

УДК 631.471

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ВЛАЖНОСТИ

© 2021 г. И. Ю. Савин<sup>a, b, \*</sup>, Г. В. Виндекер<sup>a, c</sup>

<sup>a</sup>Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

<sup>b</sup>РУДН, ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198 Россия

<sup>c</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: savin\_iyu@esoil.ru

Поступила в редакцию 09.10.2019 г.

После доработки 26.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

Целью исследований явился анализ связи спектральной отражательной способности поверхности почв с содержанием в образцах почв влаги как основы детектирования влажности почв по данным дистанционного зондирования. На примере лабораторного исследования девяти образцов пахотного горизонта черноземов оподзоленных, серых лесных и дерново-подзолистых почв изучена связь спектральной отражательной способности их поверхности в видимой области спектра, определенной с помощью спектрорадиометра HandHeld-2, с содержанием влаги в образце. Установлено, что изменение влажности почв приводит к синхронному изменению интегрального отражения в видимой области спектра лишь в достаточно узких интервалах содержания влаги, которые специфичны для разных почв. Изменение влажности почв в интервалах за пределами этого диапазона не приводит к изменению спектральной отражательной способности почв. На основе полученных результатов можно утверждать, что большинство данных спутниковой съемки в оптическом диапазоне фиксируют нахождение открытой поверхности почв в сухом состоянии, хотя сам пахотный горизонт может при этом быть достаточно влажным. Эти закономерности необходимо учитывать при создании спутниковых технологий оперативного мониторинга влажности почв по данным, получаемым в оптическом диапазоне электромагнитных волн.

*Ключевые слова:* спектральная отражательная способность, бесконтактные методы изучения почв, дистанционное определение влажности почв

DOI: 10.31857/S0032180X21070121

### ВВЕДЕНИЕ

Влажность является одним из основных агрономически важных свойств почв. Большое практическое значение имеет информация о содержании влаги в пахотном горизонте и корнеобитаемом слое почвы [4]. Во многом именно содержание влаги в почвах предопределяет урожайность сельскохозяйственных культур [23]. Особенно актуальна точная информация о влажности почв, прогноз ее изменений приобретает значение в период наблюдаемых изменений климата [16, 22].

Содержание влаги в почвах предопределяет также протекающие в почвах процессы и направленность их изменений [9]. Многие из них оказывают значительное влияние на многие функции и сервисы почв [1]. Именно поэтому измерению и мониторингу этого параметра почв всегда уделялось большое внимание.

Традиционно влажность почв определяют весовым методом (отбором в поле образцов почв в

бюксы, их высушиванием в печи и взвешиванием) [8]. Более технически продвинутые методы базируются на использовании специальных полевых датчиков и тензиометров [13, 20]. В последние годы разрабатываются методы бесконтактного определения содержания влаги в почвах, основанные на использовании георадарного оборудования [2, 3, 24, 25].

Наиболее востребована практикой оперативная информация о содержании влаги в почвах для больших территорий (полей, хозяйств, регионов и т. д.). Перечисленными методами можно получить данные об этом свойстве почв лишь в отдельных точках. Для перехода от точечных измерений к пространству обычно точки измерений принимаются в качестве репрезентативных или используются в качестве основы для интерполяции на другие территории. Но это, как правило, приводит к значительным ошибкам, сложности и затратности оценки качества подобной интерпо-

ляции так как почвенная карта часто не может служить надежным источником данных о влажности верхних горизонтов почв. Кроме того, содержание влаги в почвах часто не связано с их классификационным названием и соответственно с выделами почвенной карты.

Цвет почв сильно зависит от содержания в них влаги. Это известно со времен зарождения почвоведения как науки. Именно поэтому цвет является одним из основных свойств, используемых при полевом описании профиля почв [5, 6].

Сразу же после появления дистанционных методов, основанных на использовании данных аэро- и космической съемки, исследователи стали делать попытки детектирования по ним влажности почв.

В начале развития этих методов использовалась информация, получаемая в оптическом диапазоне спектра электромагнитных волн [21, 28, 29]. Позднее, с развитием дистанционных технологий, началось исследование информативности данных, полученных в инфракрасном и микроволновом диапазонах, которые теоретически более пригодны для детектирования содержания влаги в почвах [14, 18, 27].

В настоящее время предпринимаются попытки оперативного мониторинга влажности почв на основе данных спутниковой съемки как на глобальном, так и на региональном уровнях [12, 17, 19, 30]. Но до сих пор надежные и оперативные методы спутникового мониторинга влажности почв не созданы. Их разработка активно ведется на основе данных микроволновой, инфракрасной и оптической съемки.

Цель исследований — анализ связи спектральной отражательной способности поверхности почв с содержанием в их поверхностном горизонте влаги как физической основы детектирования этого свойства по данным дистанционного зондирования.

## ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Объект исследований — образцы из пахотного горизонта чернозема оподзоленного (Серебряно-Прудский район Московской области), серой лесной почвы (Ясногорский район Тульской области) и дерново-подзолистой почвы (Домодедовский район Московской области). Названия почв определены по крупномасштабным почвенным картам хозяйств, созданным сотрудниками ГИПРОЗЕМ в конце 80-х годов прошлого века.

Все 3 почвы имеют тяжелосуглинистый гранулометрический состав и развиты на покровных тяжелых суглинках.

Нерастертые высушенные образцы почв весом около 300 г были насыпаны в пластмассовые ста-

каны диаметром 15 см, высотой 13 см с дренажным отверстием диаметром 2 см на дне. Перед насыпкой образца на дно помещен бумажный фильтр для предотвращения потери почвы при ее увлажнении. Было использовано по 3 образца каждой почвы (всего 9 образцов).

В начале эксперимента образцы были взвешены на аналитических весах с погрешностью 0.01 г.

После этого образцы через нижнее дренажное отверстие насыщали водой путем погружения. После насыщения их взвешивали и ежедневно экспонировали на открытом пространстве на солнечном свете с 10 до 16 ч (рис. 1). На ночь образцы заносили в помещение. С периодичностью 2 ч образцы взвешивали. Весь эксперимент продолжался 8 сут (табл. 1). После его окончания образцы почв высушивали до сухого состояния в муфельной печи при температуре 105°C в течение 4 ч. Затем был сделан перерасчет влажности образцов на сухую почву.

Параллельно со взвешиванием образцов проводили определение спектральной отражательной способности их поверхности. Первое определение было сделано для сухих образцов в начале эксперимента, следующее — сразу после их насыщения водой и далее — одновременно с каждым взвешиванием.

Съемку спектральной отражательной способности (СОС) поверхности образцов осуществляли на открытом воздухе спектро радиометром FieldSpec® HandHeld 2, который измеряет отражение электромагнитных волн в диапазоне длин волн от 325 до 1075 нм (видимая и ближняя инфракрасная области спектра) при точности  $\pm 1$  нм и спектральном разрешении  $< 3$  нм. Во время съемки спектро радиометр располагался в надири от поверхности образца на высоте 10 см для того, чтобы обеспечить размер отражаемой области в пределах пятна диаметром 6–8 см. Перед началом съемки СОС прибор калибровали с помощью белой контрольной панели Spectralon®, состоящей из политетрафторэтилена и имеющей 99% отражение. При съемке образцов в солнечную погоду калибровку проводили лишь в начале, а в облачную погоду, при варьирующем освещении, перед съемкой СОС каждого образца. Процесс съемки всех девяти образцов в среднем занимал около 5 мин, что обеспечивало одинаковые условия освещения образцов за сеанс спектрометрирования.

Нужно отметить, что каждое спектрометрирование позволяет получать приборно-усредненные кривые СОС из десяти автоматических измерений. Кроме этого, анализ каждого образца осуществляли в пятикратной повторности. Полученные 5 кривых также осредняли. В результате для каждого образца



Рис. 1. Экспонирование образцов почв (слева – с влажной поверхностью, справа – с подсохшей поверхностью).

за каждый срок измерений была рассчитана одна осредненная кривая СОС.

Часть кривых, зарегистрированных в условиях переменной облачности, в результате визуального контроля была исключена из рассмотрения из-за их некондиционности, выраженной в появлении локальных экстремумов, не характерных для спектров почв.

Для анализа использовали участки кривых для диапазона электромагнитных волн 400–900 нм. Части кривых до 350 нм и после 900 нм были исключены из-за приборной зашумленности данных.

Для каждой осредненной кривой рассчитывали среднее интегральное отражение (ИО) электромагнитных волн для диапазона 400–900 нм. Затем определяли сопряженность изменений величин ИО и влажности почв во времени на основе корреляционного анализа.

Статистический анализ данных (предварительная обработка кривых спектрального отражения, осреднение данных, оценка связей) выполнен с использованием пакета Statistica 6.0.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлена динамика влажности образцов почв (на абсолютно сухую почву). Влаж-

ность образцов черноземов после насыщения превышала 60%, серых лесных почв – составляла 50–55%, дерново-подзолистых почв – 55–60%. Высыхание образцов и потеря влаги проходили во всех почвах однотипно и практически с одной скоростью (около 6–7% в сутки). После 16-го измерения скорость увеличилась до 8–10% в сутки, что связано с переходом от облачной погоды к солнечной. Скорость потерь влаги также закономерно уменьшалась ночью и увеличивалась после того, как образцы выносили на открытое пространство. Это привело к небольшой “волнистости” кривых на рис. 2 для всех образцов почв. Необходимо отметить также, что полной потери влаги к концу эксперимента в образцах не произошло. В черноземах влажность в конце составила около 20%, а в серых лесных и дерново-подзолистых почвах – около 10–12%.

Кривые СОС поверхности образцов почв также претерпевали значительные изменения во времени. На рис. 3 в качестве примера показано изменение кривых СОС для одного из образцов. Существенное изменение кривых СОС произошло на следующие сутки после наступления солнечной погоды, когда влажность поверхности почв стала быстро уменьшаться (рис. 1). Это оказалось характерным не только для приведенного на рис. 3 образца, но и для всех проанализирован-

Таблица 1. Условия проведения эксперимента в 2020 г.

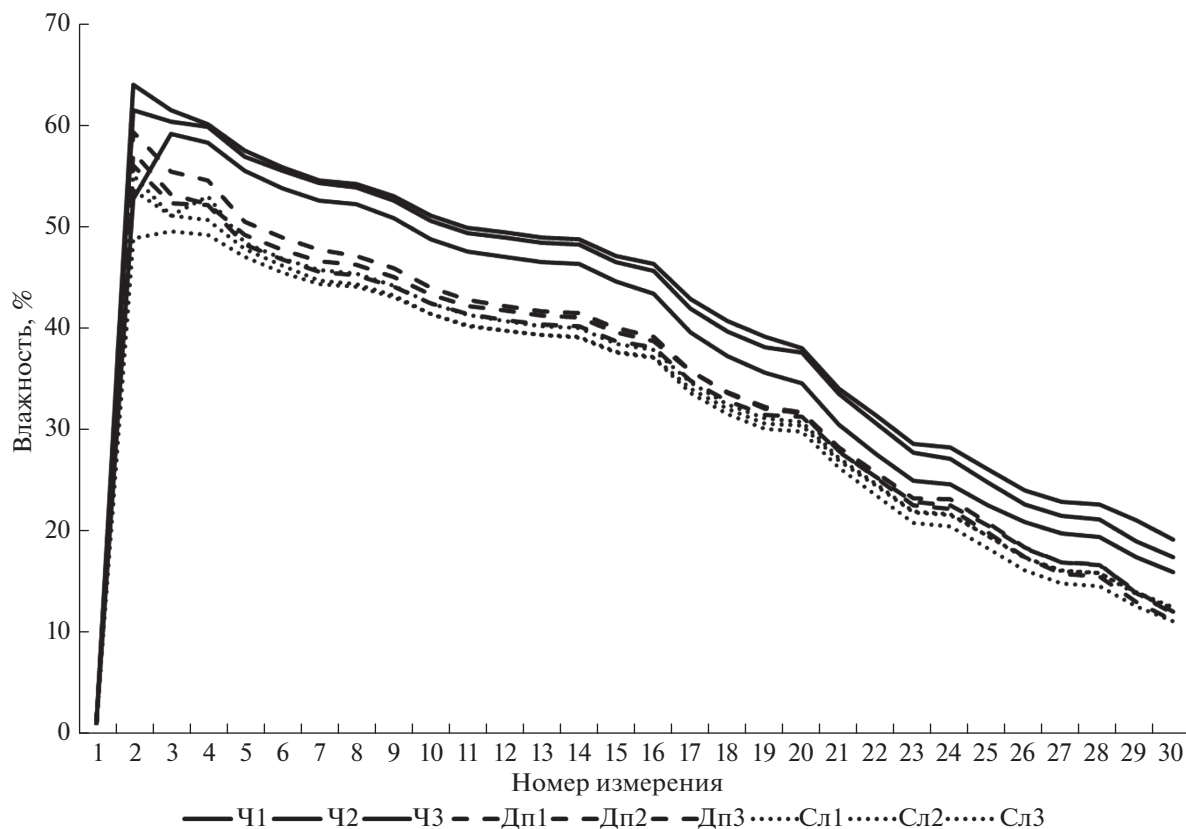
Номер измерения	Дата	Время	Условия
1	28 июля	12:00	Сухие образцы, переменная облачность
2		15:00	Сразу после увлажнения, переменная облачность
3		16:40	Переменная облачность
4	29 июля	12:30	Облачно
5		14:25	»
6		15:25	»
7		16:15	»
8	30 июля	12:20	»
9		13:45	»
10		15:15	Облачно, временами дождь
11	31 июля	16:05	»
12		11:10	Облачно
13		13:00	»
14		14:35	»
15		15:55	Облачно, временами дождь
16	3 августа	10:30	Ясно
17		12:30	»
18		14:30	Переменная облачность
19		16:30	»
20	4 августа	10:30	Ясно
21		13:00	»
22		14:30	»
23		16:30	Переменная облачность
24	5 августа	11:00	»
25		12:30	»
26		14:30	»
27		16:30	»
28	6 августа	10:30	»
29		12:40	»
30		14:30	»

ных образцов почв. В целом подобные результаты подтверждают ранее полученные данные о том, что после увлажнения поверхности почв в солнечный день ее высыхание может происходить в течение нескольких часов [10].

Как видно, кривые СОС последних измерений не полностью совпали с кривой СОС, полученной для сухих образцов в начале эксперимента практически для образцов всех почв. Несмотря на то, что увлажнение образцов почв происходило снизу, поверхностные агрегаты после подобного воздействия оказались в той или иной степени разрушенными, что не могло не отразиться и на спектральной отражательной способности поверхности. Подобный результат полностью соответствует ранее установленным закономерностям изменения СОС поверхности почв под влиянием атмосферных осадков [11].

Динамика среднего ИО электромагнитных волн для диапазона 400–900 нм и сопряженная динамика влажности образцов почв показаны на рис. 4. ИО ведет себя не совсем синхронно с изменением влажности образцов для всех почв. Общие закономерности можно сформулировать следую-

щим образом. После увлажнения образцов наблюдается значительное падение ИО. Затем в течение длительного времени ИО практически не изменяется, хотя образцы постепенно теряют влагу. Подобное поведение связано с тем, что при подсыхании почв, их влажность остается достаточной для увлажнения поверхности образца. После наступления солнечных дней и прямого солнечного воздействия на поверхность образца, она начинает быстро подсыхать. Достаточно быстро изменяется влажность поверхности и соответственно ее СОС и ИО, что является причиной наклонного повышения кривой ИО для всех образцов и всех почв на рис. 4. В результате на последних сроках измерений величина ИО достигает значений, близких к начальному значению (до увлажнения образцов). То есть СОС поверхности образца становится близкой к таковой сухой почвы. Но влажность самого образца еще не достигает влажности сухой почвы и составляет для черноземов около 20%, а для серых лесных и дерново-подзолистых почв – около 10% (в среднем эти величины соответствуют около трети от влажности насыщенной водой почвы).



**Рис. 2.** Изменение влажности образцов почв (на абсолютно сухую почву) (время измерения, соответствующее каждому номеру, приведено в табл. 1).

На основе полученных данных можно утверждать, что изменение влажности образца почв от высокого насыщения до определенной величины, которая, по-видимому, зависит от свойств почвы, не оказывает влияние на СОС поверхности образца. После этого наступает период, когда дальнейшее уменьшение влажности образца ведет к синхронному увеличению СОС поверхности из-за ее подсыхания. И с определенного момента при дальнейшем уменьшении влажности образца почв СОС поверхности практически не меняется.

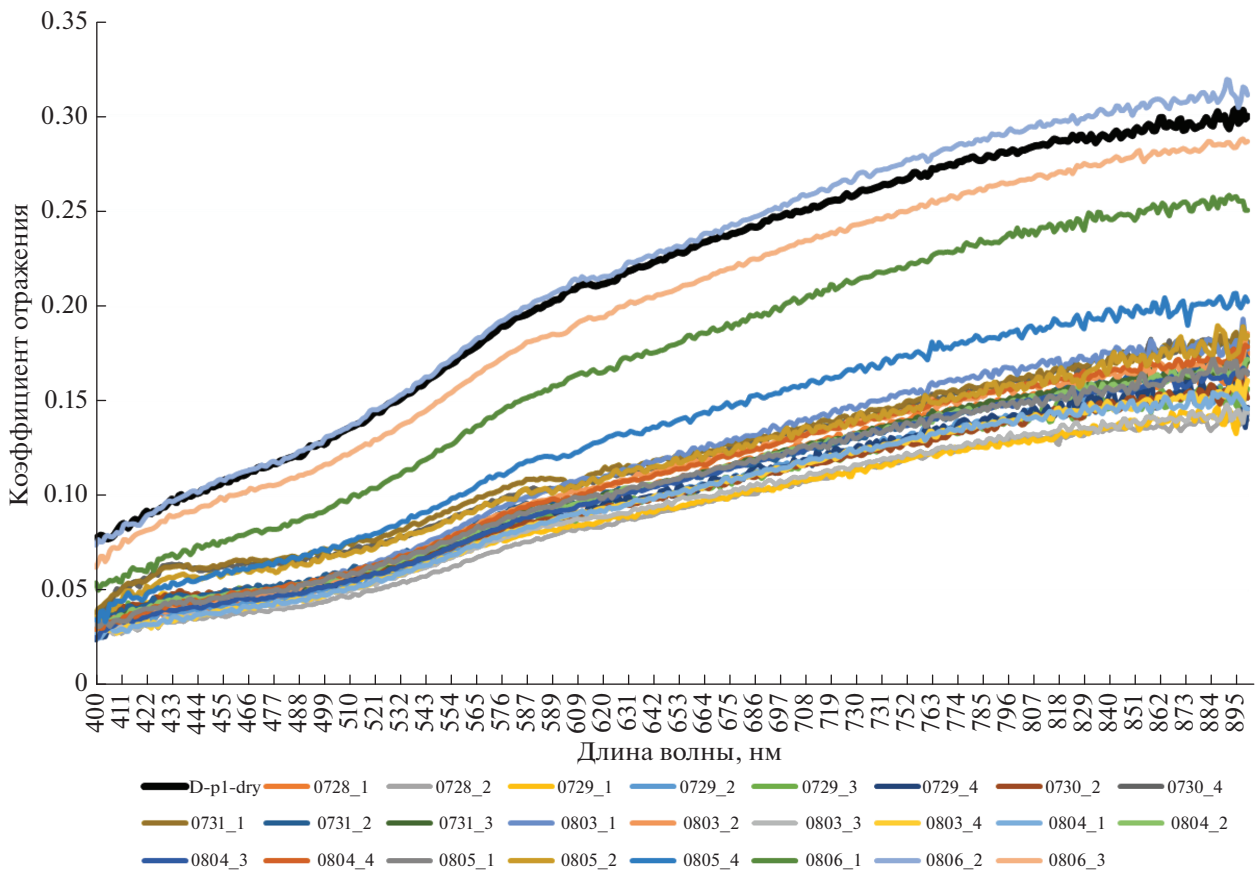
В эксперименте для образцов черноземных почв СОС поверхности реагировала на влажность образца в среднем в диапазоне содержания влаги от 40 до 20%, для образцов серых лесных почв от 30 до 12%, для образцов дерново-подзолистых почв – в диапазоне от 30 до 10% (на сухую почву) (период подсыхания поверхности) (рис. 4).

В табл. 2 представлены результаты корреляционного анализа между содержанием влаги в образце почвы и величиной интегрального отражения в диапазоне 400–900 нм для разных временных интервалов (период подсыхания поверхности, до и после него). При изменении влажности почв в диапазонах выше или ниже указанных предельных значений, СОС не может использоваться в качестве надежного индикатора содержания влаги в почве.

Подобный вывод не противоречит множеству научных публикаций, в которых приводятся результаты площадного детектирования влажности почв по спутниковым данным оптического диапазона и демонстрируются значимые регрессии связи между спутниковыми данными и содержанием влаги в почвах [21, 26]. Он лишь свидетельствует о том, что использование подобных регрессий при значениях содержания влаги ниже или выше определенного предела (специфичного для разных почв) не имеет смысла, так как СОС поверхности почв не реагирует на изменения влажности почв в этих диапазонах.

Необходимо отметить, что полученные результаты демонстрируют лишь общую закономерность, и не могут быть напрямую перенесены на почвы с другими свойствами, для которых граничные значения детектируемого диапазона влажности наверняка будут другими.

На результаты анализа может оказывать влияние и исходный вес образцов почв. Так, образцы очень малого веса и объема будут терять влагу гораздо быстрее, чем образцы большей массы и объема, хотя выявленная нами общая закономерность должна сохраняться в любом случае.



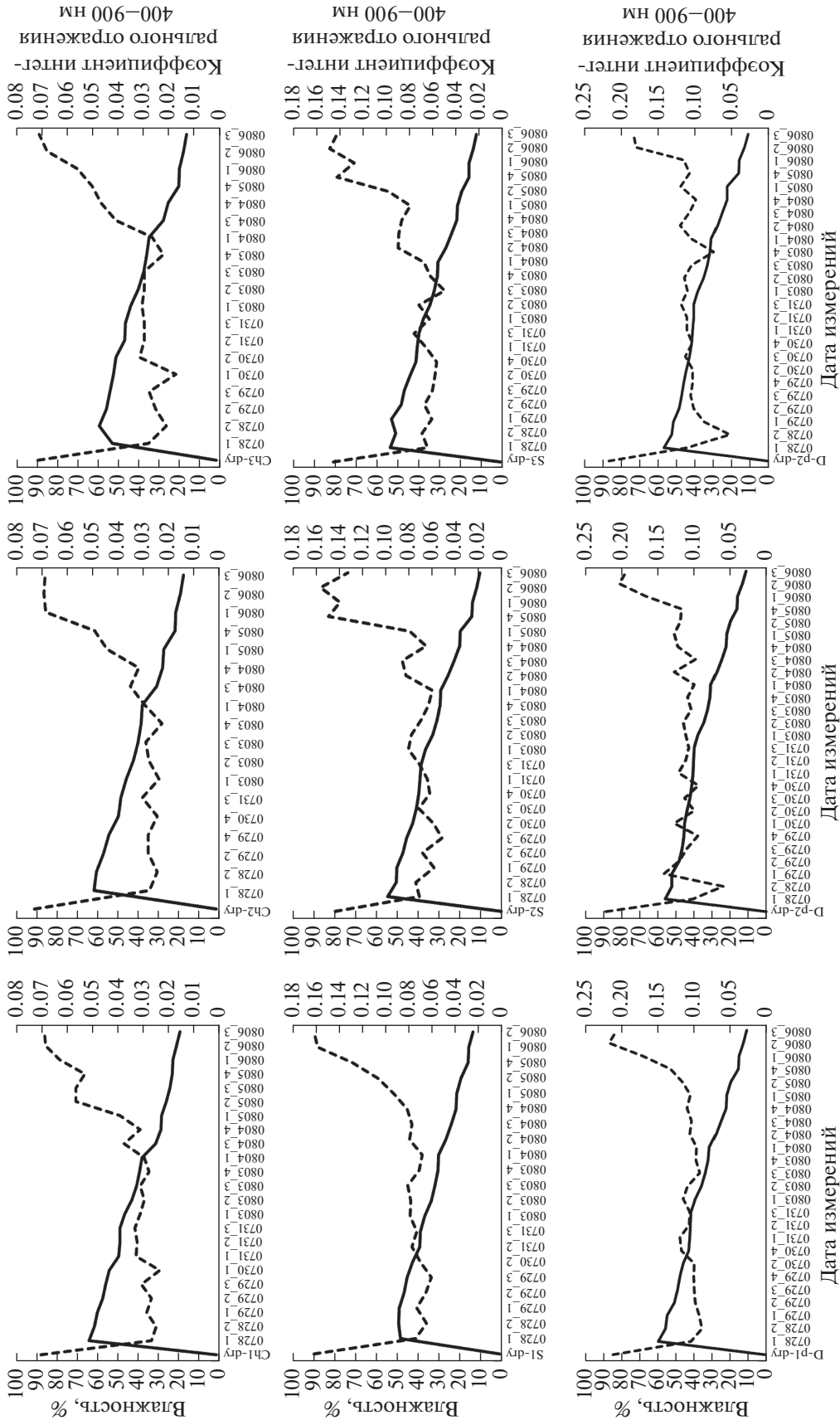
**Рис. 3.** Кривые СОС поверхности образца дерново-подзолистой почвы (в легенде показаны даты получения каждой кривой в формате ММДД\_Н (ММ – порядковый номер месяца года, ДД – номер дня месяца, Н – номер измерения для этого дня)).

Учитывая, что пахотный горизонт почв в большинстве случаев увлажняется атмосферными осадками с поверхности и часто не до полного насыщения влагой, а дистанционное зондирование в оптическом диапазоне для решения почвенных задач ведется лишь в безоблачных условиях (то

есть когда со времени последнего дождя прошло не менее нескольких часов), можно предположить, что большая часть данных спутниковой съемки в оптическом диапазоне фиксирует состояние открытой поверхности почв (слоя, который формирует отраженный сигнал) в сухом состоя-

**Таблица 2.** Корреляция между интегральным отражением поверхности в диапазоне 400–900 нм и влажностью образца почвы

Почва, образец	Значение коэффициента корреляции		
	период влажной поверхности	период подсыхания поверхности	период сухой поверхности
Дерново-подзолистая			
1	-0.42	-0.81	Нет данных
2	-0.08	-0.82	Нет данных
3	-0.22	-0.67	Нет данных
Серая лесная			
1	-0.36	-0.91	Нет данных
2	-0.08	-0.77	0.24
3	0.14	-0.88	-0.31
Чернозем оподзоленный			
1	-0.42	-0.91	Нет данных
2	0.14	-0.86	-0.32
3	-0.31	-0.97	Нет данных



— Влажность --- Интегральное отражение

Рис. 4. Динамика влажности образцов почв и коэффициента интегрального отражения (верхний ряд — для образцов черноземов, средний ряд — для образцов серых лесных почв и нижний ряд — для образцов дерново-подзолистых почв).

нии, хотя пахотный горизонт может в то же время быть достаточно влажным. Исключением должны являться лишь случаи, когда внутрипочвенная влага способна подтягиваться по капиллярам почвенных агрегатов непосредственно к поверхности. Подобное может иметь место при очень высоком уровне залегания грунтовых вод или верховодки, или же при экстремальном насыщении пахотного горизонта почв влагой в результате выпадения обильного дождя незадолго до съемки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что изменение содержания почвенной влаги приводит к синхронному изменению интегрального отражения в видимой области спектра не во всем возможном диапазоне содержания влаги, а лишь в достаточно узких ее интервалах, которые специфичны для разных почв. В нашем эксперименте для образцов черноземных почв СОС поверхности реагировала на влажность образца в среднем в диапазоне содержания влаги от 40 до 20%, для образцов серых лесных почв от 30 до 12%, для образцов дерново-подзолистых почв — в диапазоне от 30 до 10% (на абсолютно сухую почву).

Изменение влажности почв в интервалах вне этого диапазона не привело к изменению их спектральной отражательной способности.

На основе полученных результатов подтверждено и экспериментально показано, что большая часть данных спутниковой съемки в оптическом диапазоне должна фиксировать состояние открытой поверхности почв в сухом состоянии, хотя сам пахотный горизонт может быть при этом достаточно влажным.

Выявленные закономерности необходимо учитывать при создании спутниковых технологий оперативного мониторинга влажности почв по данным, получаемым в оптическом диапазоне электромагнитных волн.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российской Федерации (соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2020-805 от 02 октября 2020 г.) и в рамках Программы стратегического академического лидерства РУДН (ИЮС, анализ данных о спектральной отражательной способности).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Водяницкий Ю.Н., Шишов Л.Л.* Изучение некоторых процессов по цвету почв. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2004. 84 с.

2. *Воронин А.Я.* Критерии идентификации строения и функциональных свойств почвенного профиля в георадиолокационных исследованиях с использованием георадара “Лоза-В” // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2015. № 80. С. 106–128. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2015-80-106-128>
3. *Воронин А.Я., Савин И.Ю.* Георадарная диагностика мощности гумусового горизонта черноземов // Российская сельскохозяйственная наука. 2018. № 2. С. 34–40.
4. *Кирюшин В.И.* Методология комплексной оценки сельскохозяйственных земель // Почвоведение. 2020. № 7. С. 871–879.
5. *Орлов Д.С.* Цвет и диагностика почв // Соросовский образовательный журн. 1997. № 4. С. 45–51.
6. *Орлов Д.С., Суханова Н.И., Розанова М.С.* Спектральная отражательная способность почв и их компонентов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 176 с.
7. *Прудникова Е.Ю., Савин И.Ю.* Об особенностях использования спутниковых радарных данных для дешифрирования свойств пахотных черноземных почв // Науки о Земле. 2017. № 1. С. 48–60.
8. *Растворова О.Г.* Физика почв (практическое руководство). Изд-во ЛГУ, 1983. 195 с.
9. *Роде А.А.* Основы учения о почвенной влаге. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. Т. 3. 663 с.
10. *Савин И.Ю.* Влияние ливневого дождя на интегральную отражательную способность поверхности черноземных почв // Почвоведение. 1995. № 8. С. 976–980.
11. *Савин И.Ю., Прудникова Е.Ю.* Об оптимальном сроке спутниковой съемки для картографирования пахотных почв // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2014. № 74. С. 66–77.
12. *Babaeian E., Sadeghi M., Jones S.B., Montzka C., Vereecken H., Tuller M.* Ground, proximal, and satellite remote sensing of soil moisture // Reviews of Geophysics. 2019. V. 57. № 2. P. 530–616. <https://doi.org/10.1029/2018RG000618>
13. *Dobriyal P., Qureshi A., Badola R., Hussain S.A.* A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management // J. Hydrology. 2012. V. 458. P. 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.021>
14. *Jonard F., Weihermuller L., Jadoon K.Z., Schwank M., Vereecken H., Lambot S.* Mapping Field-Scale Soil Moisture With L-Band Radiometer and Ground-Penetrating Radar Over Bare Soil // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2011. V. 49. № 8. P. 2863–2875. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2114890>
15. *Klotzsche A., Jonard F., Looms M., van der Kruk J., Huismann J.* Measuring soil water content with ground penetrating radar: A decade of progress // Vadose Zone J. 2018. V. 17. № 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.2136/vzj2018.03.0052>
16. *le Roux P. C., Aalto J., Luoto M.* Soil moisture’s underestimated role in climate change impact modelling in low-energy systems // Global change biology. 2013. V. 19. № 10. P. 2965–2975. <https://doi.org/10.1111/gcb.12286>
17. *Li B., Rodell M.* Spatial variability and its scale dependency of observed and modeled soil moisture over different climate regions // Hydrology & Earth System



- Sciences. 2013. V. 17. № 3.  
<https://doi.org/10.5194/hess-17-1177-2013>
18. *Petropoulos G.P., Ireland G., Barrett B.* Surface soil moisture retrievals from remote sensing: Current status, products & future trends // *Phys. Chem. Earth Parts A/B/C*. 2015. V. 83. P. 36–56.  
<https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.02.009>
  19. *Renzullo L.J., van Dijk A.I.J.M., Perraud J.-M., Collins D., Henderson B., Jin H., Smith A.B., McJannet D.L.* Continental satellite soil moisture data assimilation improves root-zone moisture analysis for water resources assessment // *J. Hydrology*. 2014. V. 519. Part D. P. 2747–2762  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.008>
  20. *Robinson D.A., Campbell C.S., Hopmans J.W., Hornbuckle B.K., Jones S.B., Knight R., Ogden F., Selker J., Wendroth O.* Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review // *Vadose Zone J.* 2008. V. 7. № 1. P. 358–389.  
<https://doi.org/10.2136/vzj2007.0143>
  21. *Sadeghi M., Jones S.B., Philpot W.D.* A linear physically-based model for remote sensing of soil moisture using short wave infrared bands // *Remote Sensing of Environment*. 2015. V. 164. P. 66–76.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.04.007>
  22. *Seneviratne S.I., Corti T., Davin E.L., Hirschi M., Jaeger E.B., Lehner I., Orlowsky B., Teuling A.J.* Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review // *Earth-Science Reviews*. 2010. V. 99. № 3–4. P. 125–161.  
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>
  23. *Shaxson F., Barber R.* Optimizing Soil Moisture for Plant Production. *FAO Soils Bulletin* 79, 2003.  
<http://www.fao.org/3/Y4690E/y4690e00.htm>
  24. *Su S.L., Singh D.N., Baghini M.S.* A critical review of soil moisture measurement // *Measurement*. 2014. V. 54. P. 92–105.  
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007>
  25. *Van Dam R.L.* Calibration functions for estimating soil moisture from GPR dielectric constant measurements // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2014. V. 45. № 3. P. 392–413.  
<https://doi.org/10.1080/00103624.2013.854805>
  26. *Wang L., Qu J.J., Zhang S., Hao X., Dasgupta S.* Soil moisture estimation using MODIS and ground measurements in eastern China // *International J. Remote Sensing*. 2007. V. 28. № 6. P. 1413–1418.  
<https://doi.org/10.1080/01431160601075525>
  27. *Wigneron J.P., Kerr Y., Waldteufel P., Saleh K., Escorihuela M.-J., Richaume P., Ferrazzoli P., de Rosnay P., Gurney R., Calvet J.-C., Grant J.P., Guglielmetti M., Hornbuckle B., Mätzler C., Pellarin T., Schwank M.* L-band microwave emission of the biosphere (L-MEB) model: Description and calibration against experimental data sets over crop fields // *Remote Sensing of Environment*. 2007. V. 107. № 4. P. 639–655.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.10.014>
  28. *Zhang D., Zhou G.* Estimation of soil moisture from optical and thermal remote sensing: A review // *Sensors*. 2016. V. 16. № 8. P. 1308.  
<https://doi.org/10.3390/s16081308>
  29. *Zhang F., Zhang L.W., Shi J.J., Huang J.F.* Soil moisture monitoring based on land surface temperature-vegetation index space derived from MODIS data // *Pedosphere*. 2014. V. 24. № 4. P. 450–460.  
[https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(14\)60031-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(14)60031-X)
  30. *Zhao L., Yang K., Qin J., Chen Y., Tang W., Montzka C., Wu H., Lin C., Han M., Vereecken H.* Spatiotemporal analysis of soil moisture observations within a Tibetan mesoscale area and its implication to regional soil moisture measurements // *J. Hydrology*. 2013. V. 482. P. 92–104.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.033>

## Some Particularities of the Soil Surface Optical Properties Usage to Detect Soil Moisture

I. Yu. Savin<sup>1,2,\*</sup> and G.V. Vindeker<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

<sup>2</sup>*Ecological faculty of RUDN University, Moscow, 117198 Russia*

<sup>3</sup>*Faculty of pedology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

\*e-mail: [savin\\_iyu@esoil.ru](mailto:savin_iyu@esoil.ru)

The purpose of the research was to analyze the relationship between soil surface spectral reflectance and the moisture content in soil samples as the basis for moisture detection based on remote sensing data. Studies of 9 samples from the arable horizons of podzolized chernozem, gray forest and soddy-podzolic soils permitted to reveal the relationship between the spectral reflectance of soil surface in the visible region of the spectrum, determined with the HandHeld-2 spectroradiometer, and the moisture content in the sample. It was found that changes of soil moisture content induce synchronous changes in the integral reflection in the visible band of spectrum only in rather narrow intervals of moisture content which are specific for different soils. Changes in soil moisture content in intervals below and above this range do not lead to changes in the spectral reflectance of soil surface. The results obtained prove that most of the satellite imagery data in the optical range capture the state of the open surface of soils in their dry state, though the arable horizon itself may be quite wet. These regularities should be taken into account when using satellite technologies for operational monitoring of soil moisture by remote sensing providing data in the optical range of electromagnetic waves.

**Keywords:** soil spectral reflectance, non-invasive methods of soil research, distant methods of soil moisture study