

Омский научный семинар "Современные проблемы радиофизики и радиотехники"

Бобров П.П.

**ДАТЧИКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И
ВЛАЖНОСТИ ПОЧВ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ
(ОмГПУ, ИРФЭ ОНЦ СО РАН, Омск).**

Актуальность

- Информация о влажности почвы важна для сельскохозяйственного производства, гидрологии водосборов, метеорологии, прогнозирования наводнений, предсказания оползней и других применений. Сельскохозяйственное производство опирается на информацию о влажности почвы для управления ирригацией, а также для смягчения неблагоприятных воздействий на почву из-за чрезмерного переувлажнения. Информация о влажности почвы в глобальных масштабах важна для сохранения водных ресурсов. Водный кризис обостряется из-за изменения глобального климата особенно во многих засушливых регионах мира.
- Глобальный спрос на сокращающиеся водные ресурсы вызвал интереса к разработке методов измерения влажности почвы. Растет число методов геофизического зондирования как наземных, так и космических.
- В области дистанционного зондирования влажности почвы с аэроносителей и спутников существуют проблемы с их проверкой и калибровкой на основе наземных эталонных измерений. Остающейся серьезной проблемой дистанционного зондирования является точная оценка влажности почвы в корневой зоне на основе информации о влажности приповерхностного слоя (2-5 см), полученной при дистанционном зондировании.
- Несмотря на все недавние достижения в области измерения влажности почвы, необходимы дальнейшие исследования для усовершенствования и оптимизации технологий, а также для разработки методов анализа и извлечения данных.

Методы измерения влажности почв

Способы измерения влажности можно разделить на проксимальные, когда датчики находятся в контакте с почвой или в непосредственной близости от нее (< 2 м), и не проксимальные (дроны, самолеты и спутники). Проксимальные датчики могут быть инвазивными (заглубленными), так и не инвазивными, которые могут работать на поверхности земли или вблизи нее.

В литературе описан широкий спектр разнообразных технологий измерения влаги в почве, Однако, большинство этих технологий находятся на ранних стадиях развития, и немногие из этих методов были адекватно оценены для практического применения в полевых условиях. Очень мало действительно новых методов измерения влажности почвы были приняты для использования в сельском хозяйстве за последние два десятилетия. В настоящее время преобладает небольшое количество «проверенных» технологий, а именно, рефлектометрия в частотной (FDR) и временной (TDR) областях, емкостные датчики, нейтронный счетчик влаги (NMM) и некоторые другие. Изучение рынка датчиков влажности почвы показывает, что большинство предположительно «новых» датчиков влажности почвы, которые стали коммерчески доступными за последние 5–10 лет, основаны на ранее существовавших диэлектрических методах. Методы, которые были по-настоящему улучшенными в последние годы, включают в себя заглубленные на разные глубины TDR, датчики TDR низкой стоимости и псевдо-TDR датчики.



Метод с использованием космических лучей

Установка для определения влажности почв с помощью космических лучей (США, Аризона).

Протоны космического излучения, попадая в атмосферу, создают вторичные нейтроны, которые, в свою очередь проходя через атмосферу, а затем через несколько верхних метров биосферы, гидросферы и литосферы создаются быстрые нейтроны. Поскольку быстрые нейтроны сильно замедляются с помощью протонов, присутствующих в окружающей среде, их измеренная интенсивность отражает вариации влажности почвы. Быстрые нейтроны, перемещаются между воздухом и почвой, и, таким образом, устанавливается их равновесная концентрация. Равновесие смещается при изменении содержания протонов в среде, что на практике означает изменение количества воды в почве. Такие зонды измеряют содержание воды в почве на глубину приблизительно 70 см в сухой почве, и 12 см во влажной почве. Область измерения представляет круг радиусом приблизительно 330-350 м. Среднеквадратичная ошибка (RMSE) составляет $0,017 \text{ м}^3/\text{м}^3$ для хорошо калиброванного зонда.

Сети стационарных зондов, называемых Cosmos, установлены в США, с основной целью предоставления данных о средней влажности для атмосферных приложений. Другие сети или отдельные зонды устанавливаются в Англии, Австралии, Германии и в других местах по всему миру.

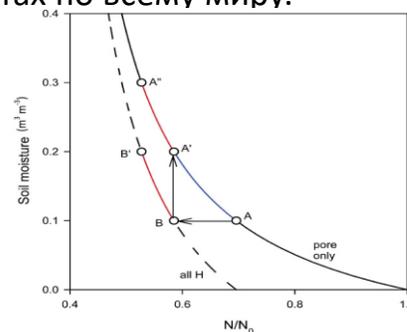
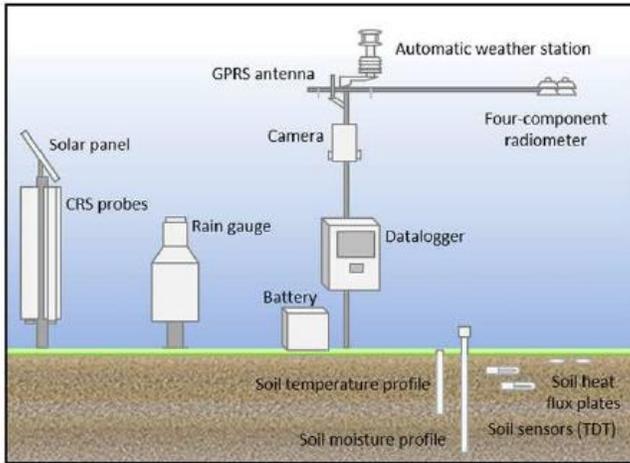


Рис. 2. Функция отклика нейтронного зонда для почвы с водой только в порах (сплошная черная линия) и для почвы с другими формами воды и органическим веществом (пунктирная черная линия)

1. T. E. Ochsner et al., *State of the Art in Large-Scale Soil Moisture Monitoring* // *Soil Science Society of America Journal*. 2013. doi:10.2136/sssaj2013.03.0093

2. M. Zreda et al., *COSMOS: the COsmic-ray Soil Moisture Observing System* // *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 4079–4099, 2012. doi:10.5194/hess-16-4079-2012

Использование системы DTS (Distributed Temperature Sensing)

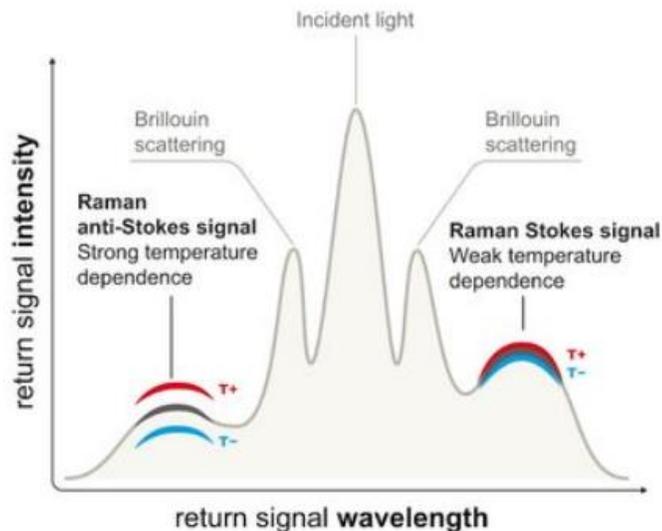
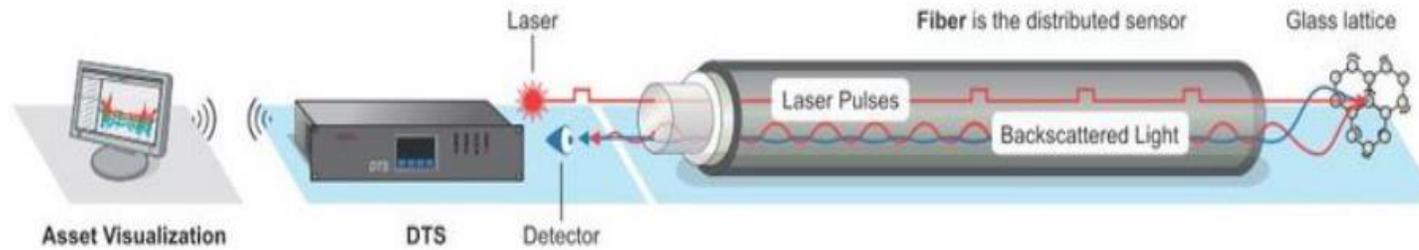
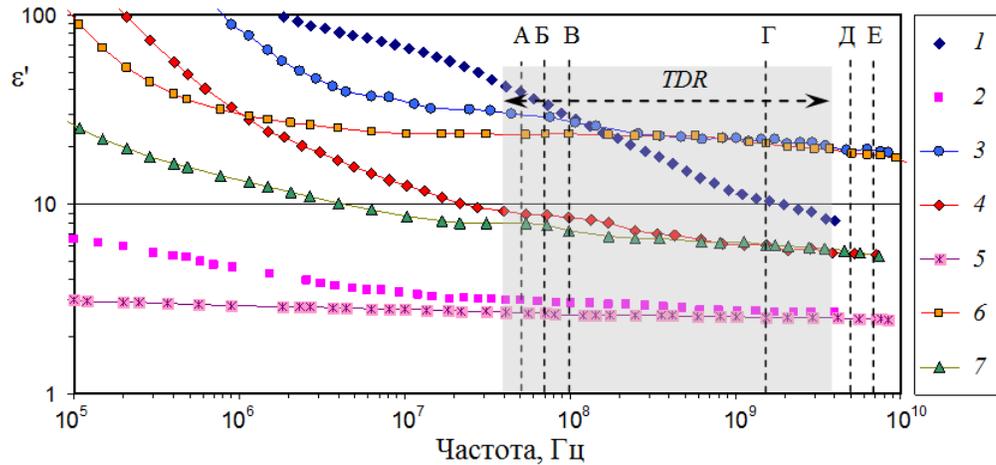


Рис.4

- В системе DTS используются линейные датчики температуры на основе волоконно-оптических кабелей, длиной до нескольких километров. Результатом является непрерывный профиль температуры по всей длине датчика.
- DTS использует эффект комбинационного рассеяния для измерения температуры. Оптический лазерный импульс, отправленный через волокно, вызывает рассеяние света, анализ которого позволяет оценить температуру вдоль волокна (рис. 4). Интенсивность сигнала Raman anti-Stokes изменяется с изменением температуры. Место измерения температуры определяется путем измерения времени прибытия возвращающегося светового импульса, аналогичного радиолокационному эхо.
- Используется зависимость теплопроводности и теплоёмкости почвы от влажности. Вдоль кабеля DTS, погруженного в почву, происходит нагрев почвы в течение некоторого времени, после чего определяется температура. При более высокой влажности температура почвы меньше.

Метод DTS дает потенциал для непревзойденного пространственного разрешения (< 1 м) в долгосрочном мониторинге влажности почвы на полевых масштабах (> 100 м). В лабораторных условиях получена погрешность измерения $0,04 \text{ м}^3/\text{м}^3$

Электромагнитные методы используют зависимость диэлектрической проницаемости почв от влажности



Частотные зависимости действительной части КДП.
 1, 2 – бентонит; 3,4,5 – суглинок; 6,7 – речной песок
 Влажности 1 – 0,282; 2 – 0,002; 3 – 0,359; 4 – 0,108; 5 – 0,006; 6 – 0,351; 7 – 0,095.
 Штриховыми линиями указаны частоты, на которых работают измерители влажности;
 А – HydraProbe (50 МГц); В – 5ТЕ, 10HS (70 МГц); В – ThetaProbe (100 МГц);
 Г – SMOS (1,4 ГГц); Д – Sentinel-1 (5 ГГц); Е – GCOM-1W (6,9 ГГц)

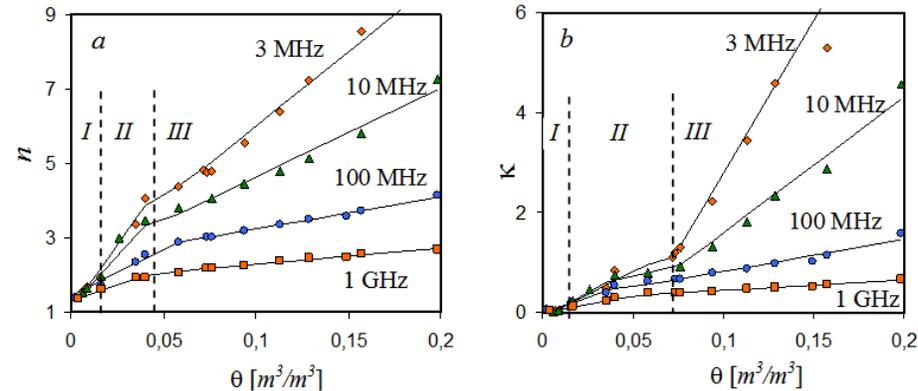
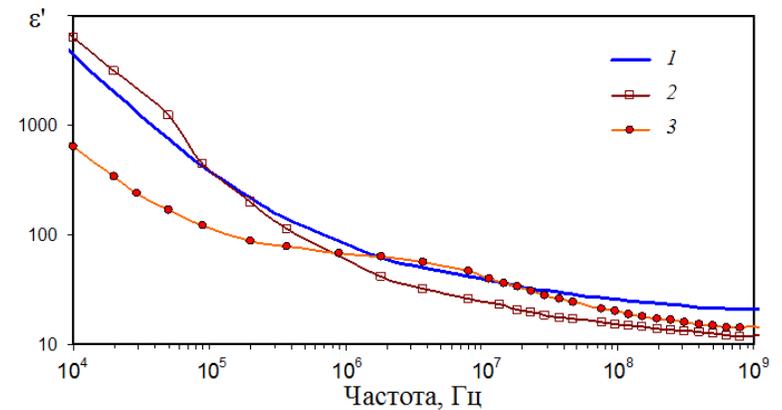


Рис. 3. Зависимость действительной и мнимой частей показателя преломления бентонитовой глины в зависимости от влажности. Вертикальные штриховые линии разделяют области с разными свойствами связанной воды



Влияние релаксационных процессов.
 1 – черноземы при влажности 0,40 м³/м³;
 2 – образец, богатый гумусом, при влажности 0,290 м³/м³;
 3 – образец с малым содержанием гумуса при влажности 0,257 м³/м³

Мониторинг влажности почв с использованием сигналов GPS

- Система GPS использует частоты L-диапазона (1,57542 и 1,22760 ГГц), которые оптимальны для зондирования воды в окружающей среде. Для условий открытой почвы коэффициент отражения зависит от диэлектрической проницаемости почвы, шероховатости поверхности и угла возвышения спутника. Антенны и приемники GPS могут быть установлены на спутниках или на самолетах а также могут быть установлены довольно близко к поверхности земли. Наземные исследования GPS используют интерференцию прямых и отраженных сигналов GPS.

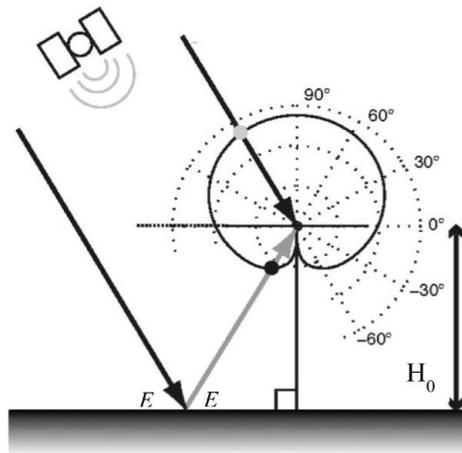


Рис. 3. Схема приходящих сигналов, для высоты антенны (H_0) и угла возвышения спутника (E). Сплошная линия представляет диаграмму направленности антенны. Пунктирные окружности указывают на относительные уровни усиления.

Для случая типичной высоты геодезической антенны 2 м, центр зоны отражения варьируется от 25 м под углом возвышения от 5° до 5 м при угле возвышения 30° . Большие зоны отбора проб могут быть достигнуты путем повышения антенны до высоты ~ 100 м. Поскольку GPS является созвездием > 30 спутников, различные спутники GPS проходят над местом измерения влажности почвы в течение дня. В лучших случаях может быть сделано более 60 оценок влажности почвы в день.

Были разработаны два метода зондирования влажности GPS. Первый основан на использовании GPS-инструментов, предназначенных для геодезистов. Однако эти инструменты GPS также измеряют мощность сигнала или отношение сигнала к шуму (SNR). На эффект прямого сигнала вкладывается интерференционные полосы, вызванные отраженным сигналом. Частота SNR в первую очередь обусловлена высотой антенны над землей. По мере изменения диэлектрической проницаемости почвы изменяются амплитуда, фаза и частота интерферограммы SNR. Из трех параметров фаза SNR является наиболее полезной для оценки влаги почвы. Фаза линейно изменяется в зависимости от влажности поверхности почвы. Для большинства условий фаза обеспечивает хорошую оценку средней влажности почвы в верхних 5 см.

Второй метод зондирования влажности использует антенну с двойной поляризацией, т.е. измеряет вертикально и горизонтально поляризованные сигналы отдельно, что невозможно с использованием стандартных геодезических инструментов. Угол подъема спутника, при котором отражательная способность вертикально поляризованного сигнала приближается к нулю, то есть, угол Брюстера, варьируется в зависимости от влажности почвы. Получены значения $RMSE < 0,03 \text{ м}^3/\text{м}^3$

Микроволновая радиометрия

В радиометрическом зондировании используется собственное тепловое излучение тел. Это излучение является равновесным и в микроволновом диапазоне волн, где $h\nu \ll kT$ описывается соотношением Релея – Джинса для абсолютно черного тела (АЧТ):

$$B^{AЧТ}(\nu, T) = 2kT\nu^2/c^2,$$

где $B_\nu(T)$ – яркость излучения, T – температура АЧТ.

Яркость нечерных тел ,

$$B(\nu, T) = \chi B^{AЧТ}(\nu, T)$$

где χ – коэффициент излучения тела, нагретого до температуры T ($\chi \leq 1$).

Под радиояростной температурой произвольного тела понимается такая температура АЧТ, при которой его яркость на определенной частоте равна яркости рассматриваемого тела

$$B(\nu, T) = B^{AЧТ}(\nu, T_{\text{я}}) \qquad B(\nu, T_{\text{я}}) = \chi B^{AЧТ}(\nu, T)$$

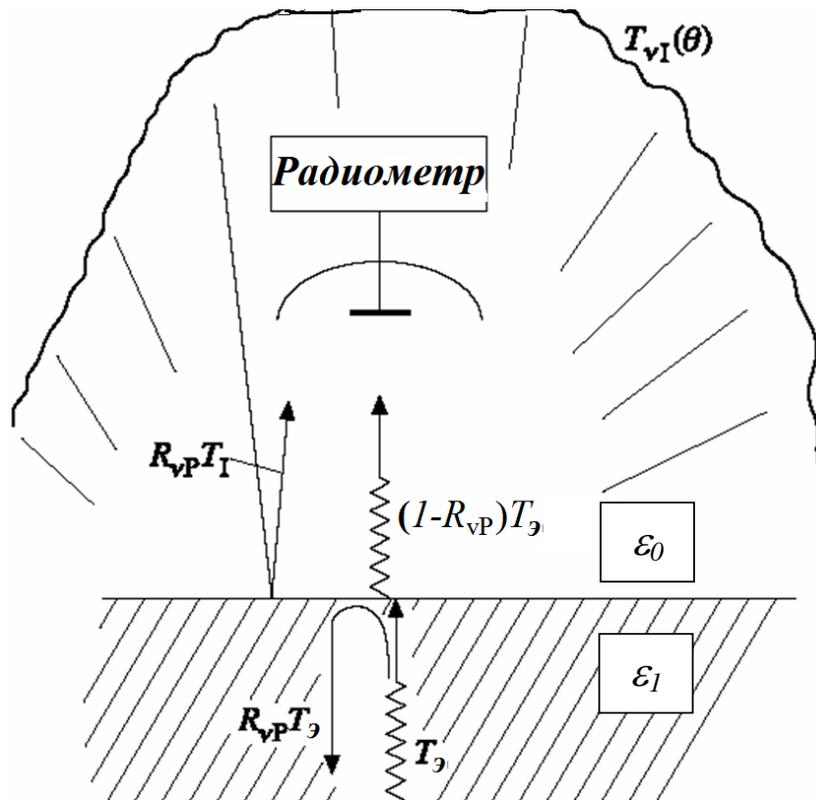
$$T_{\text{я}} = \chi T$$

Закон Кирхгофа $\chi + R = 1$, следовательно $\chi = 1 - R$,

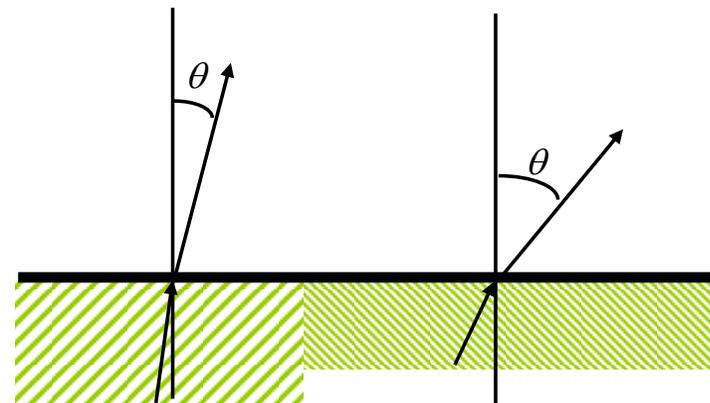
Для неизотермических тел:

$$T_{\text{я}} = (1 - R)T_{\text{эф}},$$

где $T_{\text{эф}}$ – эффективная температура излучающего слоя, толщина которого сопоставима с толщиной скин-слоя. Для изотермической (однородно нагретой) среды $T_{\text{эф}} = T$.



Формирование
радиотеплового излучения и
толщина излучающего слоя
(глубина зондирования)



$$R_{\Gamma\Pi} = \left(\frac{\sqrt{\dot{\epsilon}_0} \cos \theta_0 - \sqrt{\dot{\epsilon}_1 - \epsilon_0 \sin^2 \theta_0}}{\sqrt{\dot{\epsilon}_0} \cos \theta_0 + \sqrt{\dot{\epsilon}_1 - \epsilon_0 \sin^2 \theta_0}} \right)^2$$

$$R_{B\Pi} = \left(\frac{\epsilon_1 \cos \theta - \sqrt{\epsilon_0 (\epsilon_1 - \epsilon_0 \sin^2 \theta)}}{\epsilon_1 \cos \theta + \sqrt{\epsilon_0 (\epsilon_1 - \epsilon_0 \sin^2 \theta)}} \right)^2$$

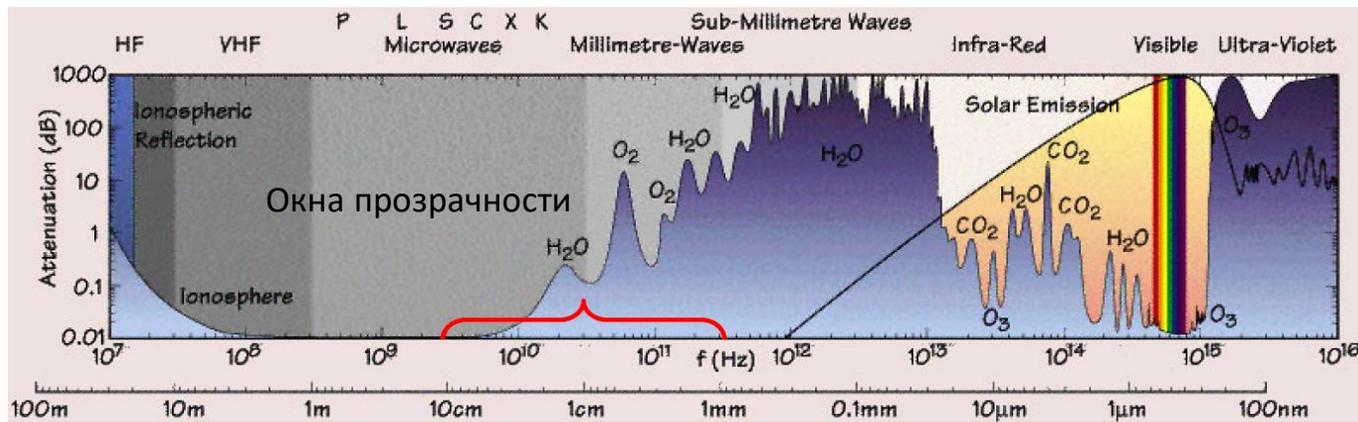


Рис. Поглощение электромагнитных волн в атмосфере

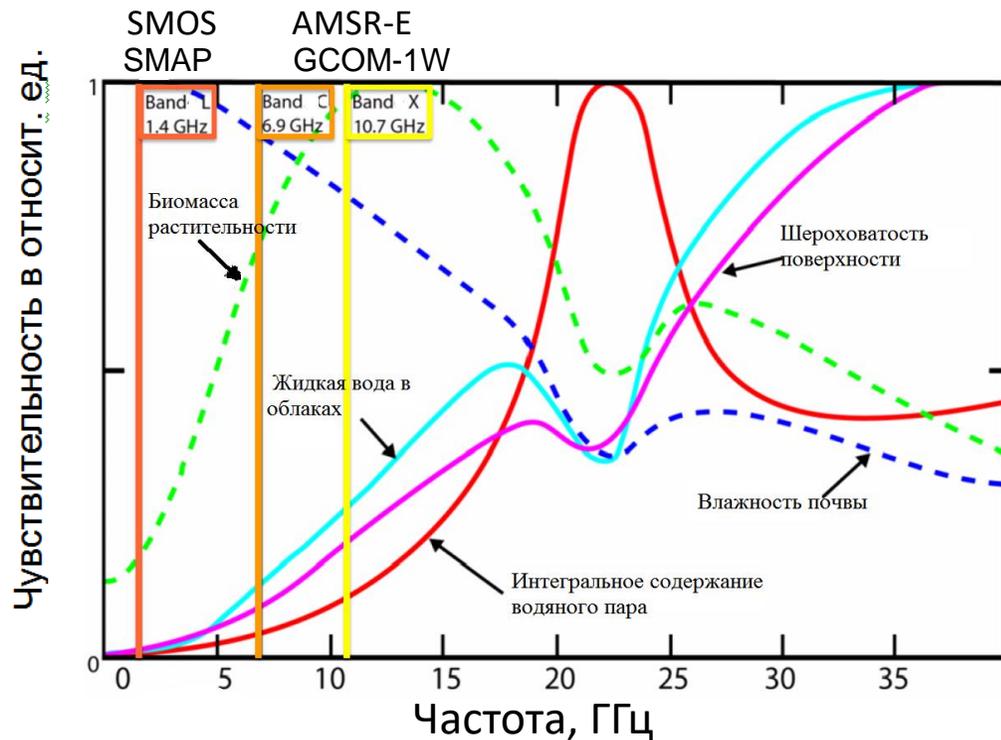


Рис. Влияние характеристик земных объектов на тепловое излучение в разных диапазонах частот

SMOS (Soul Moisture and Ocean Salinity)

Основным инструментом КА SMOS является 2-D интерферометрический радиометр MIRAS работающий на частоте 1,4 ГГц. Конструктивные особенности MIRAS позволяют получать радиометрические снимки, имеющие среднее разрешение 50 км при высоте орбиты в 755 км (вблизи центра кадра порядка 32 км). Антенна радиометра имеет 3-х сегментную Y-образную форму, на поверхности которых расположено 69 приёмных элементов (рис.). Двумерный интерферометр позволяет измерять Тя под несколькими углами падения с полной поляризацией. Такой инструмент мгновенно записывает целую сцену. По мере движения спутника заданная точка в двумерном поле зрения наблюдается с разных углов обзора (рис.). Максимальный промежуток времени между съемками 3 дня как для восходящих, так и для нисходящих проходов.

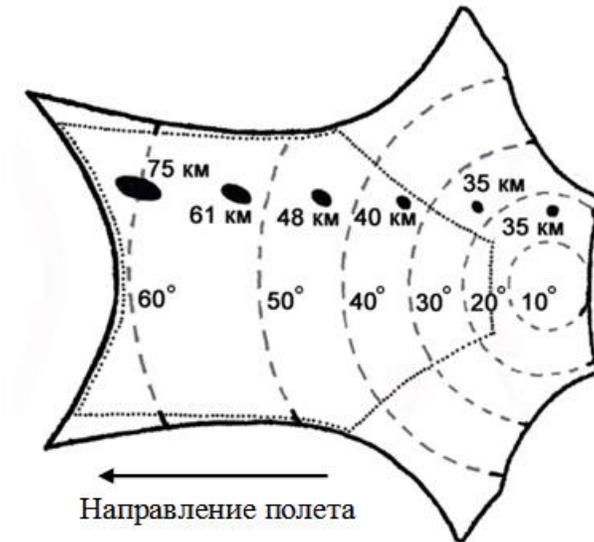


Рис. Контур радиометрического снимка SMOS. Пунктирный непрерывный контур – область более высокой точности измерений. Штриховые линии – изолинии для соответствующих углов зондирования. Черные эллипсы – характерный размер пикселя радиометрического снимка для данного угла зондирования

Данные SMOS и прямых наземных измерений, полученные 26. 04. 2014

№ участка	СП, градусы	ВД, градусы	$W, \text{м}^3/\text{м}^3$			
			SMOS	Термостатно-весовой метод		
				0-1 см	1-2 см	2-7 см
1	54,682	73,17	0,237	0,132	0,135	0,275
2	54,748	73,384	0,274	0,110	0,194	0,294
3	54,464	73,711	0,197	0,113	0,169	0,268
4	54,262	73,468	0,160	0,159	0,153	0,227
5	54,188	73,646	0,207	0,216	0,200	0,280
6	53,979	73,791	0,218	0,105	0,068	0,154

Одной из основных проблем при использовании данных SMOS является то, что пространственной объем составляет примерно 40 км на 40 км на 5 см. Это не является идеальным для некоторых применений. Значительная горизонтальная пространственная изменчивость влажности почвы может возникнуть в пределах SMOS –следа, попадающего в один пиксель.

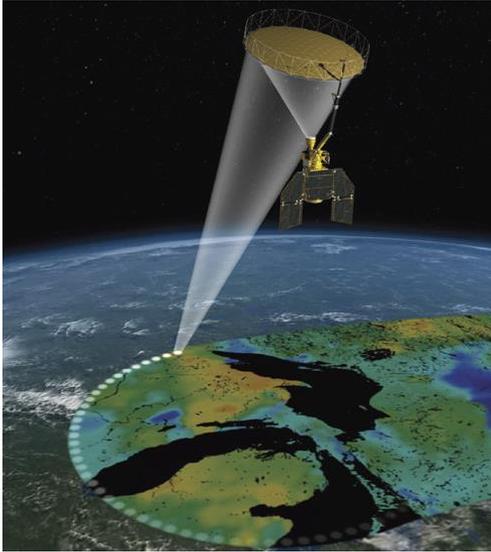
Был достигнут некоторый прогресс для получения точных оценок влажности почвы с более высоким пространственным разрешением с использованием данных SMOS вместе с данными из спектрорадиометра умеренного разрешения. Получены оценки влажности поверхности почвы с разрешением до 1-4 км.

Для прогнозирования влажности в более глубоких слоях разрабатываются и совершенствуются гидрологические модели, включающие данные спутниковых измерений (напр. SWAT).

SMOS	$W, \text{м}^3/\text{м}^3$		
	Термостатно-весовой		
	0-1 см	1-2 см	2-7 см
0,088	0,083	0,140	0,288
0,104	0,063	0,176	0,265
0,092	0,055	0,164	0,258
0,100	0,096	0,142	0,280
0,070	0,049	0,085	0,161
0,041	0,039	0,078	0,249

Данные SMOS и прямых наземных измерений, полученные 14. 05. 2014

Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission



Аппарат запущен в январе 2015 г. Первоначально предполагалось, что аппарат будет содержать радар и радиометр, но радар отказал на самом начальном этапе. Предполагалось дать оценки влажности почвы при пространственном разрешении 10 км в верхнем слое почвы 5 см с ошибкой 0,04 м³/м³. Оставшийся радиометр обеспечивает пространственное разрешение 40 км. Инструмент имеет вращающуюся 6-метровую антенну, обеспечивающую полосу захвата шириной 1000 км методом конического сканирования с периодичностью съемки раз в 3 дня. Радиометр включает в себя функцию ослабления радиопомех.

SMAP system characteristics

Characteristic	Radar	Radiometer
Frequency	1.2 GHz	1.41 GHz
Polarizations	VV, HH, HV	V, H, U
Resolution	1-3 km ^[a]	40 km
Antenna diameter	6 m	
Rotation rate	14,6 rpm	
Incidence angle	40°	
Swath width	1000 km	
Orbit	Near Polar, Sun-synchronous	
Local time des. node	06:00	
Local time asc. node	06:00	
Altitude	685 km	



а



б

Микрополосковая антенна: (а) установлена на башне во время измерения излучения неба;
(б) установлена на беспилотнике во время измерений излучения почв

D. Houtz, R. Naderpour and M. Schwank, Portable L-Band Radiometer (PoLRa): Design and Characterization // Remote Sens. 2020, 12, 2780; doi:10.3390/rs12172780

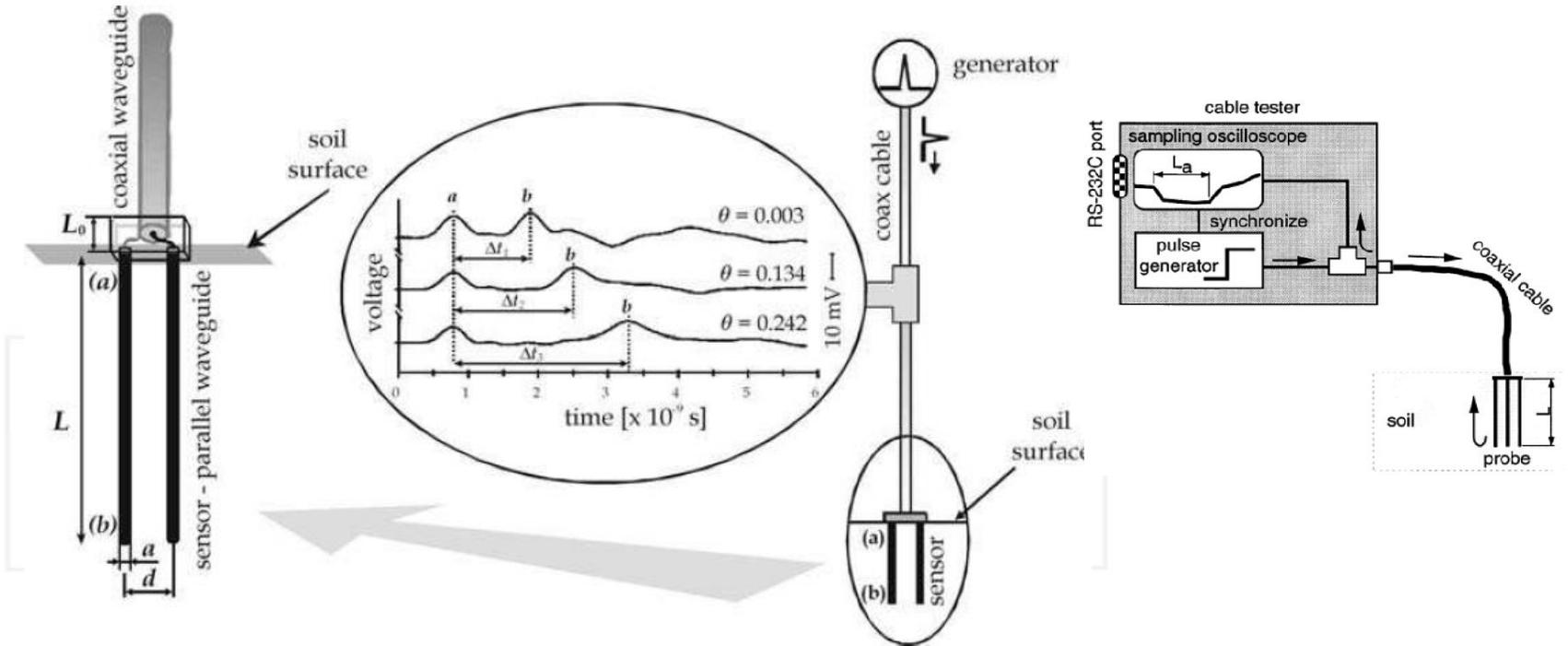


Рис. 5. Радиометрическая установка в с. Гвоздевка Омской обл. в 2011–12 гг (а) и в 2013–14 гг. (б)

Time Domain Reflectometry



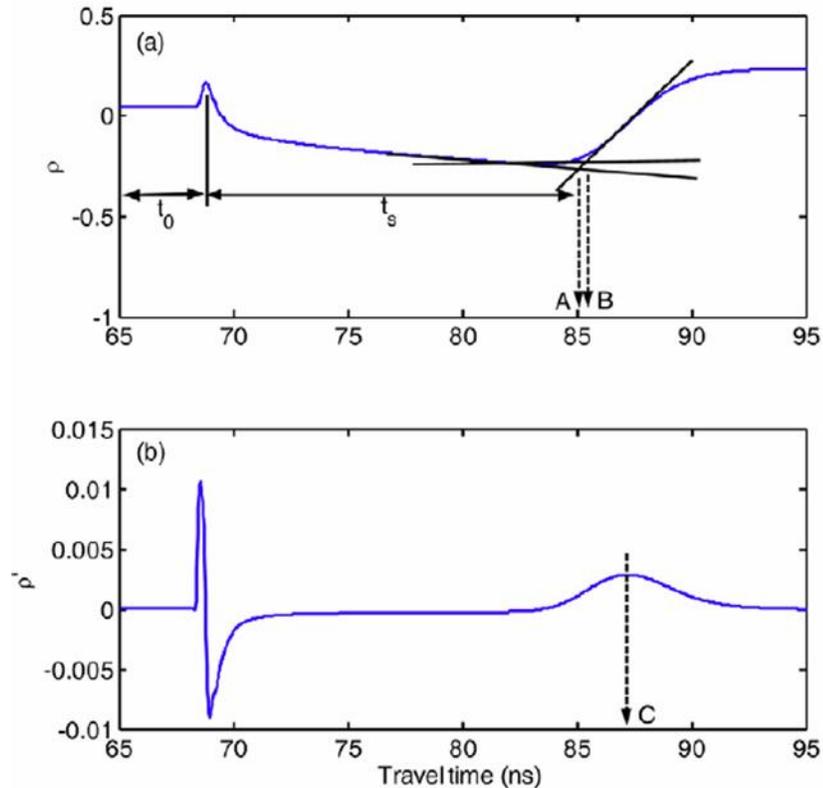
The TDR-150 is an example of a time domain reflectometry soil moisture measurement device.



$$t = 2Ln/c$$

Здесь n – показатель преломления почвы,
 c – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме.

Time Domain Reflectometry



Способы определения времени распространения импульса в датчике.

Определение момента прихода отраженного импульса по методу двух касательных (точка A на верхнем рис.) и по методу одной касательной (точка B).

Частотный спектр импульса зависит от скорости нарастания напряжения в импульсе и его длительности и составляет примерно от 10 МГц до 1 ГГц. Верхняя частота спектра отраженного сигнала зависит от длины зонда, качества конструкции зонда, качества соединителя и от диэлектрических свойств почвы и в сухих почвах достигает 3 ГГц, а во влажных почвах уменьшается примерно до 400 МГц.

Метод TDR прекрасно работает на слабглинистых почвах по причине слабой дисперсии диэлектрической проницаемости в используемом частотном диапазоне. Сложность метода анализа данных, а также высокочастотные схемы, необходимые для записи точного времени отражения делают датчики дорогими. Датчики TDR, обеспечивающие точность определения влажности в пределах $\pm 2\%$, могут стоить от 1500 до 7500 долларов США (включая считыватель данных).

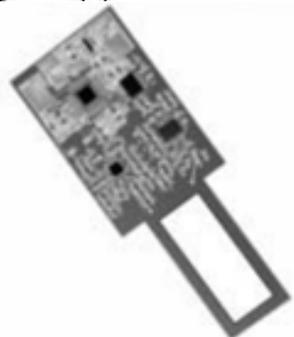
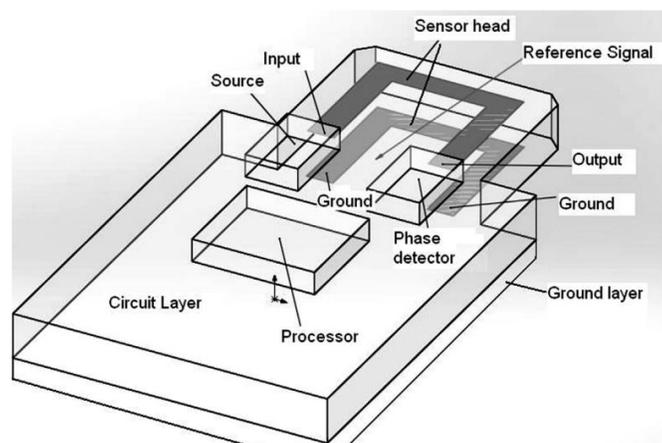
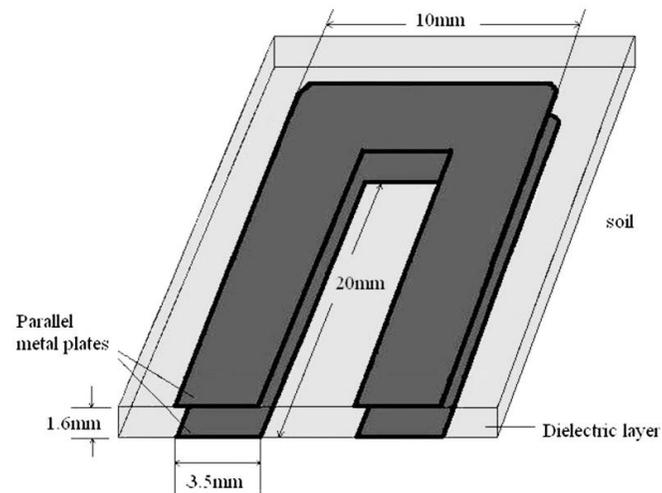


- В другом варианте измеряется время прохождения импульса от генератора до приемника в двухпроводной линии, имеющей форму петли. Метод называется Time Domain Transmissometry (**TDT**). Основным преимуществом метода TDT является его нечувствительность к паразитным многократным отражениям импульса, что приводит к более высокой точности измерений и меньшим требованиям к электронике [40]. Методы TDR и TDT прекрасно работают на слабоглинистых почвах по причине слабой дисперсии диэлектрической проницаемости в используемом частотном диапазоне от 10 – 100 МГц до 1 – 3 ГГц.

Метод измерения фазового сдвига в линии из параллельных пластин

Датчик использует линию передачи из параллельных пластин. Измеряется фазовый сдвиг сигнала, проходящего через диэлектрик, помещенную в почву. Амплитуда сигнала передачи является функцией проводимости и мнимой части диэлектрической проницаемости, тогда как фаза в первую очередь является функцией действительной части диэлектрической. Электроника измеряет только фазовый сдвиг, который и служит для непосредственного получения информации о влажности почвы.

Датчики работают при 1–2,4 ГГц. По сравнению с другими датчиками влаги, такими как TDR и CP, преимуществами являются низкая стоимость, низкое энергопотребление и простота использования. Электроника позволяет передавать информацию без проводов.



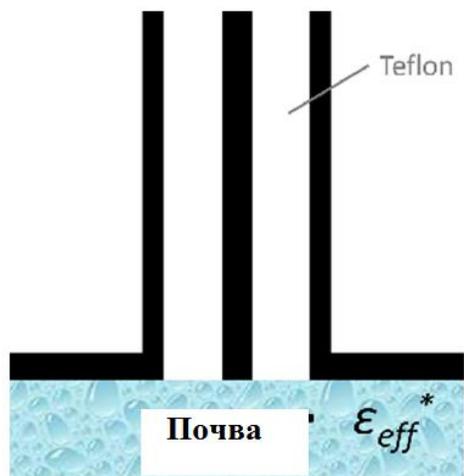
Ячейка на основе симметричной полосковой линии



Измеряется фазовый сдвиг и ослабление (параметр S_{12}), что позволяет измерить действительную и мнимую части КДП ($\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon''$) в диапазоне частот от 60 МГц до 2 ГГц с погрешностью по ϵ' в 2% и по ϵ'' в 6%.
Измерение коэффициента отражения при разомкнутом выходе позволяет измерять КДП на частотах от 50-100 кГц до 5-10 МГц.
Тонкие наружные и внутренний проводники обеспечат минимальное воздействие на почву.

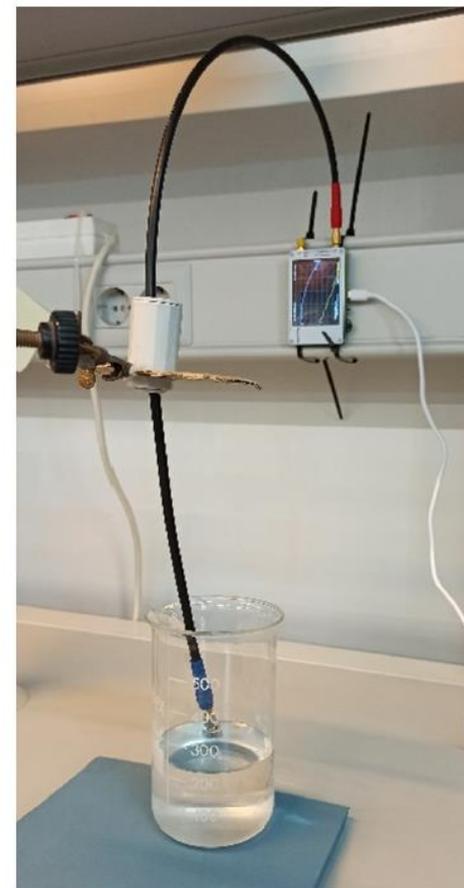
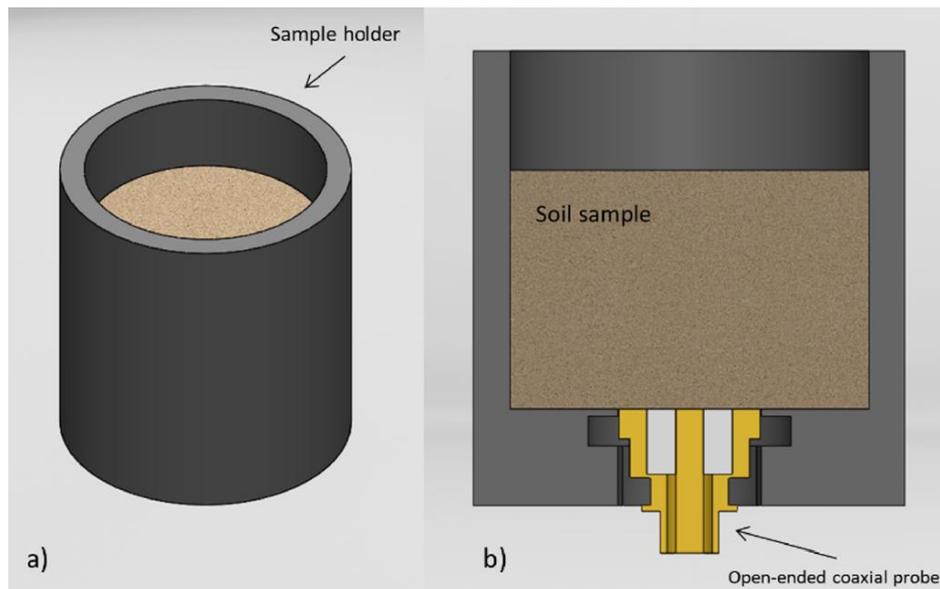


Открытый конец коаксиальной линии



$$\epsilon^*(f) = \frac{c_1^*(f)S_{11}^*(f) - c_2^*(f)}{c_3^*(f) - S_{11}^*(f)}$$

где $C_1^*(f)$, $C_2^*(f)$ и $C_3^*(f)$ являются частотными комплексными коэффициентами, определяемыми при калибровке по воздуху, воде и другой эталонной жидкости.

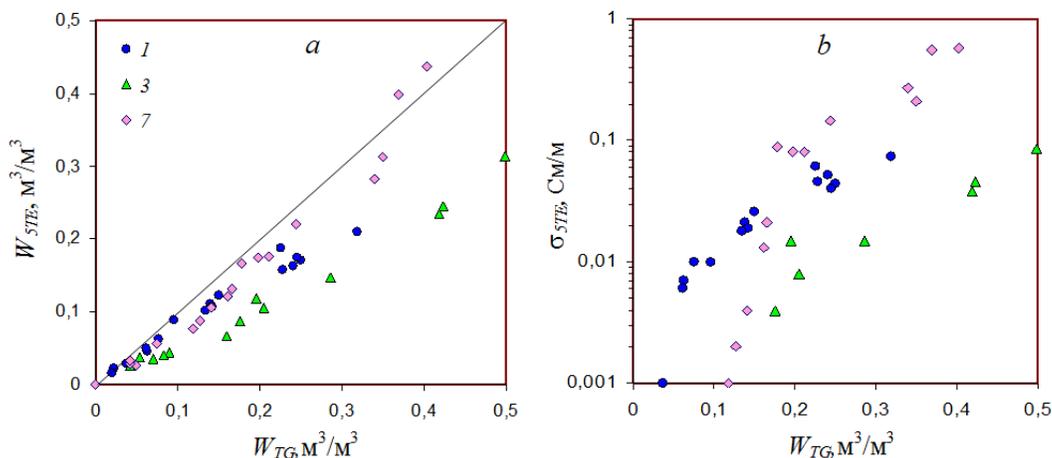


Ёмкостные датчики

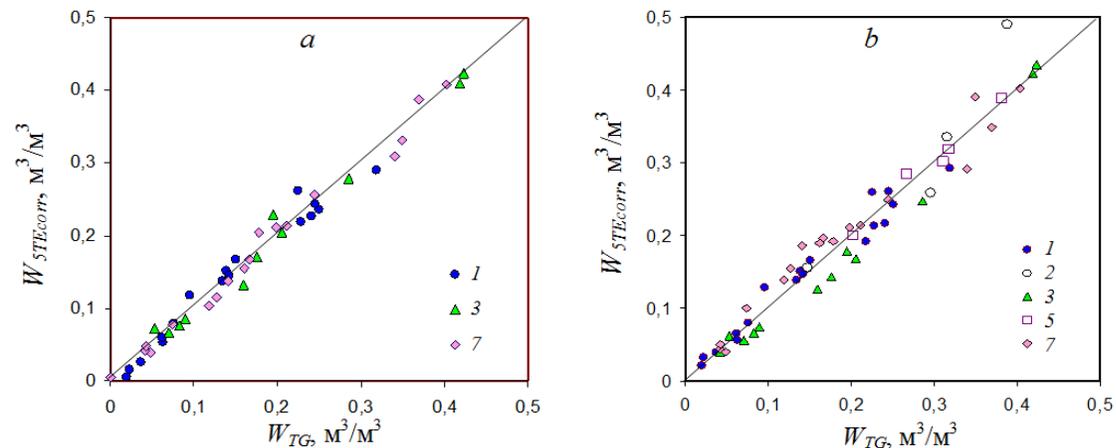


В литературе описаны также ёмкостные датчики, измеряющие влажность на относительно низких частотах от 5 до 150 МГц. Некоторые датчики, например Hydra Probe и 5TE (частота 70 МГц) измеряют также удельную проводимость (УЭП). Достоинством ёмкостных датчиков является меньшая стоимость, чем у датчиков TDR и TDT, однако они более чувствительны к влиянию диэлектрической релаксации, проявляющейся в глинистых почвах на частотах ниже 300-500 МГц, и проводимости.

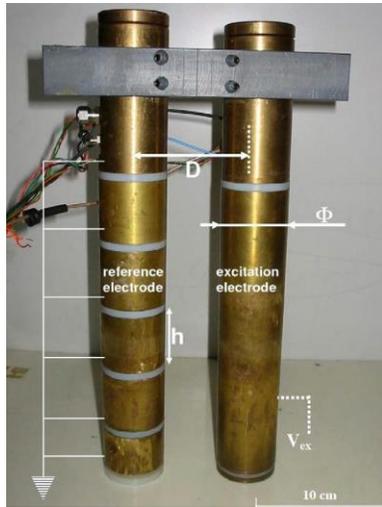
Установлено, что предельное значение УЭП в этих датчиках равно 0,17- 0,18 См/м. Были попытки корректировки показаний с учетом температуры и проводимости. Удалось снизить погрешность измерений только для почв с УЭП не более 0,1 См/м.



Результаты измерения влажности (a) и проводимости (b) при заводской калибровке



Результат корректировки данных 5TE по индивидуальным калибровочным зависимостям (a) и по найденной для трех почв калибровочной зависимости с учетом проводимости (b) Слайд 23



Датчик погружается в почву и работает в качестве измерителя импеданса в диапазоне 1 - 20 МГц. Датчик состоит из двух цилиндрических электродов длиной 360 мм и $\Phi = 50$ мм в диаметре; Электроды разделены расстоянием $D = 90$ мм между осями. Опорный электрод разделен вертикально на равные части высоты $H = 45$ мм (четыре промежуточных ролика, называемые каналами, оба конца служат для ограничения электрического поля), электрически изолированные друг от друга. Напряжение V_{ex} прилагается между двумя электродами, которые были охарактеризованы в среде. Для измерения комплексного импеданса на разных высотах используется электронная плата, помещенная внутри заземляющего электрода.



	<p>Gravity: Analog Waterproof Capacitive Soil Moisture Sensor</p> <p>\$18.90</p> <p>SKU:SEN030H</p> <p>Add to Cart ♥ In Stock</p>		<p>Gravity: Analog Capacitive Soil Moisture Sensor- Corrosion Resistant</p> <p>\$5.90</p> <p>SKU:SEN0193</p> <p>Add to Cart ♥ In Stock</p>
	<p>Gravity: Analog Soil Moisture Sensor For Arduino</p> <p>\$2.70</p> <p>SKU:SEN0114</p> <p>Add to Cart ♥ In Stock</p>		<p>Digital Temperature & Humidity Sensor (With Stainless Steel Probe)</p> <p>\$29.50</p> <p>SKU:SEN0148</p> <p>Add to Cart ♥ In Stock</p>

ВЫВОДЫ

Бурно развивающийся рынок электромагнитных датчиков предлагает чрезвычайно широкий спектр датчиков разной стоимости, различного качества и точности измерений.

Контактные встраиваемые датчики, работающие на частотах ниже 70-100 МГц, имеют низкую точность измерения из-за сильной дисперсии диэлектрической проницаемости, особенно в глинистых почвах. В почвах с высоким содержанием глины при увлажнении наблюдается набухание, а при высыхании – усадка. Вокруг активной части датчика, используемого для долговременных измерений, могут возникать воздушные зазоры, которые при выпадении осадков заполняются водой. В обоих случаях диэлектрическая проницаемость почвы определяется неправильно.

В дистанционном зондировании влажности почвы существуют проблемы с их проверкой и калибровкой на основе наземных эталонных измерений из-за различий в глубине зондирования дистанционным методом и контактными датчиками, а также из-за несоответствий масштабов их зон измерения..

Наконец, остающейся серьезной проблемой дистанционного зондирования является точная оценка влажности почвы в корневой зоне на основе информации о влажности приповерхностной почвы, полученной дистанционным зондированием. Наиболее часто применяемый метод получения данных о влажности почвы в корнеобитаемой зоне по данным спутникового дистанционного зондирования — это ассимиляция приповерхностных измерений, например, в модели движения почвенной влаги.

Список литературы

1. J.-P. Frangi, et al. New in situ techniques for the estimation of the dielectric properties and moisture content of soils. // **C. R. Geoscience** 341 (2009) 831–845.
2. K. C. Lawrence., Funk D. B., Windham W. R. Dielectric moisture sensor for cereal grains and soybeans // **Trans. ASAE**. 2001. 44(6). 1691–1696. DOI:10.13031/2013.6979
3. M. Hardie, Review of Novel and Emerging Proximal Soil Moisture Sensors for Use in Agriculture.// **Sensors**. 2020, 20, 6934; doi:10.3390/s20236934
4. J. D. González-Teruel, et al., Design and Calibration of a Low-Cost SDI-12 Soil Moisture Sensor//**Sensors**. 2019, 19, 491; doi:10.3390/s19030491
5. K. C. Dimitrov, et al., Interdigital Capacitor-Based Passive LC Resonant Sensor for Improved Moisture Sensing // **Sensors** 2020, 20, 6306; doi:10.3390/s20216306
6. T. E. Ochsner et al., State of the Art in Large-Scale Soil Moisture Monitoring // **Soil Sci. Soc. America J.** 2013. doi:10.2136/sssaj2013.03.0093
7. M. Tuller, Babaeian, E.; Jones, S.; Montzka, C.; Sadeghi, M.; Vereecken, H. The Paramount Societal Impact of Soil Moisture. **Eos**. 2019, 100.
8. H. Xing, Jing L., Richard L. 2.4GHz On-Board Parallel Plate Soil Moisture Sensor System / **SIcon/05 – Sensors for Industry Conference Houston**, Texas, USA, 8-10 February 2005. DOI:10.1109/SICON.2005.257866
9. D. Canone, M. Previa, S. Ferraris, and R. Haverkamp, A New Coaxial Time Domain Reflectometry Probe for Water Content Measurement in Forest Floor Litter // **Vadose Zone J.** Vol. 8, No. 2, 2009. 363–372
10. S.S.U. Lekshmi, Singh D.N., Baghnic M. S. A critical review of soil moisture measurement // **Measurement**. 54. 2014. 92-105.
11. D. A. Robinson, S. B. Jones, J. M. Wraith, D. Or, and S. P. Friedman, A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils Using Time Domain Reflectometry // **Vadose Zone Journal**. 2: 2003. 444–475.
12. J. M. Blonquist, Jr., S. B. Jones, and D. A. Robinson, Standardizing Characterization of Electromagnetic Water Content Sensors: Part 2. Evaluation of Seven Sensing Systems // **Vadose Zone Journal** 4:1059-1069 (2005). doi:10.2136/vzj2004.0141
13. H. R. Bogaen et al., Effective Calibration of Low-Cost Soil Water Content Sensors // **Sensors**. 2017, 17, 208; doi:10.3390/s17010208
14. G. K. Ganjegunte, Z. Sheng, J. A. Clark, Evaluating the accuracy of soil water sensors for irrigation scheduling to conserve freshwater // **Appl. Water Sci.** (2012) 2:119–125 DOI 10.1007/s13201-012-0032-7
15. Y. Gong, et al., The effects of soil bulk density, clay content and temperature on soil water content measurement using time-domain reflectometry // **Hydrol. Process**. 17, 3601–3614 (2003). DOI: 10.1002/hyp.1358
16. G. Kargas and K. X. Soulis, Performance Analysis and Calibration of a New Low-Cost Capacitance Soil Moisture Sensor // **J. of Irrigation and Drainage Engin.**, Vol. 138, No. 7, 2012. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000449
17. T.J. Kelleners, R.W.O. Soppe, D.A. Robinson, M.G. Schaap, J.E. Ayars, T.H. Skaggs. Calibration of capacitance probe sensors using electric circuit theory // **Soil Sci. Soc. Am. J.** 2004. 68:430–439.
18. C. Guo et al., Development and Field Testing of a Parallel-Plate Transmission Line Moisture Sensor // **J. Environ. and Engineering Geophys.** 2014, Vol. 19, No. 4, pp. 249–257. DOI: 10.2113/JEEG19.4.249
19. Bobrov P. P., Belyaeva T. A., Kroshka E. S., Rodionova O. V. Soil Moisture Measurement by the Dielectric Method // **Eurasian Soil Science**, Vol. 52, No. 7, P. 822–833. 2019. <https://doi.org/10.1134/S106422931905003X>
20. Belyaeva T.A., Bobrov P.P., Kroshka E.S., Lapina A.S., Rodionova O. V. The effect of very low water content on the complex dielectric permittivity of clays, sand-clay and sand rocks // **Measurement Science and Technology**. V. 28. 2017. 014005 (8pp) doi:10.1088/1361-6501/28/1/014005
21. D. B. Funk, Z. Gillay, Dielectric reference materials for mathematically modeling and standardizing grain moisture meters // **Transactions of the ASABE**. 2010. v.53. no.1. pp. 271-281.
22. J. G. Evans et al., Soil water content in southern England derived from a cosmic-ray soil moisture observing system – COSMOS-UK // **Hydrol. Process**. 2016. DOI: 10.1002/hyp.10929

Спасибо за внимание!