над поверхностью льда вследствие качания корпуса вездехода на воздушной подушке на неровностях снежно-ледового покрова, осложненного торосами, при движении со средней скоростью около 30 км/ч (см. рис. 2, а). Изменения положения сигналов отражения от верхней и нижней кромок ледового покрова относительно начала отсчета, обусловленные колебанием высоты антенного блока георадара над поверхностью льда, нивелируются применением специальных методов обработки (горизонтальный фильтр [10]).

В заливе Сор Черкалово толщина льда составляла в среднем 1,1 м. За пределами залива в открытом Байкале толщина льда уменьшалась до 0,6 м. В районе «прорвы» — прохода в косе, окаймляющей залив, имеется обширная зона истончения льда протяженностью более 400 м вдоль пути следования

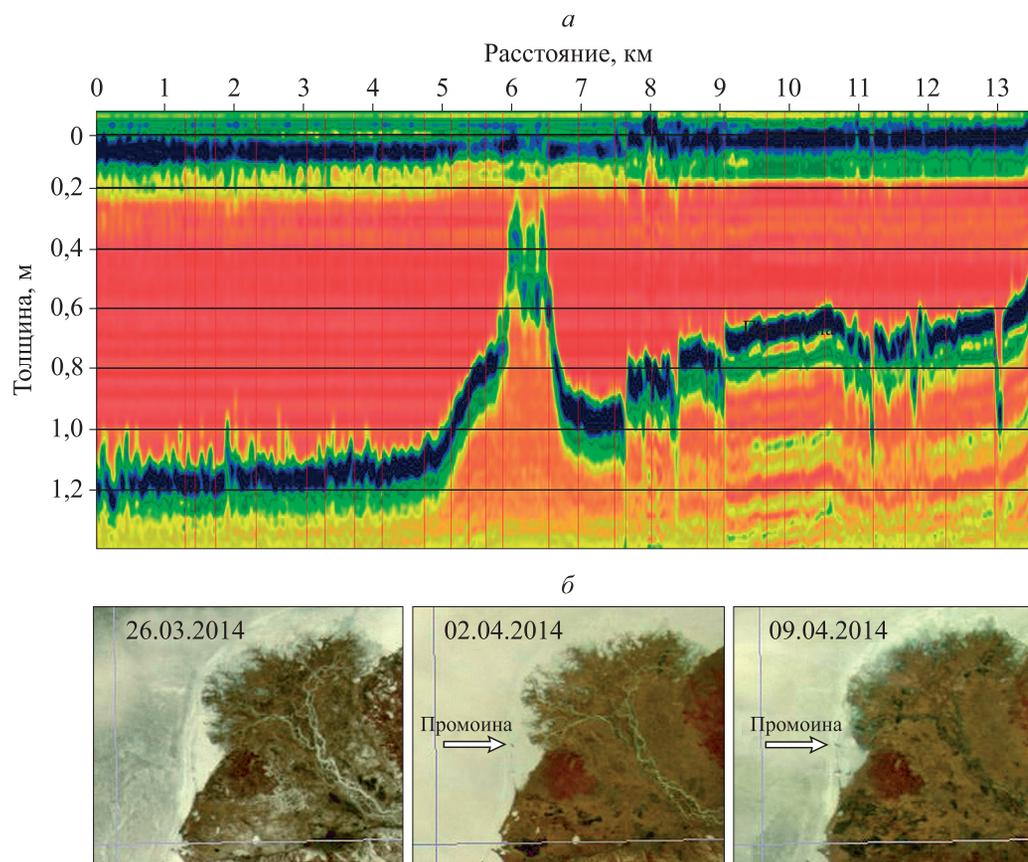


Рис. 2. Радарограмма по профилю «Истомино–полюнья» (а) и динамика изменения размеров промоины по данным прибора MODIS спутника Terra с разрешением 250 м [11] (б).

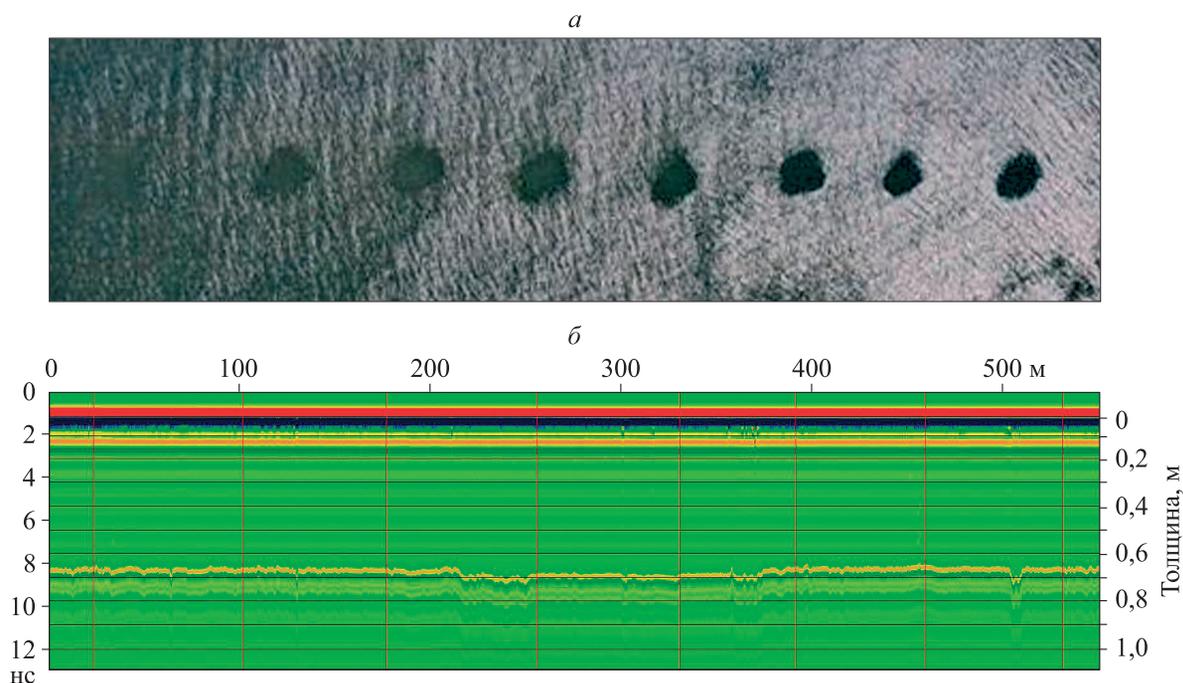


Рис. 3. Восемь кругов на поверхности оз. Байкал, обнаруженных спектрометрической съемкой с борта дельталета в летней экспедиции 2013 г. (а), и георадарное профилирование вдоль линии центров восьми кругов (вертикальные метки на радарограмме) на протяжении 550 м, толщина ледового покрова 0,64–0,7 м (б).

вездехода. Толщина льда здесь уменьшается в несколько раз и местами не достигает даже 0,2 м (см. рис. 2, *а*). Радарограмма заканчивается в месте остановки катера в 20 м от края полыньи на отметке толщины льда 0,4 м (см. рис. 2, *а*). Через две недели в месте истончения льда образовалась огромная промоина. Это видно на показаниях прибора MODIS спутника Terra с разрешением 250 м (см. рис. 2, *б*), полученных 26.03.2014, 02.04.2014, 09.04.2014 [11].

20 марта 2014 г. проведена георадарная съемка по профилю длиной 550 м через центры восьми кругов на поверхности Байкала, обнаруженных спектрометрической съемкой в ходе летней дельта-летной экспедиции 2013 г. с борта дельталета (рис. 3, *а*). Съемка произведена в пешеходном варианте двумя антенными блоками, АБ-1700 и АБ-400. Радарограмма с АБ-1700 (см. рис. 3, *б*) свидетельствует о стабильной толщине ледового покрова (0,64–0,7 м) на всем профиле, что согласуется с данными бурения льда при отборе проб воды и донного грунта в центрах кругов, отмеченных на радарограмме АБ-1700 вертикальными метками. Никаких особенностей, связанных с обнаружением восьми кругов, георадар не выявил.

Благодаря большой протяженности маршрута георадарного зондирования с борта катера на воздушной подушке выявлены места обитания байкальской нерпы. Радарограмма на участке профиля длиной 60 м отражает скопления «продухов» — отверстий во льду, создаваемых нерпой для поддержания своей жизнедеятельности (рис. 4, *а*). Более крупным планом показаны одиночные «продухи» (см. рис. 4, *б*).

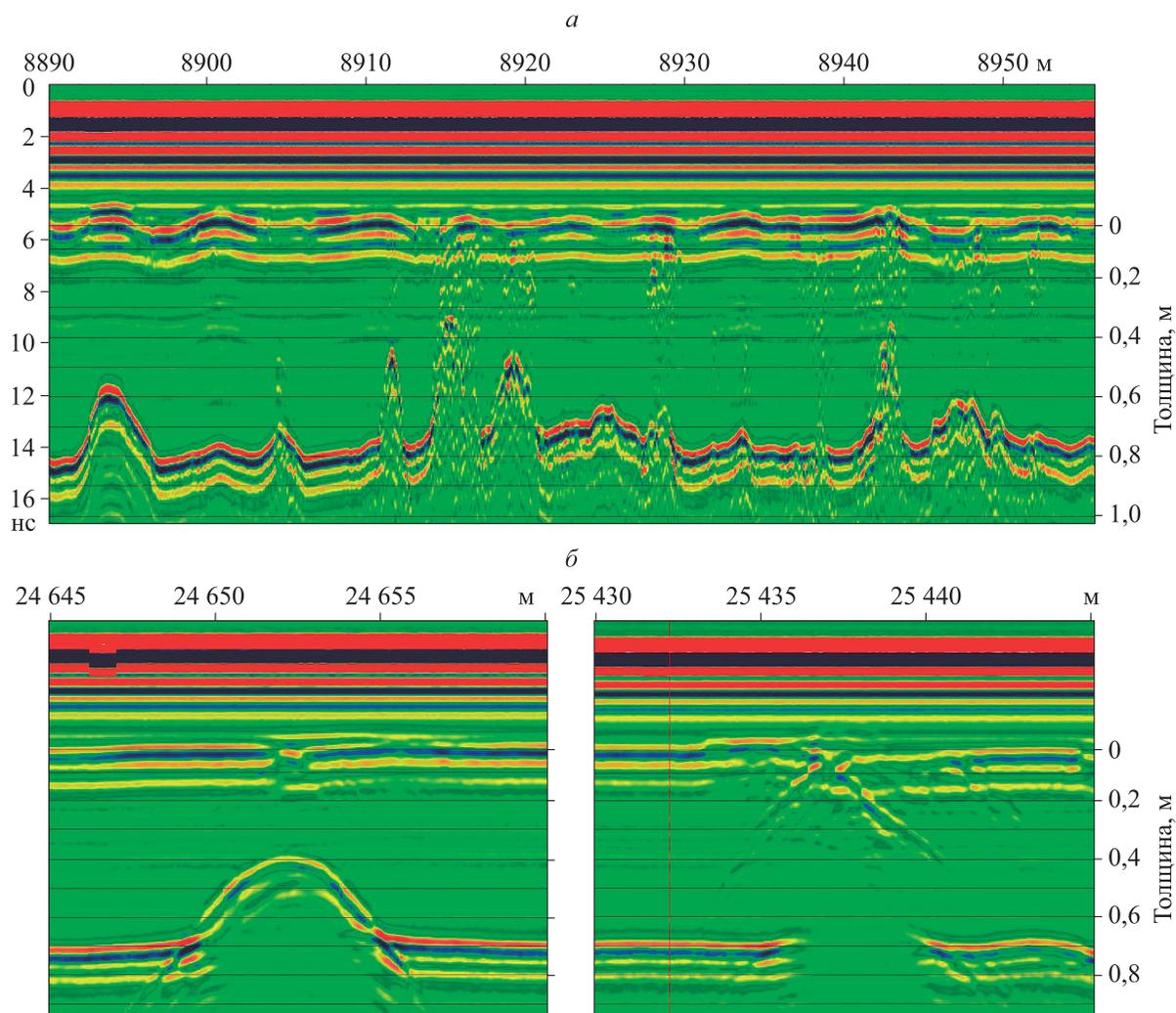


Рис. 4. «Продухи» байкальской нерпы на радарограммах георадара «ОКО-2».

а — скопление «продухов» на 60-метровом участке георадарного профиля; *б* — одиночные «продухи» более крупным планом.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОРОТКОИМПУЛЬСНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Одна из перспективных технологий радиолокации последних лет — технология сверхкороткоимпульсной радиолокации (СКИРЛ). Для получения банка реальных радиолокационных эхо-сигналов в рамках зимней экспедиции проведена серия экспериментов непосредственно на льду озера. В эксперименте использован наносекундный радар, разработанный Институтом сильноточной электроники СО РАН. Он предназначен для генерации, излучения и приема СВЧ-радиоимпульсов трехсантиметрового диапазона. В состав измерительного комплекса входят: передатчик, приемник, опорно-поворотное устройство, передающая и приемная антенны, осциллограф, ноутбук и аккумуляторный источник питания. Основные технические характеристики передатчика — несущая частота 9,95 ГГц, длительность импульса — 9 нс, частота повторения импульсов — 5 кГц, номинальная пиковая мощность импульсов — 30 Вт. Питание передатчика в полевых условиях осуществляется от батареи напряжением 24 В. Приемник выполнен по схеме гетеродинного усиления с устройством защиты от высокого уровня мощности. Основные технические характеристики приемника: центральная частота полосы усиления (9,95 ГГц), уровень собственных шумов (−110 дБ/Вт), полоса пропускания (не менее 100 МГц). Имеется ступенчатая регулировка усиления СВЧ-тракта через 10 дБ (0, 10, 20 и 30 дБ). Динамический диапазон с регулировкой усиления — 70 дБ. Антенная система включает передающую и приемную антенны и опорно-поворотное устройство, обеспечивающее вращение антенны по азимуту и углу места. Каждая антенна включает параболическое зеркало диаметром 640 мм и облучатель. Коэффициент усиления антенны составляет 33 дБ. Передающая и приемная антенны устанавливаются на отдельных кронштейнах с горизонтальной и вертикальной поляризацией излучаемой и принимаемой волн. Это позволяет проводить измерения с различной поляризацией, в том числе и при взаимно ортогональной поляризации этих волн.

Наносекундный радар размещали на крыше автомобиля на опорно-поворотном устройстве, позволяющем изменять угол облучения. Высота подъема фазового центра над поверхностью льда составила 2,5 м, т. е. в этой серии экспериментов облучение проводилось при малых углах скольжения. При других измерениях автомобиль с измерительной установкой размещался на возвышенной площадке на берегу, и центр антенной системы находился на высоте 8 м над ледовой поверхностью. Для калибровки радара использовались металлические мишени.

Эксперимент заключался в определении неоднородностей характеристик льда. Для этого были пробурены лунки диаметром 20 см через 3 м на одной линии по направлению диаграммы направленности антенны радара. Также на поверхности льда были нанесены шероховатости различного размера. Пример осциллограммы отраженных сигналов от искусственных неоднородностей представлен на рис. 5. Здесь по оси ординат отложен уровень сигнала, по оси абсцисс — задержка отраженного сигнала (в мкс). На рисунке в виде отрицательных пиков осциллограммы отложены значения сигнала

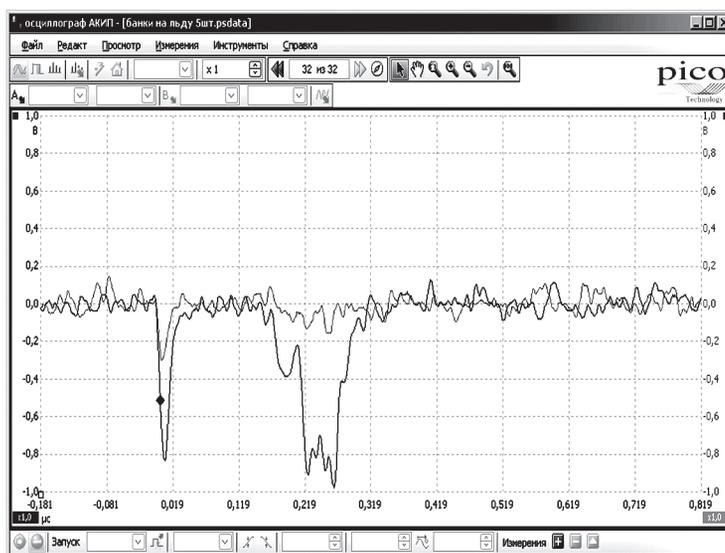


Рис. 5. Радарограмма сигнала, отраженного от искусственных неоднородностей.

лов, отраженных от искусственных неоднородностей — лунок. Первый пик отображает зондирующий импульс, затем на расстоянии 30 м, определяемом по времени задержки сигнала, следует сигнал относительно гладкой формы, отраженный от небольшой снежной насыпи, представляющей первую искусственную неоднородность. Сигналы, отраженные от лунок, представлены в виде нескольких более острых пиков, с большими значениями сигналов по величине, что определяет возможности радара для обнаружения трещин (до одного километра) на значительных расстояниях. Таким образом, данный эксперимент показывает возможность СКИРЛ для мониторинга ледовой обстановки.

Далее наносекундный радар был установлен на борту дельталета «Фрегат». Система крепления радара позволяла менять углы облучения в пределах от надира до 15° при облучении назад с фиксацией антенны в определенных положениях. В данном эксперименте измерения проводились при трех углах: 0, 10 и 15°. При одном фиксированном угле производится непрерывная запись. Осциллограмма в этом случае представляет собой сигналы, отраженные от ледовой поверхности с различными неровностями по всей протяженности трассы пролета. Затем осуществляется операция изменения угла с фиксацией антенны и проводятся аналогичные измерения. Все операции выполняются во время движения дельталета. При постобработке информации производится синхронизация времени, скорости и высоты. Из полученных данных значение принятого сигнала определяется по его пиковому уровню при наличии неоднородностей льда. Таким образом фиксируются различные неоднородности по трассе пролета с определением их местоположения. Анализ результатов подтверждает возможность определения состояния ледового покрова как при воздушной съемке, так и при наземных измерениях. Теоретическое обоснование при моделировании отражения от граничных сред предложено в работе [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая концепция комплексного мониторинга состояния ледового покрова (на примере оз. Байкал) ориентирована на интеграцию различных радиофизических и электрометрических методов диагностики исследуемых объектов [13–19]. Комплексный радиофизический эксперимент продемонстрировал новые возможности в исследовании особенностей ледового покрова оз. Байкал. Результаты пилотного применения георадара «ОКО-2» с борта быстроходного катера на воздушной подушке «Хивус» убедительно доказывают, что такая технология позволяет оперативно получать сведения о состоянии ледового покрова на путях передвижения по Байкалу и может применяться при исследовании мест обитания байкальской нерпы. Информация о ледовой обстановке необходима для выбора трасс автосимников, правильной эксплуатации инженерных сооружений (мостов, портовых причалов и др.). Определенные перспективы открываются при использовании небольших летательных аппаратов с микроволновой радиоаппаратурой для изучения ледовых структур озер, отражающих необычные гидрологические явления.

Работа выполнена в рамках госбюджетного проекта Института физического материаловедения СО РАН «Распространение радиоволн в неоднородных импедансных каналах».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сутырина Е. Н.** Картографирование ледовой обстановки на оз. Байкал по данным дистанционного зондирования // *Международ. науч.-исслед. журн.* — 2013 — № 2 (9). — С. 109–112.
2. **Волков С. Ю.** По Байкалу — М.: АСТ, 2010. — 568 с.
3. **Верболов В. И., Сокольников В. М., Шимараев М. Н.** Гидрометеорологический режим и тепловой баланс оз. Байкал. — М.; Л.: Наука, 1965. — 373 с.
4. **Вопросы** подповерхностной радиолокации / Под ред. А. Ю. Гринёва. — М.: Радиотехника, 2005. — 416 с. (Сер. Радиолокация).
5. **Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar** / Eds. A. Benedetto, L. Pajewski. Springer transactions in civil and environmental engineering. — Springer, 2015. — 371 p.
6. **Ground Penetrating Radar. 2nd Edition** / Ed. D. J. Daniels. The Institution of Electrical Engineers. — London, 2004. — 734 p.
7. **Ground Penetrating Radar: Theory and Applications** / Ed. H. M. Jol. — Oxford: Elsevier Science, 2009. — 508 p.
8. **Башкуев Ю. Б.** Электрические свойства природных слоистых сред. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1996. — 207 с.

9. **Радиотехнический** прибор подповерхностного зондирования (георадар) «ОКО-2». Техническое описание. Инструкция по эксплуатации. — М.: ООО «Логические системы», 2006. — 101 с.
10. **GeoScan32**: Иллюстрированное руководство пользователя. — Раменское: ЛОГИС, 2013. — 132 с.
11. [Электронный ресурс]. — http://geol.irk.ru/dzz/bpt/ice/bpt_ksm.htm (дата обращения 7.05.2014).
12. **Ломухин Ю. Л., Бутуханов В. П., Агутов Е. Б.** Моделирование радиолокационного отражения и радиоизлучения граничащих земных сред методом вынужденных встречных волн // *Электромагнитные волны и электронные системы*. — 2014. — Т. 19, № 12. — С. 33–39.
13. **Сейсмоионосферные** и сейсмoeлектромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне / Отв. ред. Г. А. Жеребцов. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. — 304 с. (Интеграционные проекты СО РАН; вып. 35).
14. **Башкуев Ю. Б., Адвокатов В. Р., Хаптанов В. Б., Буянова Д. Г., Ангархаева Л. Х.** Электромагнитные характеристики акватории оз. Байкал // *Геология и геофизика*. — 1993. — № 9. — С. 118–126.
15. **Bashkuev Yu. B., Khatpanov V. B., Dembelov M. G., Angarkhaeva L. Kh., Boleev V. P., Hayakawa M.** Radioprobng of underground structure of the Failure Gulf, formed as a result of the M7.5 Tsagan earthquake // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. — 2006. — Vol. 31, Issues 4–9. — P. 210–214.
16. **Башкуев Ю. Б., Хаптанов В. Б., Дембелов М. Г., Адвокатов В. Р., Ангархаева Л. Х.** Радиоимпедансный и георадарный контроль акваторий // *Материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь»*. — Воронеж, 2009. — С. 1439–1449.
17. **Башкуев Ю. Б., Хаптанов В. Б., Дембелов М. Г., Буянова Д. Г., Ангархаева Л. Х.** Результаты электрометрических исследований водной среды р. Селенга, ее притоков и акватории оз. Байкал // *Вестн. Сиб. аэрокосм. ун-та*. — 2013. — Вып. 5 (51). — С. 146–149.
18. **Хаптанов В. Б., Башкуев Ю. Б., Буянова Д. Г.** Результаты радиоимпедансного и георадарного зондирований прибрежной зоны среднего Байкала // *Вестн. Сиб. аэрокосм. ун-та*. — 2013. — Вып. 5 (51). — С. 149–152.
19. **Балханов В. К., Башкуев Ю. Б., Ангархаева Л. Х., Адвокатов В. Р., Дембелов М. Г., Хаптанов В. Б.** Восстановление двуслойного геоэлектрического разреза для прибрежной зоны озера Байкал // *Журн. техн. физики*. — 2014. — Т. 84, № 11. — С. 101–105.

Поступила в редакцию 25 мая 2017 г.