

УДК 631.432:621.317.738

К МЕТОДИКЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДАТЧИКА ВЛАЖНОСТИ EC-5 DECAGON**Чичулин А.В.***ФГБУН «Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения РАН», Новосибирск,
e-mail: chichulin1957@mail.ru*

Датчик влажности сыпучих материалов EC-5 Decagon, нашедший широкое применение в научной и производственной практике, изначально рассчитан на проведение режимных наблюдений в условиях его стационарной установки. В статье рассмотрены методические вопросы, позволяющие преодолеть это ограничение и использовать датчик в качестве переносного прибора. Это позволит использовать его при решении более широкого круга вопросов, связанных, например, с изучением пространственно-временной вариабельности почвенной влажности. На примере темно-серой лесной почвы среднесуглинистого гранулометрического состава, нарушенного и ненарушенного сложения экспериментально изучена зависимость показаний датчика от глубины погружения его зубцов в почву. Сделан вывод о возможности проведения измерений без погружения в почву всего корпуса датчика и соединительных проводов. Достижимая в этом случае простота и быстрота измерения позволяет рекомендовать мобильный вариант применения датчика. Установлено, что, помимо влажности почвы, на показания датчика заметное влияние оказывает ее плотность. Показано, что при условии предварительного изучения пространственной неоднородности почв по плотности с заданной надежностью и точностью, с помощью датчика возможно проводить мониторинг влажности без отбора почвенных образцов, что приводит к существенной экономии затраченного времени – примерно на два порядка. Рассчитана необходимая для этой цели численность выборки измерений. Рассмотрены вопросы статистического обоснования этого вывода.

Ключевые слова: датчик влажности почв, плотность почвы, пространственно-временная изменчивость почвенных свойств, количество повторностей измерений, статистические характеристики, экономия времени

THE METHOD OF APPLICATION OF THE MOISTURE SENSOR EC-5 DECAGON**Chichulin A.V.***Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Academy of Sciences,
Novosibirsk, e-mail: chichulin1957@mail.ru*

The humidity sensor of the bulk materials EC-5 Decagon, found wide application in scientific and industrial practice initially designed to conduct sensitive observations in the context of its permanent installation. The article deal with methodical issue, allowing to overcome this limitation and to use the sensor as a portable device. This allows you to use it across a broader range of issues related to, for example, the study of spatial-temporal variability of soil moisture. For example, dark gray forest soils of middle-loamy granulometric composition, disturbed and undisturbed structure, of the experimentally studied the dependence of the sensor from the depth of its teeth in the soil. The conclusion about the possibility of measurements without dipping into the soil of the whole body. Achieved in this case, the simplicity and speed of measurement allows to recommend the mobile application of the sensor. It is established that, in addition to soil moisture, the sensor is noticeable influenced by its density. It is shown that, provided a preliminary study of spatial heterogeneity of soil density with a specified reliability and accuracy using a sensor may monitor the moisture without selection of soil samples. This leads to a principal reduction in the time spent – approximately two orders of magnitude. The number of samples required for this purpose is calculated. The considered questions of statistical validity of this conclusion.

Keywords: sensor soil moisture, soil density, spatial-temporal variability of soil structural properties, number of replicate measurements, statistical characteristics, saving time

Получившие широкое распространение в научной и производственной практике датчики влажности сыпучих и теплоизоляционных материалов EC-5 Decagon исходно предназначены для применения их в стационарных условиях. В сельскохозяйственной практике, например, датчики используются для мониторинга динамики почвенной влаги. С этой целью они полностью, вместе с соединительными проводами, на длительный срок устанавливаются в почвенном профиле на определенных глубинах. Наши исследования показали, что технические характеристики и конструктивные особенности датчиков позволяют использовать их для решения более

широкого круга задач. В частности, возможен вариант и мобильного применения датчика EC-5 – для изучения пространственно-временной вариабельности почвенной влажности. С практической точки зрения это позволяет на два порядка (в 100 раз), по сравнению с термостатно-весовым методом, сократить затраченное время. В статье рассматриваются методические вопросы, связанные с решением этой проблемы.

Датчик EC-5 измеряет относительную диэлектрическую проницаемость почвы ϵ – число, показывающее, во сколько раз электрическая сила, действующая на любой заряд в почве, меньше, чем в вакууме. Значение ϵ почвы зависит от диэлектрических свойств

всех ее компонент, особенностей их геометрических характеристик и взаимодействия друг с другом, а также от частоты приложенного электромагнитного поля ω . К настоящему времени многочисленными экспериментальными исследованиями, ссылки на более ранние из которых можно найти в работах [1], а на более поздние в [2–4], установлено, что различные механизмы поляризации, действующие в почве, проявляют себя с разной интенсивностью в различных диапазонах ω . В частности, в диапазоне 1 МГц – 1 ГГц, за ϵ почв ответственны в основном механизмы дипольной поляризации. Поскольку датчик ЕС-5 работает на фиксированной частоте 70 МГц, это делает его максимально чувствительным к изменению содержания свободной почвенной влаги. Разработчикам датчика это дало основание, с некоторыми оговорками, предложить его в качестве *универсального*, не зависящего от других физических свойств почвы, измерителя объемной влажности θ . Однако в работах [5, 6] показано, что такой вывод имеет право на существование лишь в качестве первого приближения и при этом исключительно в стационарных условиях. В случае же использования датчика в качестве переносного прибора наши исследования определенно подтверждают этот результат – для градуировочной кривой датчика принципиально необходимо учитывать и плотность почвы ρ .

Для удобства пользователей датчик ЕС-5 имеет несколько шкал, одна из которых отградуирована в процентах объемной влажности. В нашей работе использовалась именно эта шкала. Прежде всего была изучена «глубинная характеристика датчиков» (ГХД) – зависимость показаний датчиков от глубины их погружения в почву. На рис. 1, Б приведены примеры, а на рис. 1, А результаты изучения ГХД на образцах почвы нарушенного сложения. Установлено, что ГХД состоит из двух участков. Первый участок, до глубины 5 см, соответствующий погружению в почву только измерительных зубцов датчика, близок к линейной зависимости с коэффициентом корреляции $R \geq 0,98$. С практической точки зрения отметим, что до этой глубины датчик легко вводится в почву и извлекается из нее. При соответствующем навыке одно измерение проводится в течение 10–15 с. Второй участок, близкий к выходу на насыщение, соответствует погружению в почву, вслед за зубцами, всего корпуса датчика. На ГХД (рис. 1, Б) это соответствует снятию показаний датчика на глубине 8 см. Разработчики предлагают погружать датчики в почву вместе с корпусом, однако это оправдано либо при его стационарной установке, либо

на рыхлых почвах ($0,75\text{--}1,0 \text{ г см}^{-3}$). В почву с высокой плотностью, особенно выше $1,3 \text{ г см}^{-3}$, корпус датчика вводится с трудом, что при многократных измерениях, повышает риск его поломки. С другой стороны, зависимости между показаниями датчика при погружении его в почву на 5 см (d5) и на 8 см (d8) от влажности имеют практически один угол наклона (рис. 1, А). Поэтому во всем диапазоне увлажнения почвы разница между ними сводится к постоянной величине. Далее мы покажем, что разность между влажностью почвы θ и показанием датчика d8, вопреки утверждениям разработчиков, *зависит* от плотности почвы и в случае мобильного варианта использования датчика эту разность необходимо принимать во внимание. В результате не имеет значения, при какой глубине погружения датчика в почву проводить измерения – на 5 см или 8 см. При выборе более простого случая – d5 постоянная величина, упомянутая выше, автоматически включается в свободный член калибровочного уравнения, предварительно определяемого для каждой почвы на основе эмпирических данных.

Проведено два варианта измерений – на нарушенных и ненарушенных образцах почвы. Категоризованные по плотности результаты описательной статистики, полученные на 78 образцах почвы нарушенного сложения, приведены на диаграмме (рис. 2). Количественные зависимости в форме уравнений множественной линейной регрессии будут представлены ниже, но уже на качественном уровне видно, что при низкой плотности почвы ее влажность выше показаний датчика ($\theta > d$), полностью погруженного в почву (8 см), а при высокой плотности – ниже ($\theta < d$). Интерполяция представленных результатов показывает, что только при плотности $1,17 \text{ г см}^{-3}$ показания датчика совпадают с влажностью почвы, определенной термостатно-весовым методом. При всех других плотностях почвы в градуировочных уравнениях датчика, погружаемого в почву на любую глубину, необходимо учитывать поправку, зависящую от плотности.

Все результаты показаний датчика, приводимые далее, получены при погружении в почву только его зубцов (5 см). На рис. 3 представлены 3 серии данных, относящихся к почвам ненарушенного (1 и 2 серии) и нарушенного (3 серия) сложения. Статистически обработанные данные свойств всех пяти почвенных полос (каждая площадью $S = 1 \times 5 \text{ м}^2$) и нижележащих горизонтов приведены в табл. 1 и 2. Почва – темно-серая лесная, многолетняя залежь, перепаханная перед изучением на глубину 10 см. 1 серия – пахотный горизонт, отли-

чается относительно большим, по сравнению с нижележащими горизонтами (2 серия), разбросом данных, характеризуемым среднеквадратичными отклонениями – SD, полученным в результате часто встречающихся пустот, заполненных скрученными жгутами травы. Тем не менее и для пахотного горизонта, и особенно для нижележа-

щих с высокой надежностью (p – уровень меньше 0,01) прослеживается зависимость показаний датчика d не только от влажности почвы, но и от ее плотности. Для верхних, менее плотных горизонтов показания датчика меньше влажности почвы, для нижних горизонтов (30–40 см и 70–80 см), более плотных – выше.

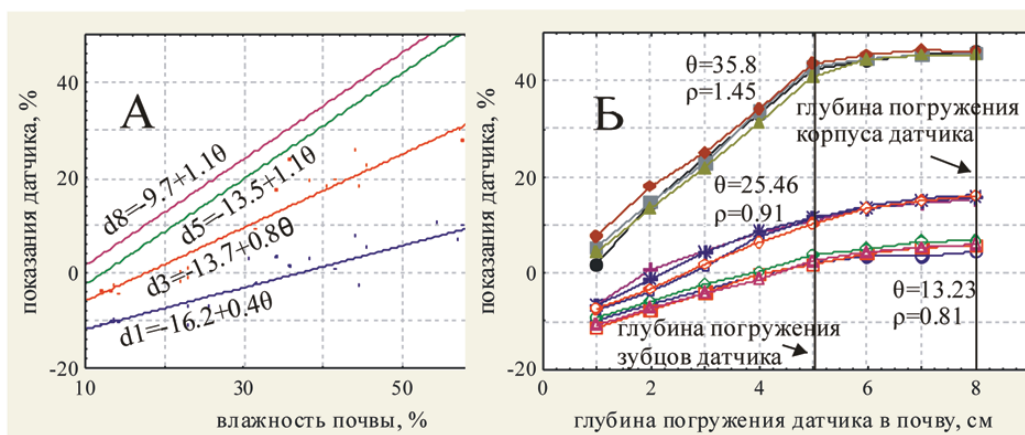


Рис. 1. А – линейные аппроксимации зависимостей между показаниями датчика (d) и влажностью почвы. Цифры (1, 3, 5, 8) у d обозначают глубину погружения зубцов датчика в почву. На глубинах 5 и 8 см углы наклона зависимостей практически совпадают. Б – примеры зависимостей показаний датчика в 4-х повторностях для 3-х вариантов увлажнения почвы и уплотнения почвы нарушенного сложения. Разброс ГХД объясняется микронеоднородностями подготовленных образцов почв большого размера (100 см³). Места ввода датчика в почву находились на расстоянии 3–4 см друг от друга

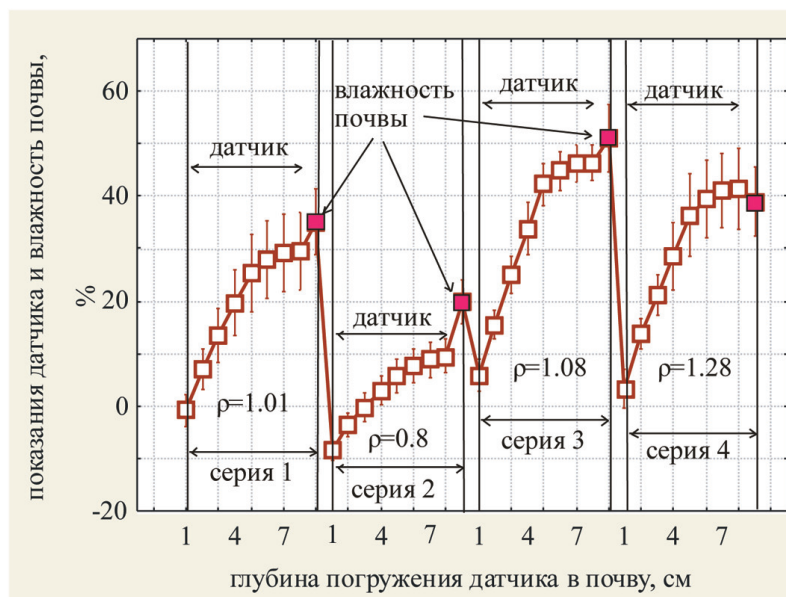


Рис. 2. Зависимости усредненных по влажности и плотности показаний датчиков от глубины погружения их в почву нарушенного сложения. Усиками обозначен $\pm 95\%$ доверительный интервал для средних значений. Серии объединяют показания датчика (пустые квадраты) и влажность почвы (закрашенные квадраты), определенную термостатно-весовым методом, и отличаются друг от друга средней плотностью почвы ρ . 1 серия – усреднение по всем 78 образцам, серии 2, 3, 4 – категоризованные по плотности показания датчика

Для сопоставления на рис. 3 приведены результаты сравнения показаний датчика d и влажности почвы θ нарушенного сложения для категоризованных по плотности ρ образцов почвы (3 серия). Видно, что с ростом ρ разность между θ и d , находясь в отрицательной области, стремится к нулю, а для плотности $1,4 \text{ г см}^{-3}$ становится положительной. Этот результат подтверждает вышеописанный вывод: при низкой плотности почвы показания датчика меньше почвенной влажности, при высокой плотности – больше. Обратим внимание на то, что стандартные отклонения показаний датчика для почв ненарушенного сложе-

ния (1 и 2 серии на рис. 3) во всех случаях больше соответствующих стандартных отклонений для влажности почвы. Таким образом, как меры центральной тенденции (средние значения), так и меры изменчивости (дисперсии) свидетельствуют о том, что на показания датчика, помимо влажность, заметное влияние оказывает и плотность почвы. Высокие значения стандартных отклонений для промежуточных ($1,0\text{--}1,2 \text{ г см}^{-3}$) плотностей подготовленных образцов почв нарушенного сложения (серия 3 на рис. 3) связаны с механизмами устойчивости почвенной структуры и в настоящей работе не обсуждаются.

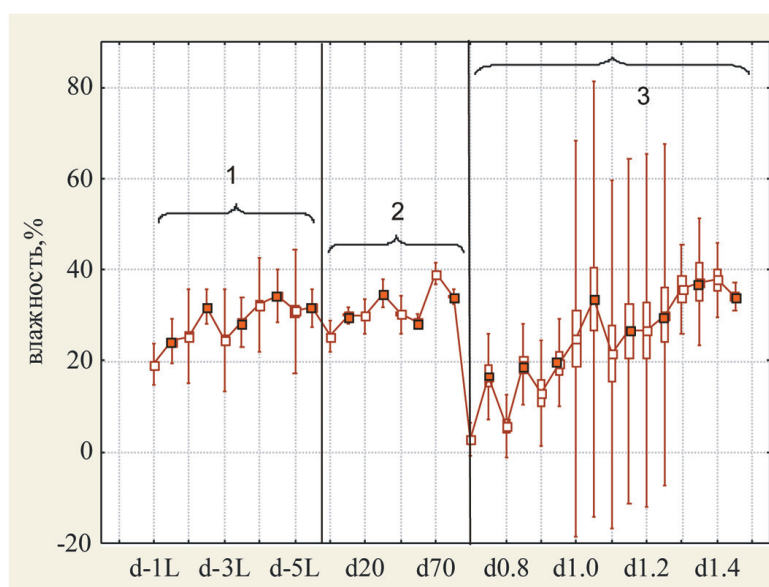


Рис. 3. Сравнение усредненных показаний датчика (нечетные пустые квадраты) и соответствующая им влажность почвы (четные закрашенные квадраты) для почв с нарушенной и ненарушенной структурой. Усиками обозначены стандартные отклонения SD для средних. 1 серия – 5 полос (d-1L – d-5L) пахотного горизонта (глубина 0–10 см, площадь каждой полосы $S = 5 \text{ м}^2$, количество повторностей измерения $n = 30$). 2 серия – горизонты 10–20, 20–30, 30–40, 70–80 см ($S = 1 \text{ м}^2$, $n = 25$). 3 серия – образцы почвы с нарушенным сложением, сгруппированные по плотности через равные промежутки $0,7, 0,8, 0,9 \dots, 1,3, - 1,4 \text{ г см}^{-3}$, суммарная повторность $n = 52$. Данные следует сравнивать по парам: (1–2), (3–4), (5–6) и т.д.

Таблица 1

Статистические характеристики свойств полос пахотного горизонта 0–10 см

	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD
полоса	L1	L1	L2	L2	L3	L3	L4	L4	L5	L5
датчик	19,27	2,265	25,41	5,131	24,57	5,651	32,31	5,17	30,89	6,801
повторность	23		65		85		41		77	
влажность	24,34	2,371	31,82	1,885	28,51	2,709	34,18	2,869	31,66	2,108
повторность	17		8–9		16–17		13–14		10	
плотность	0,979	0,062	0,96	0,058	1,011	0,07	1,043	0,068	1,067	0,056
повторность	9		9		10		9–10		7	

Таблица 2

Статистические характеристики нижележащих горизонтов почвы, 1x1 м²

	mean 10–20	SD 10–20	mean 20–30	SD 20–30	mean 30–40	SD 30–40	Mean 70–80	SD 70–80
датчик	25,443	1,722	29,792	1,872	30,179	2,022	39,186	1,186
повторность	10		9		10		5	
влажность	30,044	0,934	34,71	1,551	28,62	0,799	34,05	0,833
повторность	5		4		5		4	
плотность	1,181	0,083	1,127	0,066	1,340	0,043	1,421	0,029
повторность	10–11		8		5		4	

Результирующие зависимости между показаниями датчиков, влажностью почвы и ее плотностью можно представить следующими уравнениями множественной линейной регрессии:
нарушенное сложение почвы:

$$\theta = 40,7284 + 1,2247d - 36,1324\rho, \\ R^2 = 0,97, \text{Err} = 1,613, \quad (1)$$

ненарушенное сложение почвы, горизонты 10–20 см, 20–30 см, 30–40 см, 70–80 см, S = 1x1 м²:

$$\theta = 43,7967 + 0,8189d - 29,5419\rho, \\ R^2 = 0,999, \text{Err} = 0,48, \quad (2)$$

ненарушенное сложение, пахотный горизонт 0 – 10 см, S = 5x5 м²

$$\theta = 57,0375 + 4,2612d - 53,1113\rho, \\ R^2 = 0,997, \text{Err} = 0,279 \quad (3)$$

с высокой надежностью коэффициентов при ρ во всех трех случаях, ρ – уровень < 0,01.

На рис. 4 в качестве примера приведены усредненные зависимости влажности почвы от показаний датчика, рассчитанные по уравнениям (1) и (2) для двух значений плотности. Зависимость для пахотного горизонта не изображена, поскольку к параметрам уравнения (3) следует относиться с осторожностью. По причине, упомянутой выше, места взятия образцов почв для определения термостатно-весовым методом плотности и влажности почвы и места определения влажности почвы с помощью датчика могли находиться на расстоянии друг от друга 20–25 см. Поэтому уравнение для пахотного горизонта необходимо уточнить, но, предположительно его параметры не должны сильно отличаться от параметров уравнения (2), полученного на основании изучения 120 образцов почвы из 4 различных горизонтов и различной плотностью.

В табл. 1 и 2 строки «повторности» относятся к физическому свойству, приведенному в предыдущей строке. Они обозначают количество измерений, необходимых для того, чтобы с надежностью 95% генеральное среднее значение соответствующего свойства попало в 5% доверительный интервал ($\text{mean} \pm 5\%$). Расчет проводится с использованием известного выражения для доверительного интервала [5]:

$$|\mu - \text{mean}| \leq \frac{\sigma t_{\alpha}}{n^{0.5}}, \quad (4)$$

где μ – генеральное среднее, mean – выборочное среднее, σ – среднее квадратичное отклонение, t_{α} – критерий Стьюдента для заданного уровня значимости α (в нашем случае 0,05), n – количество повторностей.

Таким образом последовательность действий при определении влажности почвы с помощью датчика сводится к выполнению следующих действий:

1. На заданной площадке определяют выборочные статистические параметры плотности ρ (среднее и стандартное отклонение). Рассчитывается необходимое количество повторностей, которое с заданной надежностью и точностью обеспечит попадание генерального среднего в заданный доверительный интервал. Этот пункт программы является предварительным и выполняется однократно. Пример: 10–11 определений ρ для горизонта 10–20 см, площадь S = 1x1 м² (табл. 2).

2. Основная программа действий – аналогично п. 1 определяется количество повторностей, чтобы с заданной точностью и надежностью определить среднюю влажность почвы с помощью датчика d (показания датчика). Пример: 10 измерений d для горизонта 10–20 см (табл. 2).

3. Полученные средние значения ρ и d подставляются в уравнение (2) и рассчитывается средняя влажность почвы θ для заданного участка.

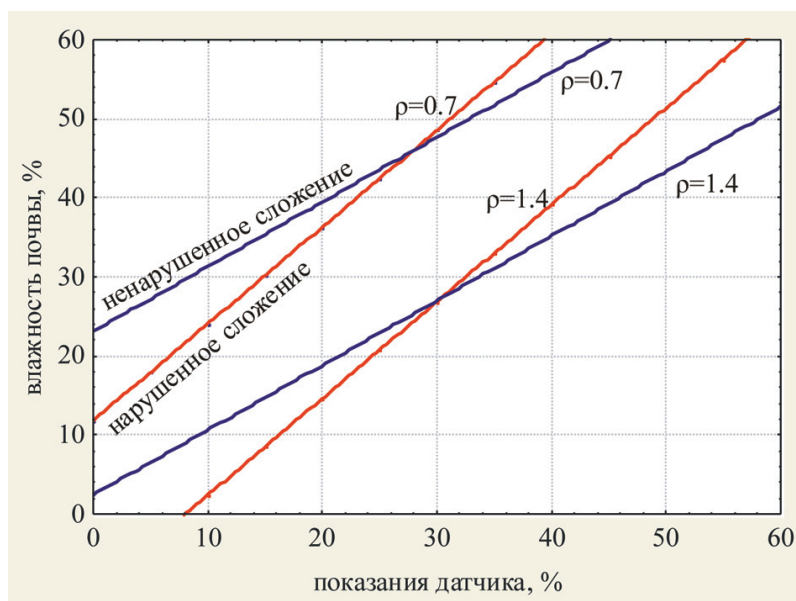


Рис. 4. Усредненные зависимости влажности почвы от показаний датчика для двух плотностей, рассчитанные по уравнениям (1) и (2)

Методика расчета количества повторностей является стандартной и в нашем случае выглядит следующим образом: рассчитывается 5% величина от выборочного среднего теап и делится на среднеквадратичное отклонение. По полученному числу определяется необходимое количество повторностей n .

Выводы

Датчик EC-5 Decagon исходно предназначен для применения в стационарных условиях. При условии выполнения методических исследований, описанных в настоящей работе, датчик можно использовать как переносной прибор для изучения пространственно-временной неоднородности влажности почв. Используя переносной компьютер, можно существенно сократить время определения влажности, воспользовавшись опцией мгновенного измерения. При этом измерения удобнее проводить с одним датчиком (а не с пятью).

Принципиально важным с практической точки зрения является вопрос о затраченном времени определения влажности почв с помощью датчика. Можно дать следующую оценку: на 10 повторностей измерения на 1 м^2 затрачивается менее 5 мин. С учетом записи

показаний и последующем расчете, на определение влажности на этом участке уходит 10 мин. На определение влажности термостатно-весовым методом для такого же участка с таким же количеством повторностей уходит около 15–24 часов. Таким образом новая методика характеризуется существенным, на два порядка, выигрышем по времени.

Список литературы

1. Нерпин С.В. Физика почв / С.В. Нерпин, А.Ф. Чудновский. – М.: Наука, 1967. – 583 с.
2. Родионова О.В. Метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости почвогрунтов в широкой полосе частот: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2016. – 23 с.
3. Беляева Т.А. Изменение диэлектрических свойств связанной воды в почвах при увеличении ее количества / Т.А. Беляева, П.П. Бобров, О.В. Кондратьева // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. – 2013. – № 5 (51). – С. 92–95.
4. Lauer K.A. New Technique for Measuring Broadband Dielectric Spectra of Undisturbed Soil Samples / K. Lauer, N. Wagner, P. Felix – Henningsen // European Journal Soil Science. – 2012. – V. 63. № 2 – P. 224–238.
5. Чудинова С.М., Понизовский А.А. Влияние гранулометрического состава на характер калибровочной зависимости при измерении влажности почв методом TDR // Почвоведение. – 1998. – № 1. – С. 21–28.
6. Чудинова С.М. Диэлектрические показатели почвы и категории почвенной влаги // Почвоведение. – 2009. – № 4. – С. 441–451.