

## ВЫСОКОЧАСТОТНОЕ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПОЧВОГРУНТОВ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ БУГРИСТЫХ БОЛОТ (ЕВРОПЕЙСКИЙ СЕВЕРО-ВОСТОК РОССИИ)

Д.А. Каверин<sup>1</sup>, А.В. Хилько<sup>2</sup>, А.В. Пастухов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, 167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28, Россия

<sup>2</sup>ОАО “Фундаментпроект”, 125080, Москва, Волоколамское ш., 1/1, Россия; [dkav@mail.ru](mailto:dkav@mail.ru)

Оценены технические возможности высокочастотного георадиолокационного зондирования при исследовании почвогрунтов многолетнемерзлых бугристых болот. Для оценки технических возможностей высокочастотных антенн выявлены особенности топографии кровли многолетнемерзлых пород и границ литологических контактов на ненарушенных (торфяные бугры, мочажины) и антропогенно-нарушенных (полоса отепляющего влияния дороги с цементно-бетонным покрытием) участках бугристых болот. В условиях значительных вариаций глубины залегания многолетнемерзлых и минеральных горизонтов в верхней десятиметровой толще почвогрунтов были одновременно использованы поверхностные экранированные антенны частотой 300 и 900 МГц. Оценена применимость воздушных экранированных антенн частотой 1000 и 2000 МГц для исследования почвогрунтов бугристых болот.

*Высокочастотное георадиолокационное зондирование, многолетнемерзлые породы, бугристые болота, дорога*

## APPLICATION OF HIGH-FREQUENCY GROUND PENETRATING RADAR TO INVESTIGATIONS OF PERMAFROST-AFFECTED SOILS OF PEAT PLATEAUS (EUROPEAN NORTHEAST OF RUSSIA)

D.A. Kaverin<sup>1</sup>, A.V. Khilko<sup>2</sup>, A.V. Pastukhov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Biology, Komi Science Centre, 28, Kommunisticheskaya str., Syktyvkar, 167982, Russia

<sup>2</sup>Fundamentproject, 1/1, Volokolamskoe sh., Moscow, 125080, Russia; [dkav@mail.ru](mailto:dkav@mail.ru)

Applications of high-frequency GPR to investigating permafrost-affected soils of peat plateaus have been analyzed. To assess the technical capabilities of high-frequency antennas, the depth of both permafrost table and lithological contacts at virgin (peat mounds and fens) and anthropogenically transformed (zone of defrosting influence of the cement-concrete road) sites of peat plateaus have been determined. Both surface shielded antennas (300 and 900 MHz) have been used simultaneously in the conditions of considerable variations of the depth of permafrost table and mineral horizon's bedding in the upper 10-meter soil strata. Application of aerial shielded antennas (1000 and 2000 MHz) to determine the depth of permafrost table has been additionally assessed.

*High frequency ground penetrating radar, permafrost, peat plateaus, road*

### ВВЕДЕНИЕ

Георадиолокационные исследования почвогрунтов активно применяются в различных областях науки и инженерных изысканий [Пягай и др., 2009]. Достаточно широко георадиолокация используется при исследовании особенностей распространения многолетнемерзлых пород (ММП) в криолитозоне [Нерадовский, 2014; Трегубов и др., 2017]. Методы определения глубины залегания кровли ММП основаны на контрастности электромагнитных свойств талых и мерзлых горизонтов [Фролов, 1998; Moorman et al., 2003]. Георадиолокационное зондирование прежде всего применяется для определения глубины залегания кровли ММП [Wu et al., 2009; Gusmeroli et al., 2015].

Исследование вариаций глубины залегания кровли ММП наряду с опорным бурением проводится с помощью как низкочастотных (100–200 МГц) [Cao et al., 2017], так и высокочастотных

(300–400 МГц) антенн [Бричева, Крылов, 2014]. Использование высокочастотных антенн при георадиолокационном зондировании позволяет анализировать специфику строения верхнего горизонта ММП с учетом происходящих криогенных явлений и процессов (морозобойное пучение, полигональное растрескивание, формирование ледяных жил и др.).

Геофизические методы исследований применяются при изучении почвенно-мерзлотных комплексов [Wollschläger et al., 2010; Abakumov, Tomashunas, 2016]. Эти методы позволили определять глубину залегания кровли ММП и органоминеральных контактов в почвах. Георадиолокационные исследования мерзлотных почв могут быть актуальны при изучении переходного слоя [Shur et al., 2005] и особенностей микрорельефа кровли ММП [Луначев и др., 2016]. Тем не менее исполь-

зование геофизических методов, в частности георадиолокационного зондирования, для изучения мерзлотных почв в настоящее время остается ограниченным. Открытым остается вопрос об использовании оптимального высокочастотного диапазона в условиях значительных вариаций глубин залегания кровли ММП.

Цель настоящей работы – определение технических возможностей метода высокочастотного георадиолокационного зондирования почвогрунтов на ненарушенных и антропогенно-нарушенных участках (полоса влияния дороги с цементно-бетонным покрытием) многолетнемерзлых бугристых болот. В рамках исследований выявлены особенности топографии кровли многолетнемерзлых пород и границ литологических контактов в условиях значительных вариаций глубин их залегания.

### ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Георадиолокационное зондирование почвогрунтов производилось на трех профилях, заложенных в контурах многолетнемерзлых бугристых болот, перпендикулярно пересекающих автодорогу Усинск–Харьяга (рис. 1). Автодорога имеет статус региональной, используется преимущественно для обеспечения эксплуатации предприятий нефтедобывающей промышленности. Общая длина автодороги 164 км, при этом большая часть трассы покрыта цементно-бетонными плитами. Северная часть автомагистрали находится в зоне распространения ММП.

Профили 1 и 2 заложены на расстоянии 500 м друг от друга на территории Ненецкого автономного округа (координаты: 67°01' с.ш., 56°54' в.д.). Профиль 3 заложен в Усинском районе Республики Коми (координаты: 66°23' с.ш., 57°15' в.д.) (см. рис. 1). Профили 1 и 2 находятся в пределах южной тундры на границе с лесотундрой, в зоне несплошного распространения ММП [Оберман, Шеслер, 2009]. Профиль 3 заложен на бугристом болоте в крайнесеверной тайге с редкоостровным распространением ММП. Среднегодовая температура в районе исследований составляет –4 °С, среднегодовое количество осадков около 500 мм [Атлас..., 1976]. Полевые работы проводились в августе 2016 г.

Мощность торфа на профилях 1 и 2 составила 3.5 м, в профиле 3 – около 1 м. Профили 1 и 3 проложены вдоль линии “бугристое болото–автодорога”, профиль 2 по линии “бугристое болото–автодорога–бугристое болото”. Для ненарушенных участков профилей 1 и 2 характерно преобладание торфяных олиготрофных мерзлотных почв, профиля 3 – торфяных олиготрофных глубокомерзлотных. Для придорожных понижений и дорожной насыпи характерны эмбриоземы. Подробная характеристика объектов исследований дана в табл. 1.



Рис. 1. Географическое положение объектов исследования.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Глубина залегания кровли ММП определялась методом георадиолокационного зондирования георадаром “Zond-12E” (Radar Systems, Inc., Рига, Латвия) с подключенными к нему поверхностными экранированными антеннами частотой 300 и 900 МГц и воздушными экранированными антеннами частотой 1000 и 2000 МГц. Использование антенн разной частоты обусловлено апробацией их применения для исследования значительных вариаций глубины залегания кровли ММП и литологических контактов на ненарушенных и антропогенно-нарушенных участках бугристых болот. Кроме того, использование разных высокочастотных антенн позволило исключить технические помехи, возникающие из-за сложного рельефа поверхности почвы. Поверхностные экранированные антенны 300 и 900 МГц передвигались непосредственно по поверхности почвы с подключенным к ним совместимым мерным колесом диаметром 125 мм, осуществлявшим измерения частотой 128 импульсов за один оборот. Воздушные экранированные антенны частотой 1000 и 2000 МГц, не требующие согласования с поверхностью почвы, переносились вручную на высоте 0.5 м непосредственно над поверхностью почвы по линии профиля.

Георадиолокационное зондирование проводилось в непрерывном режиме при открытом канале данных. Привязка к местности осуществлялась с помощью контрольных пикетов (ПК) профиля, установленных с интервалом 10 м (ПК 10, 20 и т. д.). При обработке и анализе пространственно-дифференцированных георадиолокационных данных использовались значения условных (промежуточных) пикетов (ПК 15, 28 и т. д.). Номер пикета соответствует расстоянию в метрах, на которое пикет удален от начальной точки профиля (ПК 0).

Таблица 1. Характеристика объектов исследования

Номер пикета (ПК)	Ландшафт	Растительное сообщество	Максимальная высота растительного яруса, см	Глубина кровли мерзлоты, см	Относительная высота точек профиля, м
<i>Профиль 1</i>					
0	Плоская вершина торфяного бугра	Ерниково-травянисто-моховое	10	90	3
10	Верхняя часть пологого склона плоско-вершинного торфяного бугра	Багульниково-ерниково-лишайниковое	30	40	3
20	Склоновая поверхность в верхней части склона торфяного бугра	Багульниково-ерниково-лишайниковое	30	47	3
30	Слабонаклонная поверхность склона торфяного бугра	Кустарничково-ерниково-мохово-лишайниковое	40	52	3
40	Средняя часть склона торфяного бугра	Ивняк травяно-ерниковый	80	105	2
50	Придорожное понижение	Ивняк травяно-моховой	450	50	0
60	Придорожное понижение	Ивняк травяно-моховой	400	>130	1
70	Основание подошвы дорожной насыпи (восточное)	Ивняк травяно-ерниковый	80	>130	1
80	Бровка (восточная) склона дорожной насыпи	Растительный покров разреженный: иван-чай, хвощ, травы	50	>130	5
90	Бровка (западная) склона дорожной насыпи	Растительный покров разреженный: иван-чай, хвощ, травы	30	>130	5
100	Основание дорожной насыпи (западное)	Ивняк травянистый	200	>130	1
<i>Профиль 2</i>					
0	Вершина торфяного бугра	Ерниково-кустарничково-лишайниковое	15	55	2
10	Средняя часть склона торфяного бугра	Ерниково-кустарничковое мохово-лишайниковое	40	36	1
20	Заболоченное придорожное понижение, кочковатый микрорельеф	Ивняк хвощевой	120	>130	0
30	Заболоченное придорожное понижение с канавой в основании насыпи автодороги	Ивняк хвощевой	150	>130	0
40	Бровка склона (восточная) дорожной насыпи высотой 5 м, угол склона около 45°. Дорога отсыпана пылеватыми щебнистыми песками	Растительный покров отсутствует	0	>130	5
50	Бровка склона (западная) дорожной насыпи высотой 5 м, угол склона около 45°	Растительный покров отсутствует	0	>130	5
60	Основание дорожной насыпи на границе с заболоченным придорожным понижением	Ивняк хвощево-травянистый	130	>130	0
70	Пологий склон (подошва) торфяного бугра, примыкающего к придорожной канаве	Ивняково-ерниковое кустарничково-моховое	130	>130	1
80	Плоская вершина торфяного бугра	Ерниково-кустарничковое мохово-лишайниковое	30	55	2
90	Плоская вершина торфяного бугра	Ерниково-кустарничковое мохово-лишайниковое	30	42	2
100	Плоская вершина торфяного бугра	Ерниково-кустарничковое мохово-лишайниковое	30	44	2
110	Краевая дренированная часть торфяного бугра	Лишайниково-моховое с кустарничками	20	58	2
120	Нижняя часть склона (пологая подошва) торфяного бугра	Лишайниково-мохово-кустарничковое	30	40	1
130	Средняя часть склона торфяного бугра	Лишайниково-мохово-кустарничковое	20	58	2

Таблица 2. Горизонтальная и вертикальная разрешающая способность используемых высокочастотных антенн

Глубина, м	Частота антенны, МГц							
	300		900		1000		2000	
	СТС	ММП	СТС	ММП	СТС	ММП	СТС	ММП
<i>Горизонтальная разрешающая способность, см</i>								
1	37	45	24	30	15	19	16	20
2	52	63	34	42	22	26	23	28
3	63	77	42	51	–	–	–	–
4	73	89	48	59	–	–	–	–
5	82	100	54	66	–	–	–	–
6	89	109	–	–	–	–	–	–
7	96	118	–	–	–	–	–	–
<i>Вертикальная разрешающая способность, см</i>								
	27	40	12	18	5	7	6	8

Примечание. Прочерк – не определялась.

Полученные радарограммы обрабатывались в программном пакете Prizm 2.60.02 (Radar Systems, Inc., Рига, Латвия). При камеральной обработке полученных полевых радарограмм выполнялись алгоритмы, рекомендуемые производителем приборов: удаление “звона” сигнала; полосовая фильтрация косинусным полосовым фильтром; автоматическая регулировка усиления; преобразование сигнала из шкалы времени в шкалу глубин; ввод данных топографии поверхности почвогрунтов. При преобразовании сигнала из шкалы времени в шкалу глубин учитывалась средняя по профилям скорость электромагнитной волны ( $v$ ), которая в сезонноталом слое (СТС) составляет 10 см/нс при диэлектрической проницаемости почв  $\epsilon'_r = 9$ . Для ММП  $v = 15$  см/нс,  $\epsilon'_r = 4$ , для водной массы (обводненные участки)  $v = 3.3$  см/нс,  $\epsilon'_r = 81$ .

Оценка предельной разрешающей способности георадиолокационного зондирования по вертикали рассчитывалась по формуле

$$\frac{1}{2}\lambda = \frac{v}{2f}, \quad (1)$$

где  $\frac{1}{2}\lambda$  – разрешающая способность съемки по вертикали, равная половине длины электромагнитной волны;  $v$  – скорость распространения электромагнитной волны;  $f$  – верхняя граничная частота сигнала.

Оценка предельной разрешающей способности по горизонтали рассчитывалась по радиусу эффективной отражающей площади точечного источника:

$$\frac{1}{2}\sqrt{\lambda h}, \quad (2)$$

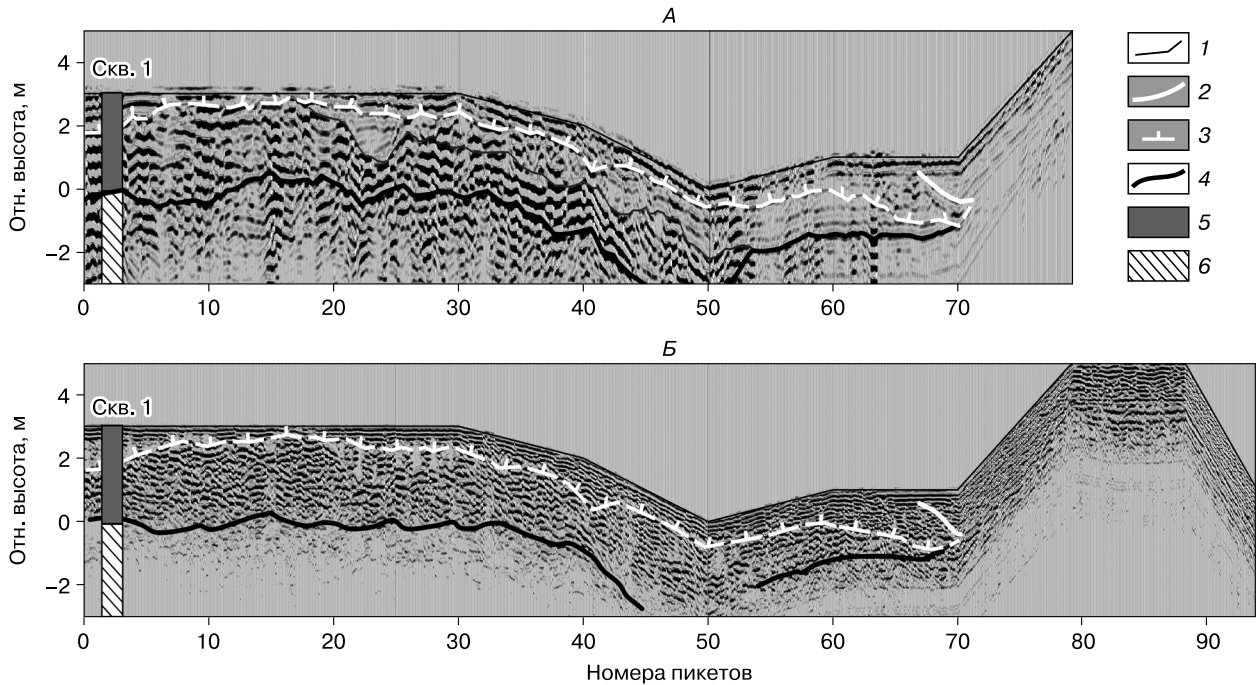
где  $\lambda$  – длина волны;  $h$  – глубина исследуемого горизонта.

С учетом диапазонов амплитудных спектров разных антенн и на основе расчетов по формулам (1), (2) [Боганик, Гурвич, 2006] получены оценки предельной разрешающей способности используемых высокочастотных антенн по вертикали и горизонтали (табл. 2).

На контрольных пикетах профилей проводили определение ландшафтных компонентов и описание растительности, с помощью оптического нивелира Geobox N8-32 измеряли относительную высоту данных точек. На контрольных пикетах глубину залегания кровли ММП определяли с помощью градуированного металлического щупа длиной 130 см. Для определения морфологического строения профиля почв (глубина 0–1 м) и подстилающих пород (1–10 м) профилей 1 и 2 на бугристом болоте и у основания дорожной насыпи выполнены почвенные разрезы и пробурены скважины № 1 и 2 с последующим отбором образцов. В пределах профиля 3 в связи с незначительной мощностью торфа (около 1 м) пробурена почвенная скважина № 3 глубиной 1.5 м. Данные измеренных глубин залегания кровли ММП, а также разрезов буровых колонок и почв использовались в качестве привязочных при определении пространственной вариации топографии кровли ММП, нижних границ торфяных и техногенных (насыпных) горизонтов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

По результатам георадиолокационного зондирования антенной 300 МГц на георадиолокационном профиле 1 в сегменте ПК 0–71 отчетливо прослеживается ось синфазности, связываемая с отражением кровли ММП (рис. 2). В условиях ненарушенного торфяного массива глубина залегания ММП варьирует в диапазоне 0.2–1.5 м. При



**Рис. 2.** Георадиолокационный разрез профиля 1 по данным зондирования антеннами 300 МГц (А) и 900 МГц (Б).

1 – генерализованный рельеф поверхности почвогоризнтов; 2 – подошва техногенных грунтов; 3 – кровля ММП; 4 – нижняя граница торфяных горизонтов; 5 – торфяные почвогоризнты; 6 – суглинки пылеватые.

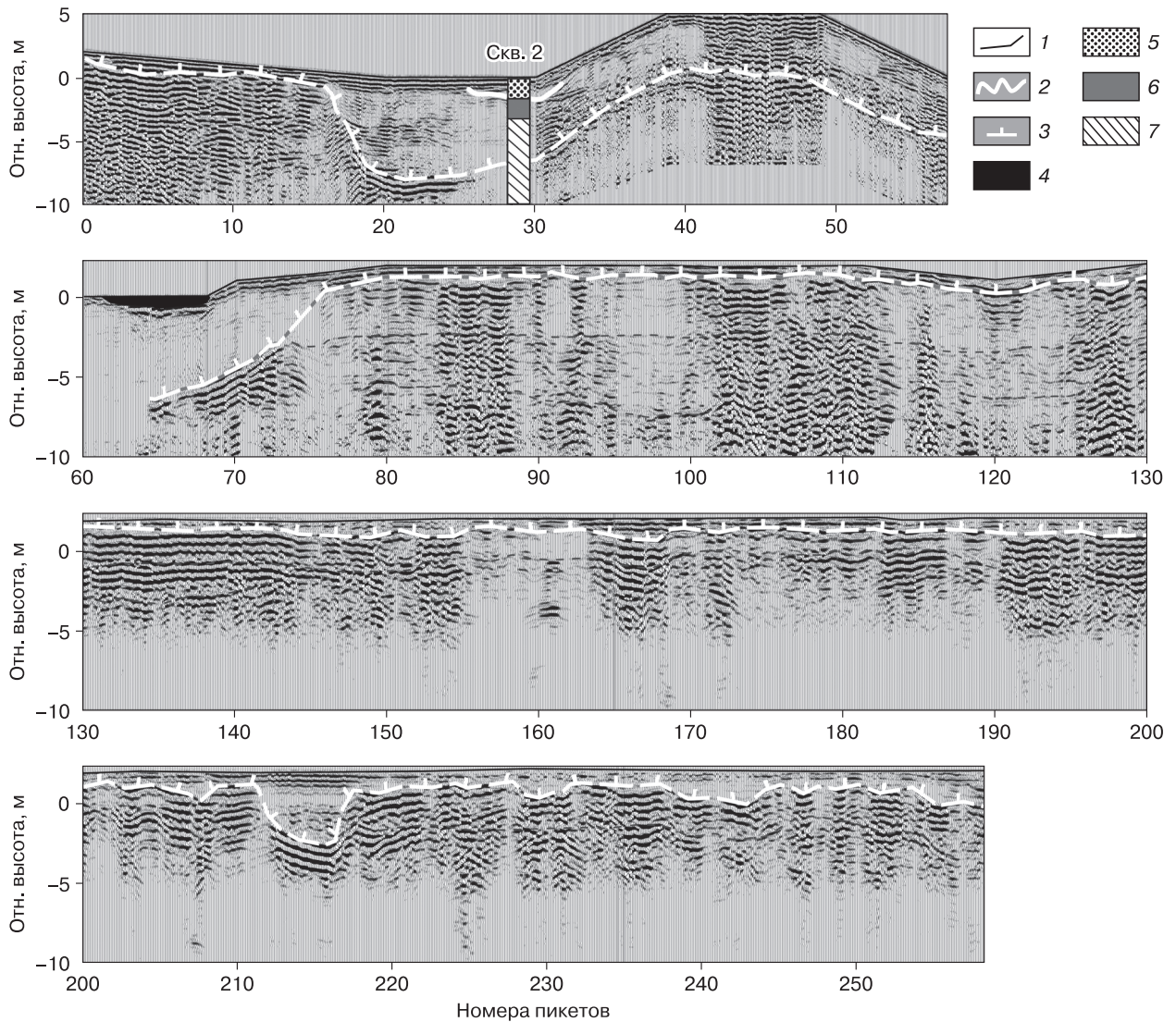
этом наблюдается тенденция к увеличению мощности СТС на склоне торфяного бугра, примыкающего к дороге (ПК 40). На пикетах ПК 60–70 фиксируется плавное погружение кровли ММП в сторону подошвы дорожной насыпи с глубины 1 до 2 м.

На георадиолокационном разрезе профиля 2 положение кровли ММП прослеживается достаточно четко (рис. 3). Граница проведена по оси синфазности, разделяющей области с различными типами записи. На участках, где положение границы записи близко к вертикальному, она проявляется в виде серии дифракционных фронтов. В начальной части профиля (ПК 0–15) в бугристом болоте глубина залегания кровли ММП варьирует от 0.5 до 0.9 м. В пределах придорожного понижения глубина кровли ММП резко снижается с 1 м (ПК 17) до 8 м (ПК 21). Далее кровля многолетнемерзлых пород постепенно повышается до уровня 6.5 м под подножием дорожной насыпи (ПК 30) и до 4–5 м (ПК 40) непосредственно под насыпью (ПК 40–60) (см. рис. 3). В придорожном понижении западной части профиля кровля ММП вновь опускается до уровня 5.0–6.5 м (ПК 64–70). Относительная стабилизация глубины залегания ММП (0.5–1.0 м) наблюдается на склоне торфяного бугра, примыкающего к дорожному понижению (ПК 75–90) (см. рис. 3). Под локальными мо-

чажинами (диаметром до 3–4 м) кровля ММП залегает в интервале глубин 1–2 м (ПК 164–169; 205–208; 227–231). Максимальное погружение кровли ММП до 4.5 м зафиксировано под наиболее крупной мочажинной диаметром 7–9 м (ПК 211–218) (см. рис. 3).

Георадиолокационное зондирование целинных почвогоризнтов бугристого болота по профилю 3 выявило относительно глубокое (1.5–2.0 м) залегание кровли многолетнемерзлых пород (рис. 4). Непосредственно под подошвой склона дорожной насыпи высотой 2 м кровля ММП опускается до глубины 2.5 м.

Анализ георадиолокационных данных в разрезе по профилю 1 позволяет выделить нижние границы торфяных горизонтов и техногенных (насыпных) грунтов (см. рис. 2). Мощность насыпных грунтов увеличивается с 0.5 до 1.6 м (ПК 67–70) в направлении подошвы дорожной насыпи. Ось синфазности, соответствующая нижней границе торфяных горизонтов, прослеживается почти на всем протяжении профиля на глубине от 2.2 до 4.0 м. При этом максимальная глубина залегания подошвы торфяной толщи наблюдается в краевой части торфяного бугра, примыкающего к придорожному понижению (ПК 45–50). Под дорожной насыпью нижняя граница торфа залегает на глубине 3 м, что свидетельствует об отсыпке



**Рис. 3. Георадиолокационный разрез профиля 2 по данным зондирования антенной 300 МГц.**

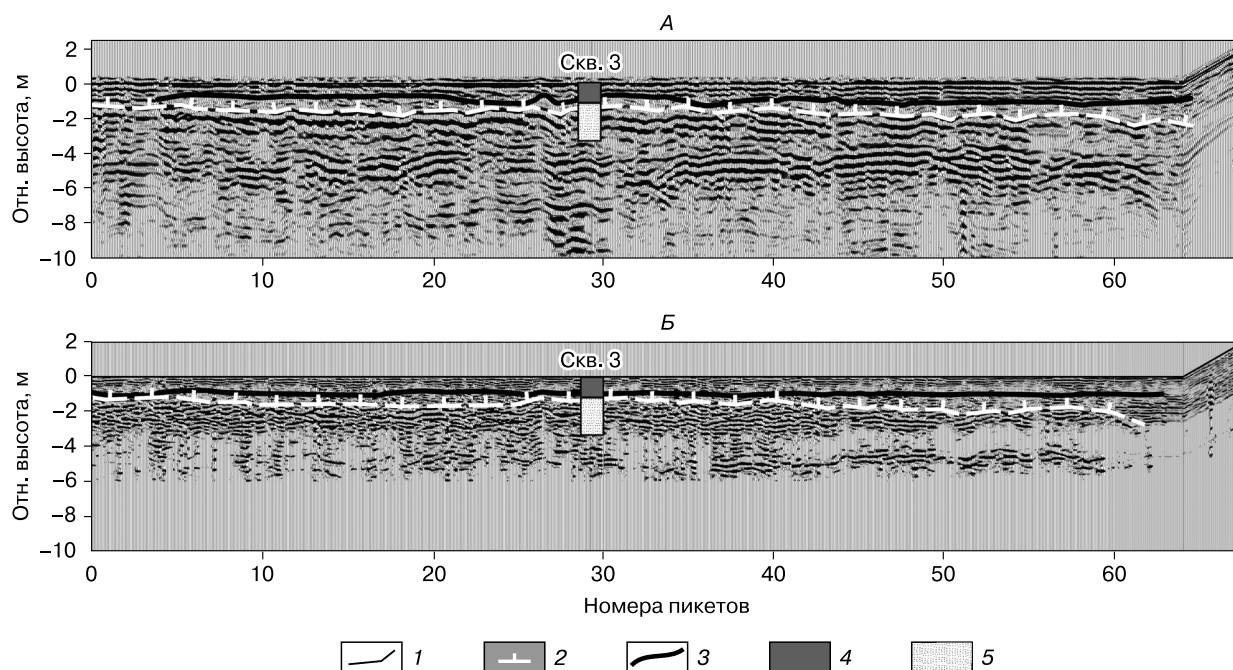
1 – генерализованный рельеф поверхности почвогрунтов; 2 – подошва техногенных грунтов; 3 – кровля ММП; 4 – вода в придорожной канаве; 5 – насыпные супесчано-гравийные почвогрунты; 6 – торфяные почвогрунты; 7 – суглинки пылеватые.

дороги непосредственно на поверхность торфяника. Данные зондирования профиля 2 также позволили выделить нижнюю границу техногенных (насыпных) грунтов в основании подошвы дорожной насыпи (ПК 25–31) на глубине 1.0–1.7 м (см. рис. 3). В разрезе по профилю 3 четко прослеживается нижняя граница маломощной торфяной толщи в интервале глубин 0.6–1.2 м (ПК 4–64) (см. рис. 4).

Анализ георадиолокационных данных по результатам съемки антенной 900 МГц также позволяет проследить и уточнить особенности залегания кровли ММП и других литологических элементов профиля (см. рис. 2, 4, 5). Однако кровля ММП при ее залегании глубже 2 м прослеживается

не так отчетливо, как при съемке антенной 300 МГц. На данных глубинах отсутствует непрерывность в прослеживании оси синфазности, соответствующей этой и другим границам в профиле. Например, в профиле 1 нижняя граница торфяной толщи выделяется еще относительно четко по изменению волновой картины (ПК 0–44). Однако уже в подстилающих суглинистых горизонтах запись становится более прозрачной (см. рис. 2).

При георадиолокационном зондировании воздушными экранированными антеннами 1000 и 2000 МГц глубина четкого отображения сигнала составила 0.3 м, что явно недостаточно при определении кровли ММП и литологических контактов (рис. 6).



**Рис. 4.** Георадиолокационный разрез профиля 3 по данным зондирования антеннами 300 МГц (А) и 900 МГц (Б).

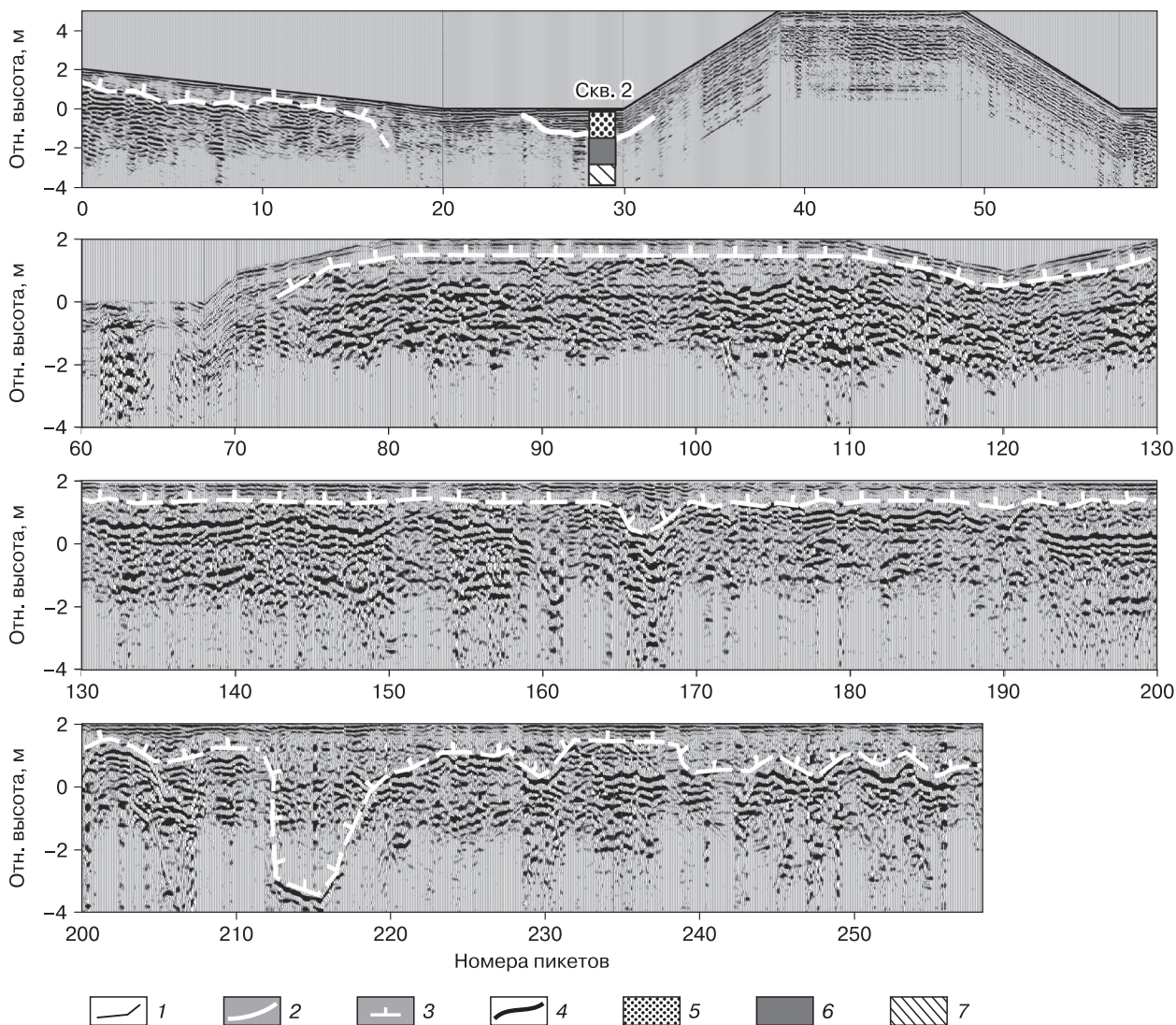
1 – генерализованный рельеф поверхности почвогрунтов; 2 – кровля ММП; 3 – нижняя граница торфяных горизонтов; 4 – торфяные почвогрунты; 5 – пески.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Использование экранированных антенн разной частоты позволило выявить особенности их применения, преимущества и недостатки при определении глубин залегания кровли ММП и литологических контактов на целинных и антропогенно-нарушенных участках бугристых болот. Антенна 300 МГц обладает большей проникающей способностью, что позволяет определять глубину залегания ММП и литологических контактов в пределах верхней 10-метровой толщи. Проникающая способность антенны вполне достаточна для выявления изменений глубины залегания кровли ММП в широком диапазоне глубин (0–10 м). Антенной 300 МГц можно определить нижние границы глубоких таликов под мочажинами и в полосе влияния дороги. Более высокое разрешение антенны 900 МГц позволяет уточнить топографию кровли многолетнемерзлых пород и литологических контактов в диапазоне глубин 0–2 м. Однако меньшая проникающая способность радиосигнала этой антенны ограничивает ее возможности при зондировании заглубленной кровли ММП (глубина 2–8 м). Таким образом, антенна 900 МГц может применяться в условиях преимущественно неглубокого залегания кровли ММП без глубоких таликовых зон. Ее использование более целесообразно при подробном исследовании ненарушенных почвенно-мерзлотных комплексов.

Из результатов георадиолокационного зондирования антеннами 1000 и 2000 МГц следует, что эти антенны обладают недостаточной глубиной проникновения сигнала. В связи с этим они являются неинформативными для определения конфигурации кровли ММП в тундровых почвогрунтах. Высокочастотные воздушные экранированные антенны в большей мере предназначены для зондирования дорог, мостов, кирпичных и бетонных конструкций [Радарные... системы, 2017].

Анализ результатов исследований показал, что зона тепляющего влияния дороги прослеживается на расстоянии до 15 м от подошвы склона насыпи (см. рис. 2–4). Таким образом, общая ширина полосы влияния дороги на участках многолетнемерзлых бугристых торфяников может достигать 50 м. Наиболее значительное понижение кровли ММП (до 6–8 м) наблюдается под придорожными понижениями, в которых создаются благоприятные условия для заболачивания, произрастания крупнокустарниковой растительности и снегонакопления (см. табл. 1). Это, в свою очередь, приводит к повышению зимних температур почв и оттаиванию льдистых горизонтов. Относительное повышение кровли ММП до уровня 5–6 м под дорожной насыпью объясняется ежегодным формированием маломощного уплотненного снежного слоя на поверхности дороги при ее эксплуатации зимой. В условиях редкоостровного

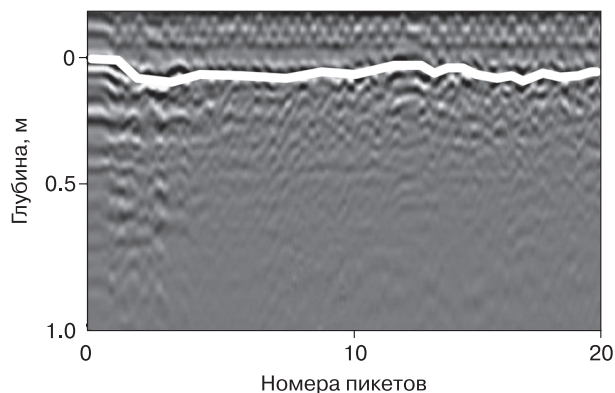


**Рис. 5. Георадиолокационный разрез профиля 2 по данным зондирования антенной 900 МГц.**

1 – генерализованный рельеф поверхности почвогрунтов; 2 – подошва техногенных грунтов; 3 – кровля ММП; 4 – нижняя граница торфяных горизонтов; 5 – насыпные супесчано-гравийные почвогрунты; 6 – торфяные почвогрунты; 7 – суглинки пылеватые.

распространения ММП при пересечении бугристого болота дорогой с относительно низкой насыпью (2 м) глубина залегания кровли ММП увеличивается на 20–40 %. При этом полоса утепляющего влияния дороги распространяется только на 5 м от подошвы склона дорожной насыпи.

Более подробно характеристики температурного режима в зоне придорожного понижения бу-



**Рис. 6. Георадиолокационный разрез фрагмента профиля 1 по данным зондирования антенной 1000 МГц (без учета ввода данных рельефа).**

Белая линия – отражение от поверхности грунта.



дут раскрыты в статье, посвященной изменению температурного состояния почвогрунтов при эксплуатации дороги.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение современных методов высокочастотного георадиолокационного зондирования позволяет исследовать пространственную дифференциацию глубины залегания кровли ММП и литологических контактов в целинных и антропогенно-нарушенных почвогрунтах бугристых болот.

Совместное использование поверхностных экранированных антенн частотой 300 и 900 МГц является эффективным решением для определения значительных (0–10 м) вариаций глубины залегания кровли ММП и литологических контактов (нижняя граница торфяной толщи и насыпных техногенных грунтов). Более высокая проникающая способность сигнала антенны 300 МГц позволяет исследовать конфигурацию глубоких несквозных таликов (2–8 м) в полосе отепляющего влияния дороги и под мочажинами. Большая частота антенны 900 МГц позволяет подробно изучить топографию кровли ММП в интервале глубин 0–2 м, что особенно актуально при исследованиях целинных почвенно-мерзлотных комплексов.

Низкая проникающая способность высокочастотных воздушных экранированных антенн (1000 и 2000 МГц) определяет их неэффективность для исследований почвогрунтов многолетнемерзлых бугристых болот.

Результаты высокочастотного георадиолокационного зондирования показали, что строительство и эксплуатация насыпной дороги с твердым цементно-бетонным покрытием на бугристых болотах юга криолитозоны способствует значительному опусканию кровли ММП (до 8 м). При этом отепляющее влияние дороги проявляется в полосе шириной до 50 м, охватывая непосредственно дорожную насыпь, придорожные понижения и прилегающие к ним участки бугристых болот. Целинные участки бугристых болот характеризуются неоднородностью залегания кровли ММП, обусловленной мезотопографией бугров и мочажин.

*Исследования выполнены при поддержке проекта № 141у-2016 в рамках реализации проекта ПРООН/ГЭФ 00059042, при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 18-55-11003; 18-05-60005; 16-04-00749).*

### Литература

- Атлас Архангельской области / Ред. Д.Ф. Федоров. М., ГУГК, 1976, 72 с.  
Fedorov, D.F. (Ed.), 1976. Atlas of Arkhangelsk Region. GUGK, Moscow, 72 pp. (in Russian)
- Боганик Г.Н. Сейсморазведка / Г.Н. Боганик, И.И. Гурвич. Тверь, АИС, 2006, 744 с.  
Boganic, G.N., Gurvich, I.I., 2006. Seismic Exploration. AIS, Tver, 744 pp. (in Russian)
- Бричева С.С., Крылов С.С. Георадиолокационные исследования приповерхностных многолетнемерзлых пород на Гыданском полуострове // Инж. изыскания, 2014, № 9–10, с. 38–44.  
Bricheva, S.S., Krylov, S.S., 2014. GPR investigations of near-surface permafrost soils on the Gydan peninsula. Inzh. Isyskaniya, No. 9–10, 38–44.
- Лупачев А.В., Губин С.В., Веремеева А.А. и др. Микро-рельеф поверхности многолетнемерзлых пород: строение и экологические функции // Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 2, с. 3–14.  
Lupachev, A.V., Gubin, S.V., Veremeeva, A.A., Kaverin, D.A., Pastukhov, A.V., Yakimov, A.S., 2016. Microrelief of the permafrost table: structure and ecological functions. Earth's Cryosphere XX (2), 3–13.
- Нерадовский Л.Г. Оценка теплового состояния криолитозоны методами электромагнитного зондирования. М., АНО Изд. дом "Научное обозрение", 2014, 333 с.  
Neradovskii, L.G., 2014. Estimating the Thermal State of Permafrost by Electromagnetic Sounding Methods. ANO "Nauchnoe obosrenie" Publishing House, Moscow, 333 pp. (in Russian)
- Оберман Н.Г., Шеслер И.Г. Современные и прогнозируемые изменения мерзлотных условий Европейского северо-востока Российской Федерации // Пробл. Севера и Арктики РФ. Науч.-информ. бюл., 2009, вып. 9, с. 96–106.  
Oberman, N.G., Shesler, I.G., 2009. Observed and projected changes in permafrost conditions within the European Northeast of Russia. Problemy Severa i Arktiki RF. Nauchn.-inform. Byul., iss. 9, 96–106.
- Пягай Э.Т., Белобров В.П., Молчанов Э.Н. и др. Использование георадара в почвенных исследованиях // Бюл. Почв. ин-та, 2009, № 64, с. 106–125.  
Pyagay, E.T., Belobrov, V.P., Molchanov, E.N., Seo, M.Ch., Son, Y.K., 2009. Application of GPR in soil studies. Byul. Pochv. In-ta, No. 64, 106–125.
- Радарные и сейсмические системы. Антенна 1.0 ГГц воздушная, экранированная [Электронный ресурс]. – URL: <http://radseismsys.ru/catalog/antenny/antenna-1-0-ggts-vozdushnaya-ekranirovannaya> (дата обращения: 16.06.2017).  
Radar and Seismic systems. 1.0 GHz aerial antenna, shielded [Electronic resource]. – URL: <http://radseismsys.ru/catalog/antenny/antenna-1-0-ggts-vozdushnaya-ekranirovannaya> (submital date: 16.06.2017).
- Трегубов О.Д., Краев Г.Н., Маслаков А.А. Моделирование строения кровли многолетнемерзлых пород по данным георадиолокационного профилирования // Тезисы докл. конф. "Инженерная геофизика" (Кисловодск, 24–28 апр. 2017 г.), DOI: 10.3997/2214-4609.201700389. – URL: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=88111> (дата обращения: 16.06.2017).  
Tregubov, O.D., Kraev, G.N., Maslakov, A.A., 2017. Modelling the permafrost table structure from the GPR survey data. Extended abstract submitted to EAGE Conference and Exhibition Engineering Geophysics on April 24–28 2017, Kislovodsk, Russia, DOI: 10.3997/2214-4609.201700389.
- Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пушино, ОНТИ ПНЦ РАН, 1998, 515 с.  
Frolov, A.D., 1998. Electrical and elastic properties of frozen rocks and ice. ONTI PNTs RAN, Pushchino, 515 pp. (in Russian)
- Абакумов, Е., Томашунас, В. Electric resistivity of soils and upper permafrost layer of the Gydan Peninsula // Polarforschung, 2016, No. 86 (1), p. 27–34.

**Cao, B., Gruber, S., Zhang, T., et al.** Spatial variability of active layer thickness detected by ground-penetrating radar in the Qilian Mountains, Western China // *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 2017, No. 122, p. 574–591, DOI: 10.1002/2016JF004018.

**Gusmeroli, A., Liu, L., Schaefer, K., et al.** Active layer stratigraphy and organic layer thickness at a thermokarst site in Arctic Alaska identified using ground penetrating radar // *Arctic, Antarctic, and Alpine Res.*, 2015, No. 47 (2), p. 195–202, DOI: 10.1657/AAAR00C-13-301.

**Moorman, B.J., Robinson, S.D., Burgess, M.M.** Imaging periglacial conditions with ground-penetrating radar // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, No. 14, p. 19–329, DOI: 10.1002/ppp.463.

**Shur, Y., Hinkel, K.M., Nelson, F.E.** The transient layer: implications for geocryology and climate-change science // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2005, No. 16, p. 5–17, DOI: 10.1002/ppp.518.

**Wollschläger, U., Gerhards, H., Yu, Q., Roth, K.** Multi-channel ground-penetrating radar to explore spatial variations in thaw depth and moisture content in the active layer of a permafrost site // *The Cryosphere*, 2010, No. 4, p. 269–283, DOI: 10.5194/tc-4-269-2010.

**Wu, T., Wang, Q., Watanabe, M., et al.** Mapping vertical profile of discontinuous permafrost with ground penetrating radar at Nalaikh depression, Mongolia // *Environ. Geology*, 2009, No. 56, p. 1577–1583, DOI: 10.1007/s00254-008-1255-7.

*Поступила в редакцию  
22 июня 2017 г.*