

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 550.837.76

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-4(125-134)

П.А. РЯЗАНЦЕВ*, **П.А. ИГНАШОВ****

*Отдел комплексных научных исследований Карельского научного центра РАН,
185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, Россия, chthonian@yandex.ru

**Институт биологии Карельского научного центра РАН,
185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, Россия, paul.ignashov@gmail.com

ГЕОРАДИОЛОКАЦИЯ БОЛОТНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ЗАОНЕЖСКОГО ПОЛУОСТРОВА, КАРЕЛИЯ)

Обсуждаются возможности георадиолокации при изучении болотных массивов. Показаны основы данного метода, дана историческая справка его использования, приведен краткий обзор решаемых задач в болотоведении. Детально проанализировано влияние основных параметров торфа, таких как плотность, влажность, зольность, степень разложения, на скорость прохождения электромагнитной волны и образование отражающих границ. На основе литературных источников обобщены электрофизические показатели для залежей торфа разных видов и выявлены существенные различия. В качестве доказательства эффективности георадиолокации приводятся результаты экспериментальных работ, выполненных на болотных системах Заонежского полуострова (Центральная Карелия). На примере Толвуйского болота демонстрируется опыт изучения структуры залежи и определения положения ее внутренних границ. По радарограммам установлено трехслойное строение залежи, включающее торф, сапрпель и ленточные глины, что характерно для болот исследуемого региона. Каждый выделенный слой характеризуется специфическим георадарным комплексом, позволяющим однозначно его идентифицировать на радарограмме. Кроме того, выделены промежуточные разности, которые обусловлены изменениями влажности и степени разложения. Полученные данные о глубине залегания слоев сопоставлены с биостратиграфическими колонками. Точность определения границ составила порядка $\pm 0,2$ м, что сравнимо с разрешающей способностью используемой антенны с частотой 150 МГц. Радарограммы Толвуйского болота сопоставлены с георадарными профилями Карасозерского, Ганьковского и Падмозерского болот, на основе чего установлено сходство в их строении. Это подтвердило теорию о схожем происхождении исследуемых болот, обусловленном трансгрессией Онежского озера. Некоторые выявленные различия свидетельствуют о локальных изменениях условий роста болотных массивов.

Ключевые слова: геофизическая проницаемость, торф, сапрпель, радарограмма, картирование, диэлектрическая проницаемость, Заонежский полуостров.

P.A. RYAZANTSEV*, **P.A. IGNASHOV****

*Department of Multidisciplinary Scientific Research, Karelian Scientific Center,
Russian Academy of Sciences, 185910, Petrozavodsk, ul. Pushkinskaya, 11, Russia, chthonian@yandex.ru

**Institute of Biology, Karelian Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
185910, Petrozavodsk, ul. Pushkinskaya, 11, Russia, paul.ignashov@gmail.com

GROUND PENETRATING RADAR MEASUREMENTS OF BOG DEPOSITS (A CASE STUDY OF THE ZAONEZHSKII PENINSULA, KARELIA)

The capabilities of Ground Penetrating Radar (GPR) in the study of bog massifs are discussed. The foundations of this method, a historical summary of its use, and a brief overview of problems dealt with in peatland study are provided. A detailed analysis is made of the influence of main peat parameters, such as density, moisture content, ash content, and the degree of

decomposition, on the electromagnetic wave transmission rate, and on the formation of reflection boundaries. Literature sources were used to generalize electrophysical properties for peat deposits of different types. Data obtained show a presence of substantial differences. The performance of GPR is demonstrated by results of our experimental studies on bog systems of the Zaonezhskii Peninsula (Central Karelia). Using the Tolvuiskoe bog as an example, experience in studying the structure of the deposit and determining its boundaries is outlined. Radargrams were used to determine the three-layer structure, including peat, sapropel and varve clays, which is characteristic for the bogs in the study area. Each of the layers identified is characterized by a specific GPR complex, providing a means of uniquely identifying it on the radiogram. In addition, intermediate differences were determined, which are due to changes in moisture content and in the degree of decomposition. Data obtained for the depth of the layers were compared with biostratigraphic sections. The accuracy of determining the boundaries was of the order of ± 0.2 m, which is comparable with the resolution of the 150 MHz GPR antenna used. Radargrams for the Tolvuiskoe bog were compared with GPR profiles for the Karasozerskoe, Gan'kovskoe and Padmozerskoe bogs to reveal a similarity in their structure. This confirmed the theory of their identical origin caused by the transgression of Lake Onega. Furthermore, some differences were noted, indicating local changes in the growth conditions of the bog massifs.

Keywords: geophysical penetrability, peat, sapropel, GPR profile, mapping, dielectric permittivity, Zaonezhskii Peninsula.

ВВЕДЕНИЕ

С точки зрения экологии и рационального природопользования Республика Карелия представляет собой перспективный регион для изучения болотных систем, которые занимают 30 % ее территории [1]. Данные объекты характеризуются сложным строением и наличием сложных механизмов внутреннего взаимодействия [2]. Кроме того, примечателен и биогенный материал залежей. Традиционно, структуру и объем болотных отложений оценивают путем бурения скважин. Необходимая точность определения границ обеспечивается большим числом точек наблюдений, что достаточно трудоемко.

Перспективным для изучения строения болотных отложений является георадиолокация. Этот метод основан на регистрации изменений электромагнитного импульса в зависимости от свойств среды, через которую он проходит [3], и может выступать в качестве вспомогательного инструмента при изучении и картировании болотных массивов.

Несмотря на обилие публикаций, показывающих успешное применение георадиолокации для выделения мощности торфа [4, 5], общая методология исследования морфологии торфяной залежи [6, 7] и гидрогеологического режима [8, 9] болотных систем на основе георадарных наблюдений не разработана. Также не решена задача по определению георадарных критериев для разных видов торфа.

Теоретические основы метода георадиолокации подробно изложены в ряде обобщающих работ [3, 10]. Полевые наблюдения осуществляются георадаром, принцип действия которого заключается в излучении и последующей регистрации наносекундного электромагнитного импульса на частотах от 25 до 2000 МГц. Выбор частоты определяет разрешающую способность георадара и зависит от задач исследований. Импульс, генерируемый передающей антенной георадара, отражается на границах геологической среды, различных по электрофизическим свойствам, которые можно считать рефлекторами. Запись, регистрируемая приемной антенной, показывает зависимость амплитуды отраженного сигнала от времени его прихода и называется георадарной трассой. Совокупность трасс, полученных при перемещении георадара, составляет радарограмму.

Для пересчета временного разреза в глубинный и определения геологических границ необходимо знать скорость распространения электромагнитной волны в среде (V) или диэлектрическую проницаемость (ϵ). Существует несколько способов определения V и ϵ : использование достаточно общих табличных данных, расчеты с учетом скважинных данных или на основе анализа гиперболической дифрагированной волны. Кроме V и ϵ , важные электрофизические параметры среды — это коэффициент затухания, определяющий глубину проникновения сигнала, и коэффициент отражения, который характеризует контрастность границ.

Впервые метод георадиолокации (радиолокационных зондирований) использовался для изучения болотных массивов более 35 лет назад, в том числе и в нашей стране [11, 12]. Он позволяет уверенно определять глубину залегания минерального основания залежи, а в отдельных случаях выделять промежуточные слои, обусловленные неоднородностями торфа.

В дальнейшем значительный вклад в развитие георадиолокации на болотах внесли канадские [13–15] и финские [16] ученые, которые исследовали влияние пористости, влажности и проводимости торфа, содержания органического вещества на распространение электромагнитного сигнала. Благодаря совершенствованию аппаратной и программной составляющих метода георадары стали более активно использоваться при решении задач стратиграфии и гидрогеологии болотных систем [17]. Георадарную съемку активно применяют в комплексе с другими методами электроразведки, такими как электромография на постоянном токе [18]. Сегодня для георадиолокации актуальны задачи

оценки газовой составляющей торфа в естественном залегании [19], изучения строения и эволюции болотной экосистемы [20]. В России применение георадара при исследованиях болотных залежей носит эпизодический характер, а результаты представлены лишь в отдельных работах [21].

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Заонежский полуостров расположен на северо-западе Онежского озера в подзоне средней тайги. Заболоченность территории составляет около 15 %, на которых расположено около 650 неосушенных болот общей площадью 15 тыс. га. Наиболее распространены небольшие болота (до 10 га), однако имеются и несколько крупных (более 200 га). Болотные массивы представлены как низинными (эвтрофными), так и верховыми (олиготрофными) [22].

Основным объектом исследований было болото, расположенное в северной части полуострова, в 3 км на запад от пос. Толвуй Медвежьегорского района (рис. 1). Толвуйское болото площадью 3,5 га занимает вытянутую с северо-запада на юго-восток депрессию, заполненную озерными и торфяными отложениями, так как образовалось в результате зарастания водоема. В растительном покрове болота отмечено 50 видов сосудистых растений (26 семейств) и 22 вида мхов (из них 9 сфагновых).

Центральную часть болота занимает мезоолиготрофное осоково-сфагновое сообщество. Северо-западная оконечность в результате дефицита водно-минерального питания занята омбротрофным сосново-кустарничково-сфагновым сообществом. Вдоль западной и южной оконечностей расположено эвтрофное березово-травяно-гипновое сообщество. С крутого минерального берега на этот участок болота попадают делювиальные воды с высоким содержанием элементов минерального питания. Вдоль пологого восточного края размещается олиготрофное березово-кустарничково-сфагновое сообщество. В юго-западной части болота находится эвтрофное древесно-моховое сообщество, приуроченное к выходу напорных грунтовых вод.

Дополнительно исследования были выполнены еще на нескольких болотных системах Заонежского полуострова: Карасозерской, Ганьковской и Падмозерской (см. рис. 1).

Исследования методом георадиолокации осуществлялись при помощи георадара ОКО-2 (Логис-Геотех, Россия) с антенным блоком 150М, центральная частота которого составляет 150 МГц. Для такой частоты длина электромагнитной волны в среде с $\epsilon = 57-80$ равна 0,40–0,34 м, это обеспечивает вертикальную разрешающую способность 0,2 м. Шаг сканирования по профилю составлял 0,1 м, пройденное расстояние определялось датчиком перемещения. Регистрация сигнала осуществлялась на временной развертке 400 нс с 12-типовторным накоплением сигнала, так как полезный сигнал содержался на временах до 350 нс. Георадиолокационные наблюдения фиксировались GPS-приемником и дополнялись контрольными скважинами ручного бурения на глубину не менее 9 м.

В программе GeoScan32 радарограммы обрабатывались с использованием процедур вычитания среднего, коррекции яркости и усиления и т. д. Далее выполнялся анализ радарограммы, пикировались отдельные комплексы и им присваивались значения ϵ . Сопоставляя георадарные комплексы со слоями залежи и прослеживая их по набору радарограмм, определялось положение структурных элементов болотной системы, их пространственное распространение и мощность.



Рис. 1. Схема расположения исследованных болот Заонежского полуострова.

Болота: 1 — Толвуйское, 2 — Падмозерское, 3 — Ганьковское, 4 — Карасозерское.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОРФА

С точки зрения георадиолокации торф, слагающий болотную залежь, представляет собой многокомпонентную гетерогенную систему, которая включает воду, органическое вещество, газовую составляющую и минеральные включения. Соотношение компонентов создает усредненные электрофизические параметры всей исследуемой толщи с широким диапазоном вариаций [23]. Рассмотрим подробнее наиболее важные параметры торфа с точки зрения георадиолокации.

Тип торфа. Влияние типа торфа на распространение электромагнитной волны доказано в исследованиях многих авторов. Лабораторными экспериментами М.Ю. Зимина установлено, что верховой тип торфа существенно отличается от переходного и низинного типов по степени затухания сигнала [24]. Влияние типа торфа на электромагнитный сигнал при прочих равных условиях, скорее всего, связано с количественным содержанием органики. Выявлена линейная зависимость между содержанием органического вещества и величиной ϵ [25].

Известны убедительные примеры, демонстрирующие различие между сфагновым и осоковым торфами, что выражается в образовании интенсивного рефлектора на границе раздела и изменением характера волнового поля [16]. Автор объяснял этот факт различием влажности и степени разложения между торфами. Есть пример определения границы отложений осокового и древесно-осокового торфа: несмотря на близкий ботанический состав, различие в степени разложения и присутствие древесных остатков (до 20 %), для каждого типа формируются характерные георадарные комплексы [26].

Плотность и влажность торфа. Данные параметры нужно рассматривать совместно, так как они имеют обратную взаимосвязь [27]. Это обусловлено изменением пористости торфа при уплотнении и, как следствие, его водопроницаемости. Доказано, что увеличение влажности приводит к возрастанию диэлектрической проницаемости торфа [27, 28]. Линейные зависимости между плотностью и ϵ , влажностью и ϵ получены как при лабораторных, так и при натуральных измерениях по скважинам [29].

При попытке обобщить имеющиеся литературные данные и вывести единую зависимость между ϵ и плотностью получен результат с коэффициентом корреляции, равным 0,39, а $R^2 = 0,03$ [4]. По мнению авторов публикации, полученные результаты отражают общий тренд, а низкая сходимость объясняется внутренними неоднородностями торфа и возможным содержанием газов. Наряду с этим экспериментально установлено, что плотность торфа начинает играть особую роль при содержании влаги менее 70 % [28].

При исследовании эвтрофной болотной системы установлено, что за счет появления новых рефлекторов на радарограмме фиксируется изменение влажности в центральной части залежи, а дальнейшее детальное сопоставление всех физических параметров торфа выявило увеличение его влажности в зависимости от изменения степени разложения и плотности [14]. При изучении олиготрофного болота на радарограмме обнаружены локальные рефлекторы, которые на основе материала скважин соотнесены с областями пониженной плотности и повышенного содержания воды в толще торфа [30].

Зольность и степень разложения. Эти два параметра можно объединить в одну группу, так как они характеризуются схожими георадарными атрибутами, а именно образованием отражающих границ в толще торфа. Под зольностью понимается содержание твердых минеральных частиц, и данный параметр — один из определяющих тип торфа. Лабораторными исследованиями установлено, что наибольшей корреляционной связью (0,89) между электрофизическими свойствами и зольностью обладают низинные типы торфа [24]. А на практике показано, как резкое увеличение зольности в локальном слое приводит к формированию рефлектора, и подобные вариации зольности интерпретируются как следствие климатических изменений [6].

Разложение торфа (гумификация) происходит за счет деятельности бактерий, при этом наблюдается разложение целлюлозы и образование битумов. Эти процессы протекают неоднородно, в зависимости от внешних условий и типа торфа [23]. В результате на радарограммах формируются локальные границы, соответствующие зонам контрастного изменения степени разложения. Примеры выявления подобных границ демонстрируются в ряде публикаций, где отмечается, что возникновение рефлекторов — это следствие не только вариаций степени разложения, но и комплексного влияния сопутствующих процессов изменения физических параметров торфа [31].

Обобщение литературных данных позволило получить сведения (табл. 1), демонстрирующие вариации электрофизических параметров для разных болотных систем и видов (типов) торфа. Анализ данных позволяет заключить, что природная специфика болот отражается в изменчивости значений V и ϵ , однако общие законы, по которым происходят эти изменения, не установлены.

Таблица 1

Сопоставление электрофизических параметров разных болотных систем

Болотная система	Тип торфяной залежи	Электрофизические параметры			
		ε	V_{cp} , см/нс	σ_{cp} , мкС/см	W_{cp} , %
Полуострова Ньюфаундленд, Канада [13]	Верховой, осоково-сфагновый торф	69	3,61	54	92
Кейп Рейс, Ньюфаундленд, Канада [30]	Верховой, сфагновый торф	56	4,00	115	80
Центр системы Карибу, штат Мейн, США [7]	То же	71	3,55	90	—
Диана-Лейк, Британская Колумбия, США [9]	»	60	3,80	—	90
Кисдон Мур, Ланкашир, Великобритания [5]	Верховой, пушицевый торф	69	3,60	—	—
Северо-Восточной Германии [18]	Переходный, осоковый торф	74	3,50	380	80
	Переходный, осоково-тростниковый торф	69	3,60	100	95
Высокий Фенн, Бельгия [6]	Переходный, тростниковый торф	68	3,64	150	85
Коивоса, Финляндия [16]	Переходный, осоковый торф	65	3,70	—	91
Алекуеш, Висконсин, США [8]	Переходный, сфагновый торф	57	4,10	18	—
Юг системы Карибу, штат Мейн, США [17]	Низинный, древесный торф	61	3,85	58	85
Эллис, Онтарио, Канада [14]	Низинный, осоково-гипновый торф	58	3,94	150	90

Примечание. ε – диэлектрическая проницаемость (в у. е.); V_{cp} – средняя скорость распространения ЭМ волны в залежи торфа; σ_{cp} – средняя проводимость залежи; W_{cp} – средняя относительная влажность залежи. Прочерк – нет данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По итогам полевых работ на Толвуйском болоте получен набор радарограмм, отражающих структуру залежи и морфологию внутренних границ. В первом приближении болото имеет типичное для исследуемого района строение, включающее три последовательных слоя: торфа, сапропеля и ленточных глин. Такая конфигурация — следствие трансгрессивной деятельности Онежского озера, и она отражает этапы эволюции болотной системы. Исследования показали, что структурные слои болотной залежи однозначно определяются как по характерным георадарным комплексам, так и по протяженным осям синфазности разделяющих их границ.

Осредненные параметры выделенных слоев, полученные при обработке всех данных, приведены в табл. 2. Наличие контраста электрофизических свойств позволяет однозначно определить глубину залегания и морфологию каждого из них. Общая эффективная глубина исследования для Толвуйско-

Таблица 2

Обобщенные георадиолокационные характеристики структурных слоев, составляющих Толвуйскую болотную залежь

Слой	Параметры				
	Характерная волновая картина	ε_{cp}	V_{cp} , см/нс	$K_{отр}$	H , м
Торф (сплавина)	Протяженные и извилистые оси синфазности с высокими значениями амплитуд	65	3,7	-0,04	0,5–1
Обводненный торф	Прерывистые оси синфазности со средней длиной 2 м. Наличие областей интенсивного затухания, обусловленных линзами воды	75	3,4	0,02	1–2,5
Сапропель	Очень протяженные, ровные оси синфазности с высокими амплитудами, оси формируют пачки вследствие градиентного изменения степени разложения и процентом содержания глинистых частиц	70	3,5	0,14	2–4
Ленточные глины	Полное затухание полезного сигнала, регистрация аппаратных шумов.	40	4,7	Н/д*	Н/д*

* Н/д — нет данных. (Полное затухание сигнала в глинах не позволяет рассчитать коэффициент отражения и определить мощность слоя.)

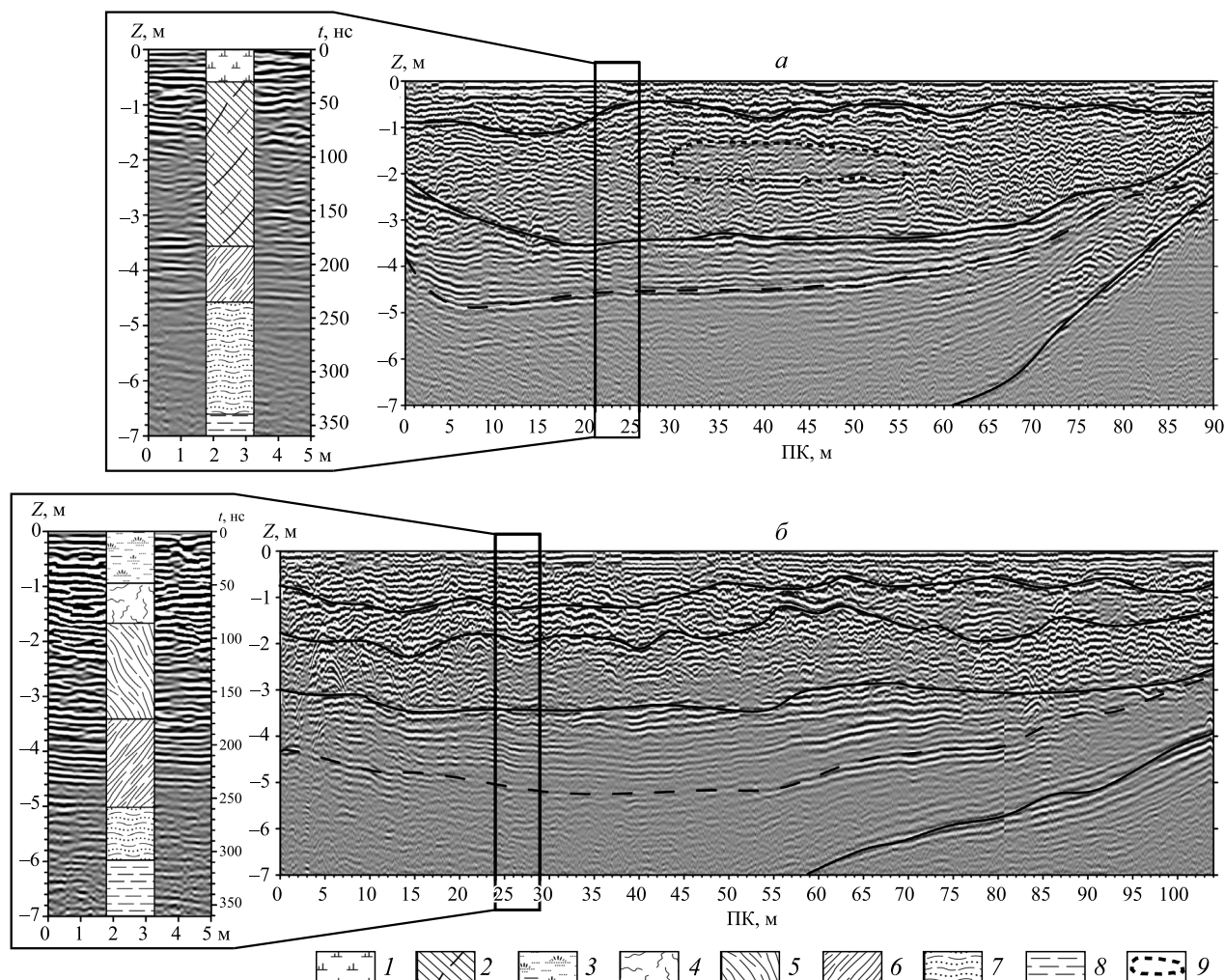


Рис. 2. Радарограммы Толуйского болота.

Радарограммы: *a* — профиля № 3, *б* — профиля № 6. Торф: 1 — сфагновый переходный, 2 — сильнообводненный сфагновый, 3 — сфагновый низинный, 4 — гипново-травяной, 5 — сапропелевидный, 6 — сапрпель, 7 — глинистый сапрпель, 8 — ленточные глины, 9 — линза воды.

го болота составила порядка 7 м. Интересен момент образования рефлекторов между слоями при небольших значениях коэффициента отражения. Возможно, это обусловлено изменением структуры органического вещества (от крупных волокон торфа к мелкодисперсной взвеси сапрпеля).

В качестве примера на рис. 2 показаны два профиля — профиль № 3, расположенный в центре болота (см. рис. 2, *a*), и профиль № 6, проходящий в южной части (см. рис. 2, *б*). Каждый из них сопровождается вставкой, демонстрирующей сопоставление радарограммы и колонки, полученной по результатам бурения.

Длина профиля № 3 составляет 90 м, а направление — с юго-запада на северо-восток (см. рис. 2, *a*). На всем протяжении профиля определяются четыре отдельных георадарных комплекса с характерными волновыми картинками. В верхней части прослеживается комплекс, обладающий протяженными извилистыми осями синфазности. Он соответствует сфагновому переходному торфу со степенью разложения 10 %. Мощность слоя на флангах болота составляет 1 м, а в центре сужается до 0,5 м. Далее выделяется комплекс, обладающий прерывистыми осями синфазности и промежутками затухания, сформированными за счет увеличения водонасыщенности. Отмечается, что ближе к краям болота области затухания исчезают, но появляются гиперболы дифракции. Это можно объяснить уменьшением количества воды, а также наличием крупных растительных остатков. Второй комплекс

также соотносится со сфагновым торфом, чрезвычайно насыщенным водой. Его мощность варьирует от 1 м на флангах до 3 м в центральной части. Ниже, в подстилающем слое, формируется комплекс, обладающий множеством отчетливых линейных и протяженных осей синфазности, которые образуют своеобразные пачки. Он соответствует отложениям сапропеля.

Сопоставив результаты георадиолокации со стратиграфической колонкой, можно заключить, что выраженная слоистость вызвана изменением степени разложения и вещественного состава сапропеля. В подтверждение этого по данным бурения выделены два отдельных слоя сапропеля со степенью разложения более 50 % и различным содержанием глинистых частиц. Заключительный комплекс характеризуется полным затуханием сигнала, что позволяет определить его как кровлю ленточных глин. По данным георадиолокации установлена изменчивость морфологии дна болота, оно более пологое на востоке и крутое на западе. Это обусловлено тем, что вдоль западной границы проходит линейно вытянутый вал, сложенный плотной мореной — Толвуйский оз.

Профиль № 6 (см. рис. 2, б) имеет длину 104 м и направление с юго-запада на северо-восток. На этой радарограмме установлено пять отдельных георадарных комплексов. Первый из них характеризуется протяженными извилистыми осями синфазности и соотносится со сплавной низинного терес-торфа со степенью разложения 5–10 % и средней мощностью 1 м. Следует отметить, что несмотря на

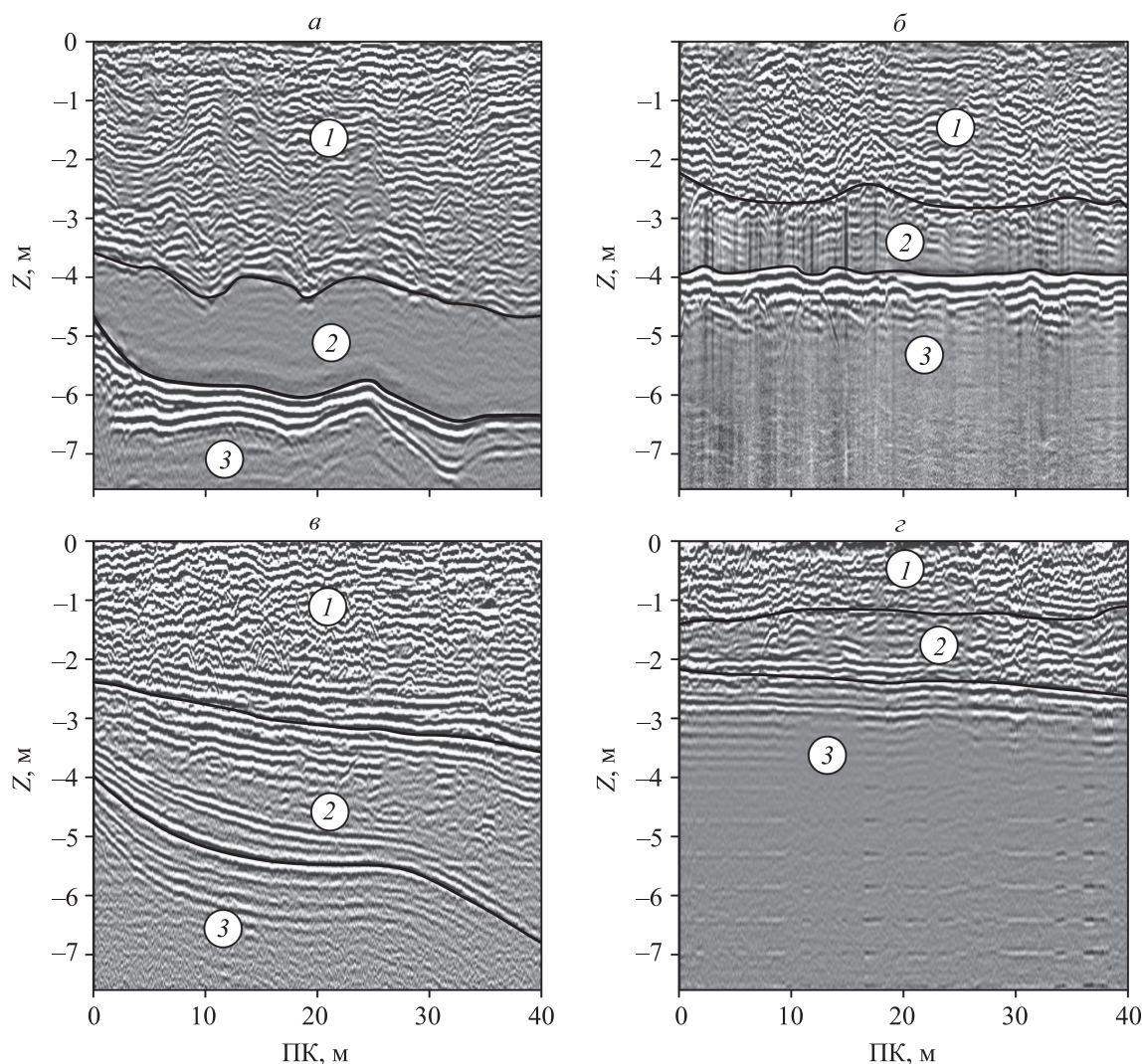


Рис. 3. Радарограммы болот Заонежского полуострова.

Болота: а — Карасозерское, б — Ганьковское, в — Толвуйское, г — Падмозерское. 1 — торфяные отложения; 2 — сапропель; 3 — ленточные глины.

изменение ботанического состава, по радарограммам различия между верхними слоями профилей № 3 и № 6 не выявлены. Второй комплекс во многом схож с предыдущим по форме осей синфазности, однако более ярко проявляется по амплитудам отраженного сигнала. Он интерпретируется как гипново-травяной торф со степенью разложения 25 %. Далее наблюдается комплекс, обладающий выраженными областями затухания, соотносящийся с обводненным слоем сапропелевидного торфа со степенью разложения 35 %. Нижележащий комплекс обладает протяженными линейными осями синфазности, что позволяет однозначно определить его как слой сапропеля со степенью разложения более 50 %. Далее следует затухание полезного сигнала, и это свидетельствует о наличии ленточных глин.

На основе общего сопоставления результатов георадарных наблюдений на болотных системах Заонежского полуострова установлено, что уверенно определяются границы: «торф–сапропель»; «сапропель–ленточные глины». Это свидетельствует о том, что при георадиолокации болотных залежей в первую очередь локализуются границы максимального изменения вещественного состава. Хорошо иллюстрируют этот факт данные рис. 3, где представлены фрагменты радарограмм с разных болотных систем Заонежья.

Первая радарограмма (см. рис. 3, а) получена на болоте севернее оз. Карасозеро. На ней четко выделяются три отдельных комплекса. Верхний комплекс характеризуется прерывистыми и изогнутыми осями синфазности и соотносится с неоднородной толщей торфа, средняя мощность которой равна 4 м. Далее регистрируется комплекс с отсутствием ярко выраженных осей синфазности, что свидетельствует о его внутренней однородности. Этот факт позволяет соотнести комплекс с толщей сапропеля мощностью 2 м. Последний комплекс определяется по образованию контрастной отражающей границы с последующим резким затуханием сигнала, что интерпретируется как ленточные глины, подстилающие болотную залежь на глубине порядка 6 м.

Вторая радарограмма (см. рис. 3, б) получена на мелиорированном болоте западнее оз. Ганьковское, в восточной части полуострова. Все георадарные признаки, выделенные ранее, верны и для этой залежи, изменяется только мощность слоев. Так, мощность торфа составляет 2,5 м, а сапропеля — 1,5 м. Третья радарограмма (см. рис. 3, в) показывает описанное выше Толвуйское болото. В общем виде она соответствует предыдущим, но выделяется наличием дополнительного комплекса на глубине 2–3 и 4–6 м, выраженного набором упорядоченных протяженных осей синфазности. Этот комплекс соотносится с переходными областями, в которых происходит градиентное изменение свойств болотных отложений. Четвертая радарограмма (см. рис. 3, г) получена на болоте южнее оз. Падмозеро, в центральной части полуострова. На ней сохраняется нормальное трехслойное строение залежи, общая мощность которой не превышает 3 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что существует ряд предпосылок, подтверждающих целесообразность использования в картировании болотных залежей методов георадиолокации. На основе литературных и экспериментальных данных установлено, что изменения влажности, зольности и степени разложения торфа находят свое отражение на радарограммах. Вариации состава торфа, как правило, сопровождаются изменением его физических свойств, поэтому можно исследовать подобные явления в естественном залегании. Отмечается возможность детального изучения болотного массива на основе радарограмм, а не только фиксации морфологии его минерального основания. На примере болотных систем Заонежского полуострова доказано, что метод георадиолокации позволяет проводить общее картирование и определение главных структурных единиц торфяной залежи, а также выполнять поиск их различных специфических особенностей, таких как области повышенного водонасыщения или изменчивости степени разложения. Наряду с показанными положительными результатами, не выявлены универсальные георадарные критерии для разных типов торфа в условиях разной трофности болот, количества воды, электропроводности, содержания газов и т. д. Вследствие этого, на данном этапе однозначно определить тип торфа в естественном залегании методом георадиолокации без привлечения опорных скважин не представляется возможным.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18–05–00256) и в рамках выполнения Государственного задания Карельского научного центра РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов О.Л. Флора и растительность болот Карелии // Болотные экосистемы севера Европы: разнообразие, динамика, углеродный баланс, ресурсы и охрана. — Петрозаводск: Изд-во Карел. науч. центра РАН, 2006. — С. 145–159.
2. Boreal Peatland Ecosystems / Eds. R.K. Wieder, D.H. Vitt. — Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2006. — Vol. 188. — 435 p.
3. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию: Учебное пособие. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. — 153 с.
4. Parsekian A.D., Slater L., Ntarlagiannis D., Nolan J., Sebesteyen S.D., Kolka R.K., Hanson P.J. Uncertainty in peat volume and soil carbon estimated using ground penetrating radar and probing // Soil Science Society of America Journ. — 2012. — Vol. 12. — P. 1911–1918.
5. Parry L.E., West L.J., Holden J., Chapman P.J. Evaluating approaches for estimating peat depth // Journ. of Geophysical Research: Biogeosciences. — 2014. — Vol. 119. — P. 567–576.
6. Wastiaux C., Halleux L., Schumacker R., Strel M., Jacquotte J.M. Development of the Hautes-Fagnes peat bogs (Belgium): new perspectives using ground-penetrating radar // SUO. — 2000. — Vol. 51. — P. 115–120.
7. Comas X., Slater L., Reeve A. Geophysical evidence for peat basin morphology and stratigraphic controls on vegetation observed in a northern peatland // Journ. of Hydrology. — 2004. — Vol. 295. — P. 173–184.
8. Lowry C.S., Fratta D., Anderson M.P. Ground penetrating radar and spring formation in a groundwater dominated peat wetland // Journ. of Hydrology. — 2009. — Vol. 373. — P. 68–79.
9. Emili L.A., Price J.S., Fitzgerald D.F. Hydrogeological influences on forest community type along forest-peatland complexes, coastal British Columbia // Canadian Journ. of Forest Research. — 2006. — Vol. 36. — P. 2024–2037.
10. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications / Ed. H.M. Jol. — Amsterdam: Elsevier, 2009. — 508 p.
11. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Власов О.В., Стрекалкин Е.А., Богатырев Е.Ф. Радиолокационное подповерхностное зондирование торфяного грунта // Докл. АН СССР. — 1979. — Т. 247, № 4. — С. 832–834.
12. Богородский В.В., Трепов Г.В. Радиолокационные измерения толщины залежей торфа и сапропеля // Журн. техн. физики. — 1979. — Т. 49, вып. 3. — С. 670–672.
13. Worsfold R.D., Parashar S.K., Perrott T. Depth profiling of peat deposits with impulse radar // Canadian Geotechnical Journ. — 1986. — Vol. 23. — P. 142–154.
14. Warner B.G., Nobes D.C., Theimer B.D. An application of ground penetrating radar to peat stratigraphy of Ellice Swamp, southwestern Ontario // Canadian Journ. of Earth Sciences. — 1990. — Vol. 27. — P. 932–938.
15. Jol H.M., Smith D.G. Ground penetrating radar surveys of peatlands for oilfield pipelines in Canada // Journ. of Applied Geophysics. — 1995. — Vol. 34. — P. 109–123.
16. Hänninen P. Application of ground penetrating radar and radio wave moisture probe techniques to peatland investigations // Geological Survey of Finland, Bulletin. — 1992. — Vol. 361. — P. 1–71.
17. Slater L.D., Reeve A. Investigating peatland stratigraphy and hydrogeology using integrated electrical geophysics // Geophysics. — 2002. — Vol. 67. — P. 365–378.
18. Walter J., Hamann G., Lück E., Klingenfuss C., Zeitz J. Stratigraphy and soil properties of fens: Geophysical case studies from northeastern Germany // Catena. — 2016. — Vol. 142. — P. 112–125.
19. Comas X., Slater L., Reeve A. Seasonal geophysical monitoring of biogenic gases in a northern peatland: implications for temporal and spatial variability in free phase gas production rates // Journ. of Geophysical Research: Biogeosciences. — 2008. — Vol. 113. — P. 1–12.
20. Loisel J., Yu Z., Parsekian A., Nolan J., Slater L. Quantifying landscape morphology influence on peatland lateral expansion using ground-penetrating radar (GPR) and peat core analysis // Journ. of Geophysical Research: Biogeosciences. — 2013. — Vol. 118. — P. 373–384.
21. Бричёва С.С., Матасов В.М., Шилов П.М. Георадар в геоэкологических исследованиях при искусственном обводнении торфяников // Геоэкология. Инженерная геология. Гидроэкология. Геокриология. — 2017. — № 2. — С. 84–92.
22. Kuznetsov O.L., Tokarev P.N., Kutenkov S.A., Antipin V.K., Lindholm T. Mires of the Zaonezhye Peninsula // Biogeography, landscapes, ecosystems and species of Zaonezhye Peninsula, in Lake Onega, Russian Karelia: Reports of the Finish Environment Institute. — 2014. — Vol. 40. — P. 131–146.
23. Лиштван И.И., Базин Е.Т., Гамаюнов Н.И., Тереньгев А.А. Физика и химия торфа. — М.: Недра, 1989. — 304 с.
24. Зимин Ю.В. Радиолокационный метод исследований отложений торфа и сапропеля: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. — 18 с.
25. Dam R.I. van, Berg E.H. van den, Heteren S. van, Kasse C., Kenter J., Groen K. Influence of organic matter in soils on radar-wave reflection: sedimentological implications // Journ. of Sedimentary Research. — 2002. — Vol. 72. — P. 341–352.
26. Kowalczyk S., Lukasiak D., Zukowska K. Ground penetrating radar survey in the central and eastern part of the Calowanie Fen, Central Poland // Proc. of 15th Int. Conf. on GPR (June 30 – July 4). — Brussels: IEEE, 2014. — P. 1011–1016.
27. Paivinen J. Hydraulic conductivity and water retention in peat soils // Acta Forestalia Fennica. — 1973. — Vol. 129. — 170 p.

28. **Oleszczuk R., Brandyk T., Gnatowski T., Szatyłowicz J.** Calibration of TDR for moisture determination in peat deposits // International Agrophysics. — 2004. — Vol. 18. — P. 145–151.
29. **Tolonen K., Tiuri M., Toikka M., Saarilahti M.** Radiowave probe in assessing the yield of peat and energy in peat deposits in Finland // SUO. — 1982. — Vol. 4–5. — P. 105–112.
30. **Lapen D.R., Moorman B.J., Price J.S.** Using ground-penetrating radar to delineate subsurface features along a wetland catena // Soil Science Society of America Journ. — 1996. — Vol. 60. — P. 923–931.
31. **Kettridge N., Binley A., Comas X., Cassidy N., Baird A.J., Harris A., Kruk J. van der, Strack M., Milner A.M., Waddington J.M.** Do peatland microforms move through time? Examining the developmental history of a patterned peatland using ground-penetrating radar // Journ. of Geophysical Research: Biogeosciences. — 2012. — Vol. 117. — P. 1–11.

Поступила в редакцию 31.01.2017

После доработки 16.11.2017

Принята к публикации 02.04.2019