

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ ТОМОГРАФИЯ ЗЕМНЫХ ПОКРОВОВ
ULTRA-WIDEBAND TOMOGRAPHY OF THE EARTH'S SURFACE

В.П. Якубов*, А.С. Запасной*, А.В. Клоков*, С.Э. Шипилов*, А.В. Юрченко**

V.P. Yakubov*, A.S. Zapasnoy*, A.V. Klokov*, S.E. Shipilov*, A.V. Yurchenko**

*Национальный исследовательский Томский государственный университет

*National Research Tomsk State University

**Национальный исследовательский Томский политехнический университет

**National Research Tomsk Polytechnic University

yvlp@mail.tsu.ru, zas_rff@sibmail.com, 701-kav@elefot.tsu.ru, shipilov@webmail.tsu.ru

Ключевые слова: георадар, радиолокация, обработка данных.

Keywords: ground penetrating radar, radiolocation, data processing.

Аннотация: В настоящее время, благодаря, техническому прогрессу и уменьшению стоимости, получили широкое распространение системы подповерхностного зондирования – георадары. Эти системы позволяют проводить неразрушающие подземные исследования в промышленных, археологических и исторических целях, т.е. изучение археологических слоев Земли, поиск различного рода артефактов и т.д. В данной работе описан подход, сочетающий использование геолокатора «ОКО-2» и традиционного разреза, применяемого в почвоведении для исследования почвенных покровов.

Abstract: At the present time due to technological progress and cost reduction are widely distributed ground penetrating radar systems. These systems allow carrying out subsurface surveys for industrial, archaeological and historical applications, i.e. study of archaeological layers of the Earth, searching for artifacts and etc. The paper deal with an approach that combines the use of georadar "ОКО-2", traditional cut used in soil science for the study of layered soil.

Было проложено несколько трасс в различных почвенных условиях. На рисунке 1 показана одна из выбранных трасс, которая проходила на склоне с перепадом высот в 3 м в Тимирязевском лесничестве вблизи города Томска. Почвообразующая порода – боровые пески. На этой же трассе были сделаны два реальных почвенных разреза, отмеченные цифрами 1 и 2. Глубина разрезов – 1,8 м.

Геолокационная съёмка проводилась с использованием промышленно выпускаемого радара «ОКО-2» (г. Раменское). Для зондирования почвогрунтов и обеспечения надлежащей проникающей способности была выбрана подсистема с биполярными зондирующими импульсами, имеющими среднюю частоту 90 МГц. Зондирование проводилось по прямой вдоль выбранного профиля так, что сделанные затем реальные разрезы почвы лежали на этой прямой (рисунок 1).

Поскольку профиль проходил по склону сверху вниз, а зондирование проводилось геолокатором, установленным непосредственно на земле, то полученные локационная картина содержала геометрические искажения (рисунок 2). Здесь по горизонтальной оси отложены горизонтальные перемещения зондирующей антенны, а по вертикальной оси показано временное запаздывание отраженных сигналов. Градациями серого цвета изображена интенсивность отраженных сигналов.

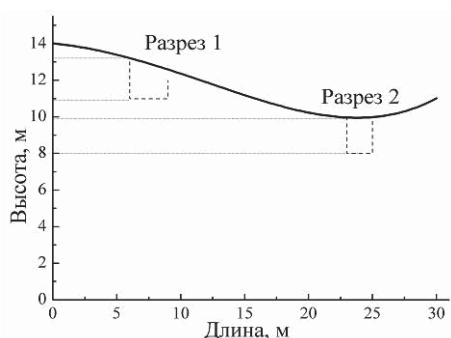


Рисунок 1 – Геоморфологический профиль склона и вид на местность

Кривой 1 на рисунке 2 показан уровень, соответствующий подземному водному горизонту. Кривая проведена по методу наименьших квадратов, исходя из требования наилучшего соответствия водному горизонту. Этот уровень в действительности должен быть горизонтальным. Исправление этих искажений приводит к картине, показанной на рисунке 3. Теперь кривая 1 становится горизонтальной прямой, а верхний контур отражений соответствует реальному рельефу местности. Таким образом, наличие подземного водного горизонта позволило восстановить действительный рельеф местности вдоль трассы зондирования [1].

Следующая часть обработки данных геолокации состояла в сжатии изображений, измеряемых с использованием широкой диаграммы направленности радара. Внешним

проявлением этого эффекта является присутствие на изображении т.н. «дифракционных гипербол». Следы таких гипербол показаны на рисунке 3 кривыми 2–3. Дифракционные гиперболы являются радарными откликами на точечные неоднородности и являются аналогами т.н. функции размытия точки, широко используемой в оптике. Угол раскрыва гипербола зависит от среднего показателя преломления (n) среды, в которой находятся неоднородности. Варьируя угол раскрыва аппроксимирующих кривых, можно установить средний показатель преломления почвы. В нашем случае, казалось, что он имеет значение $n \approx 2,5$. Найденное значение соответствует диэлектрической проницаемости $\epsilon' \approx 6,5$. Устранение влияния функции размытия точки производится методом синтезирования большой апертуры или, что равнозначно методом двумерной согласованной фильтрации. Кривой 4 на рисунке 3 показано положение дифракционной гипербола которая выбирается для согласованной фильтрации.

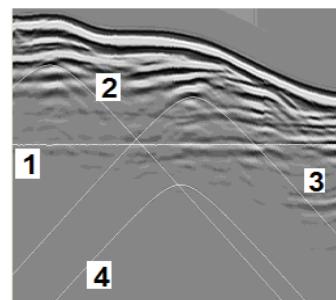
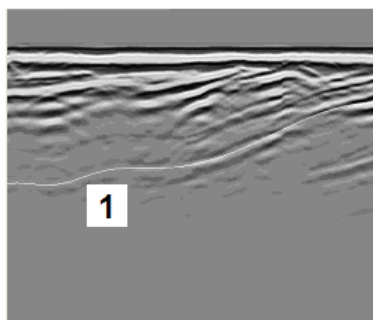


Рисунок 2 – Исходный геолокационный профиль Рисунок 3 – Геолокационный профиль с учетом рельефа

Заметим, что прежде чем проводить согласованную фильтрацию, следует провести еще одну операцию – коррекцию экспоненциального ослабления излучения с глубиной его проникновения в среду, т.е. почву. Разумеется, это можно сделать лишь в среднем для фоновой среды. Коррекция этого ослабления позволяет увеличить относительный вклад глубинных слоев. Совместное выполнение упомянутых выше операций (согласованной фильтрации и амплитудной коррекции) дает окончательный результат – вертикальный радарный разрез трассы зондирования (рисунок 4). Водный горизонт здесь помечен горизонтальной штриховой линией. Наибольший интерес для верификации георадарных результатов представляет разрез 1, для которого были проведены визуальные и аналитические оценки состояния вертикального профиля.

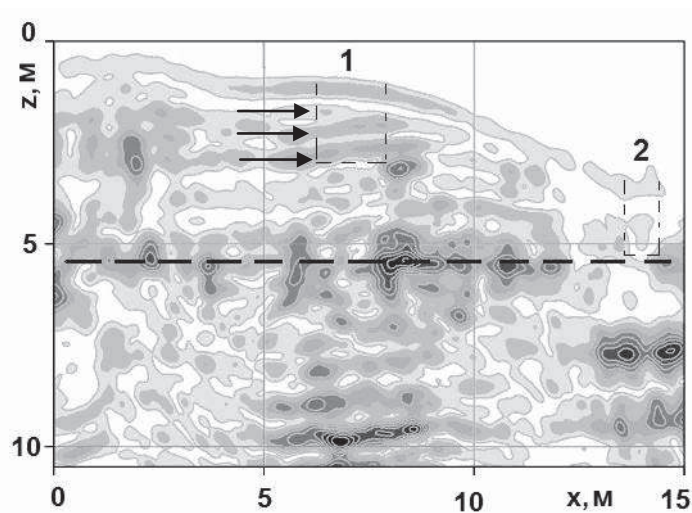


Рисунок 4 – Радарный разрез трассы зондирования

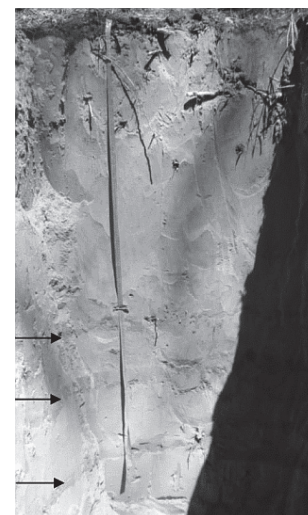


Рисунок 5 – Профиль дерново-подзолистой почвы в разрезе 1

Морфологический облик почвы в средней части склона (разрез 1) показан на рисунке 5. В этом разрезе чётко видны три железистые прослойки, толщиной 0,5 – 6 см, ржаво-бурого цвета (отмечены стрелками на рисунках 4 и 5). Они характеризуются увеличенным значением диэлектрической проницаемости и плотности почвы. Лабораторные исследования взятых проб это подтверждают. Области с большими значениями диэлектрической проницаемости дают большие отражения, чем фоновая среда. Подобные результаты были получены для почвы в ложбине (разрез 2). Как видно, многие особенности полученного разреза хорошо совпадают с результатами контактных измерений. Помимо отмеченных неоднородностей на томограмме вертикального разреза наблюдаются одиночные неоднородности, очевидно, являющиеся горизонтальными рукавами корневой системы сосен, растущих вблизи трассы (рисунок 1). Обычно корневая система сосны характеризуется наличием слабо выраженного стержневого корня (вертикального) и сильно развитых боковых корней, которые располагаются параллельно поверхности грунта.

Сказанное выше служит подтверждением правильности предложенного подхода для геоархивки структуры почвогрунтов и водосодержащих горизонтов.

Литература

1. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Суханов Д.Я., Клоков А.В. Радиоволновая томография: достижения и перспективы. Томск: НТЛ, 2014. 264 с.