

УДК 621.371.24

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОСЕВОВ ОВОЩНЫХ КУЛЬТУР

С. П. Головачев, Е. А. Реутов, А. А. Чухланцев, А. М. Шутко

С помощью передвижной наземной установки получены экспериментальные данные об экранирующем влиянии ряда сельскохозяйственных культур при исследовании в диапазоне длин волн 15—30 см в течение срока вегетации. Экспериментальные данные согласуются с расчетными зависимостями. Экспериментально подтверждена правильность методики учета экранирующего влияния растительности при определении влажности почв СВЧ радиометрическим методом — на основе одноволновых измерений и априорном задании коэффициента передачи растительного покрова.

Развитие и отработка методик дистанционного зондирования требуют проведения измерений радиационных характеристик при тщательном контроле показателей состояния исследуемых объектов. Для обеспечения данных условий в последнее время применяются наземные установки, обеспечивающие высокое пространственное разрешение и сопоставление дистанционных и наземных данных с требуемой достоверностью. В настоящей работе представлены методика и результаты экспериментальных исследований СВЧ излучения посевов овощных культур. Работа проводилась с помощью СВЧ радиометрической наземной передвижной установки, и полученные результаты позволили отработать методику определения влажности почв под растительными покровами (РП) СВЧ радиометрическим методом.

Методика учета экранирующего влияния растительности при СВЧ радиометрическом зондировании земной поверхности развита и проанализирована в работах [1—4]. Она заключается в том, что РП описывается одним эффективным параметром — коэффициентом передачи β , который зависит от типа РП, от стадии вегетации, а также от длины волны принимаемого излучения [1, 2, 4]. В связи с этим возникает необходимость исследования временных зависимостей β в течение всего срока вегетации для различных типов РП и статистической изменчивости данного параметра.

В работе приведены данные измерений коэффициента β для таких культур, как томаты и горох, в течение всего периода вегетации. Показано, что усредненные зависимости β от биомассы для данного типа РП могут использоваться при определении влажностных характеристик почвы под растительностью.

Методика экспериментальных исследований. Наземная передвижная установка [5] создана на базе самоходного тракторного шасси Т-16М, на котором установлен СВЧ радиометрический комплекс, работающий в диапазоне длин волн $\lambda = 15\text{—}30$ см. Приемная антенна закреплялась на вращающейся в горизонтальной плоскости двухколенной штанге. Максимальное удаление антенны от оси вращения — 4,5 м, высота над землей — 2,5 м, при этом линейный размер «поля зрения» антенны на поверхности почвы составлял 1—2 м в зависимости от длины волны. Для избежания переотражения излучения между антенной и объектом прием излучения осуществлялся под углом 15° к надиру. Чувствительность радиометрического приемника на входе антенны составляла ~ 2 К при постоянной времени выходного устройства 1 с.

Для измерения коэффициентов излучения $\kappa = T^*/T_0$ исследуемых

объектов применялась калибровка радиометрического комплекса по внутренним и внешним эталонам. В качестве внешних эталонов использовались листы металла и поглощающего материала («черного тела») одинаковых размеров, которые помещались на расстоянии 0,5—1 м от антенны и полностью перекрывали ее диаграмму. Точность калибровки оценивалась по уровню излучения атмосферы (антенна направлялась в зенит) и гладкой водной поверхности. С учетом указанной чувствительности радиометра суммарная погрешность измерения коэффициента излучения оценена величиной $\Delta k \approx 0,03$.

Измерения проводились на опытном сельскохозяйственном участке в Одесской области. Контрольная трасса, вдоль которой проводились измерения, пересекала 13 делянок протяженностью около 30 м каждая. На делянках поддерживались различные режимы увлажнения почвы. Роль буфера, позволяющего исключить влияние делянок с различными режимами полива друг на друга, играли защитные делянки, чередовавшиеся с опытными. С одной стороны вдоль трассы растительный покров был удален. Это позволяло при прямом проходе установки по трассе регистрировать излучение посева, а при обратном — открытой почвы. Измерения проводились с интервалом 2—3 дня в характерные сроки вегетации (июнь — горох, июль—сентябрь — томаты).

Наземные измерения, проведенные совместно с сотрудниками ВНИПКИ «Консервпромкомплекс», включали:

- определение влажности почвы на различных горизонтах на каждом участке термостатно-весовым методом;
- определение биомассы посева по массе «среднего» растения и известной плотности растений на делянке.

СВЧ излучение открытой почвы. Измерения коэффициента излучения открытой почвы в процессе нескольких циклов увлажнения—высыхания позволили исследовать влияние неоднородного по глубине увлажнения почвы на ее излучательные характеристики. В результате дистанционных и наземных контактных измерений получены:

- зависимости коэффициента излучения открытой почвы на длинах волн 15,8 и 27 см от влажности почвы на различных горизонтах в динамике высыхания от значения полевой влагоемкости (иногда от значения полной влагоемкости) до влажности завядания;
- профили влажности почвы по глубине в слое 0—30 см в процессе высыхания после полива.

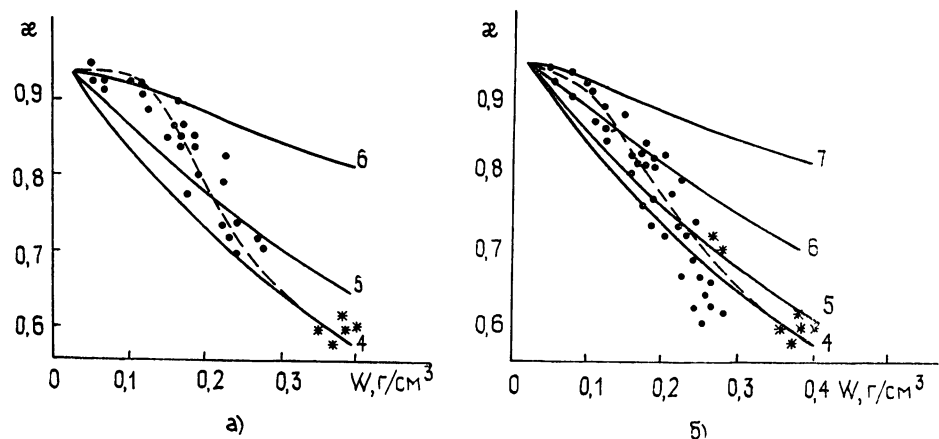


Рис. 1. Зависимость коэффициента излучения от влажности почвы в слое 0—20 см (1) и 0—5 см (2) и от влажности на нижней границе переходного слоя толщиной 0 см (однородное увлажнение) — 4, 1 см — 5, 2 см — 6; 3 см — 7 на длине волны 16 см (а) и 27 см (б), \odot \ominus \oplus — 1; *** — 2, — — — 3, 1, 2 — эксперимент, 3 — расчетная зависимость в динамике высыхания.

Данные измерений коэффициента излучения k в зависимости от влажности почвы приведены на рис. 1, где они сопоставлены с расчетной зависимостью для однородно увлажненной почвы [8]. Как следует

из рис. 1, расчетная зависимость $\kappa_\lambda(W)$ для однородно увлажненной почвы совпадает с экспериментальными данными лишь при значениях влажности поверхностного слоя почвы, близких к полной и наименьшей влагоемкости. По мере высыхания почвы указанные зависимости существенно расходятся, так как профиль влажности по глубине становится неоднородным.

Характерные усредненные профили влажности почвы по глубине представлены на рис. 2. Как следует из данных рис. 2, на поверхности почвы образуется переходный слой, толщина которого растет в процессе высыхания. Изменения влажности почвы в переходном слое характеризуются весьма большими градиентами.

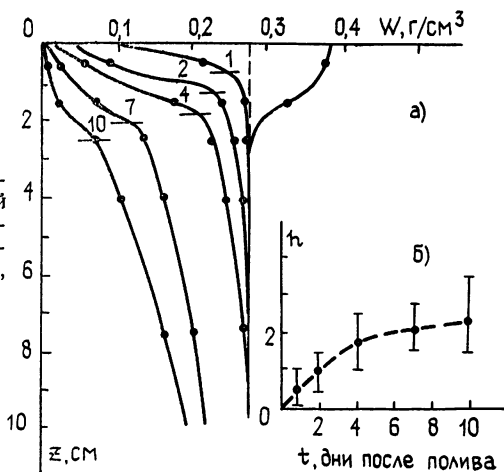


Рис. 2. Характерные профили влажности по глубине (а) (цифры у профилей обозначают количество дней, прошедших после полива) и зависимость толщины переходного слоя h от времени, прошедшего после полива (б).

Особенности СВЧ излучения неоднородно увлажненных почв рассмотрены в работах [7,8]. В частности, в [8] показано, что СВЧ излучательные характеристики почв с переходным слоем определяются его толщиной h и значением влажности W на его нижней границе. Оценки h и W могут быть получены, как показано в [8], по данным спектральных измерений.

При одноволновых измерениях зависимость $\kappa_\lambda(W)$ может быть построена (кривая 3 на рис. 1) по зависимостям $\kappa_\lambda(h, W)$, полученным в [8] с учетом данных об изменении h и W в процессе высыхания (рис. 2). Как следует из рис. 1, указанная зависимость хорошо согласуется с экспериментальными данными. Следует отметить, что, по-видимому, вид кривой $\kappa_\lambda(W)$ будет зависеть от климатического района (скорости образования и толщины переходного слоя) и для получения независимых оценок h и W требуется проведение спектральных измерений [8]. Тем не менее, как показали настоящие исследования, проведенные в течение всего срока вегетации и нескольких циклов увлажнения—высыхания, для данного региона зависимость $\kappa_\lambda(W)$ является достаточно устойчивой, что определяет возможность оценки влажности почвы по данным измерений СВЧ излучения на одной длине волны.

На рис. 1 расчетная зависимость коэффициента излучения от влажности почвы на нижней границе переходного слоя сопоставлена с данными измерений κ в зависимости от средней влажности почвы в определенном слое (в данном эксперименте — в слое 0—20 см), которая определяется в практике агрометеонаблюдений. Согласование экспериментальных и расчетных данных в этом случае объясняется тем, что ниже переходного слоя влажность почвы слабо меняется по глубине (рис. 2), а относительный вклад переходного слоя в среднюю влажность слоя толщиной $d \gg h$ мал.

СВЧ излучение системы «почва — растительный покров». Измерения, проведенные в течение всего срока вегетации, позволили исследовать временную зависимость экранирующего влияния указанных типов РП на СВЧ излучение почвы. По данным измерений получены:

— характерные значения (и их сезонное изменение) коэффициента передачи β посевов томата и гороха;

— данные о взаимосвязи экранирующих и биометрических характеристик РП.

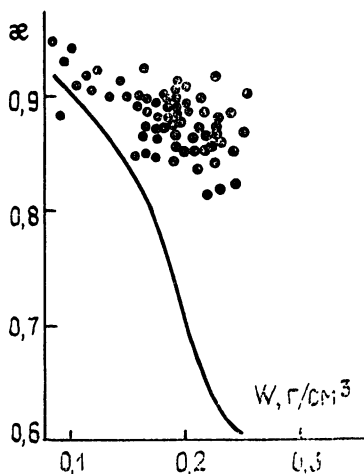
На рис. 3 представлены данные измерений коэффициента излучения посева томатов на длине волны 27 см в зависимости от влажности почвы. Там же приведена радиационно-влажностная зависимость, полученная по данным измерений для открытой почвы. Как следует из рис. 3, неучет экранирующего влияния растительности может приводить к значительным погрешностям в оценке влажности почвы, достигающим значений 0,1—0,15 г/см³, что составляет 30—50% от всего диапазона изменения продуктивной влаги для данного типа почв.

В настоящей работе величина β определялась в соответствии с предложенной в [1] методикой по данным измерений коэффициента излучения посева и открытой почвы с той же влажностью, что и в посеве (на той же делянке), из соотношения

$$\beta \approx (1 - r_0 - \kappa_c) / (1 - r_0 - \kappa_n). \quad (1)$$

Величина r_0 оценивалась в эксперименте по значению κ_c посева с максимальной биомассой и минимальной влажностью почвы ($\kappa_n \approx 0,9 \div 0,95$) и составила в диапазоне длин волн 15—30 см 0,03—0,05 для томатов и менее 0,03 для гороха. Основная погрешность определения β по данной методике связана с различием значений $\Delta \kappa_n$ в посеве и для открытой почвы. По данным прямых измерений и косвенных оценок, по временным зависимостям κ_c и κ_n в процессе высыхания почвы величина $\Delta \kappa_n$ при значениях $1 - \kappa_n \approx 0,2 \div 0,3$, используемых в эксперименте для определения β , не превышала 0,03—0,06. Это обеспечивало оценку β с относительной погрешностью 0,1—0,3.

Рис 3. Зависимость коэффициента излучения посева томатов от влажности почвы в слое 0—20 см.



Экспериментальные данные коэффициента передачи β томатов в зависимости от массы одного куста представлены на рис. 4а. Разброс экспериментальных значений вызван как указанными выше погрешностями оценки β , так и естественной изменчивостью за счет различной густоты растений и состояния посевов на делянках с различным режимом увлажнения почвы. Ряд значений β в течение вегетации получен путем непосредственного срезания посева, как описывалось выше. Найденные значения β согласуются с данными измерений по принятой в работе методике (рис. 4а).

Экспериментальные значения β сопоставлены на рис. 4а с расчетной зависимостью β от биомассы растительного покрова на единицу площади Q , рассчитанной по выражению [2]

$$\beta \approx \exp(-2\tau), \quad \tau = (\zeta_l \eta_l + \zeta_c \eta_c + \zeta_{пл} \eta_{пл}) Q, \quad (2)$$

где τ — интегральное ослабление СВЧ излучения в растительности. $\phi_l, \phi_c, \phi_{пл}$ — коэффициенты удельного ослабления СВЧ излучения листьями, центральными стеблями и плодами, $\eta_l, \eta_c, \eta_{пл}$ — относительные весовые содержания листьев, стеблей и плодов в посеве. Значения коэффициентов удельного ослабления определяются соотношениями [10]

$$\phi_l \approx u/\lambda, \quad \phi_c \approx \sin^2 \theta v/\lambda, \quad \phi_{пл} \approx 0,3 \sigma_0^{отн} / 4 R_{пл}, \quad (3)$$

где $\phi_l, \phi_c, \phi_{пл}$ — в неп/кг/м²; λ — в см, $u \approx 3-5$, $v \approx 7-9$ — коэффициенты, зависящие от формы и ориентации фитоэлементов, θ — угол визирования от нормали, $\sigma_0^{отн}$ — среднее относительное сечение ослабления

плода томатов, R — его средний радиус (в сантиметрах). Расчет $\sigma_0^{отн}$ для модели томатов в виде водяных шаров проведен в [10]. На длине волны $\lambda = 27$ см $\xi_{л} \approx 0,11$, $\xi_{с} \approx 0,02$, $\xi_{пл} \approx 0,008$. Определяющий вклад в ослабление на этой волне вносят листья (с боковыми стеблями). Экспериментально это подтверждается тем, что в сентябре месяце накопление биомассы в посевах происходило, в основном, за счет плодов, в то же время значение коэффициента передачи β существенно не изменилось. При расчетах использованы данные биометрических наблюдений о накоплении биомассы в посевах и ее распределении по различным органам растения.

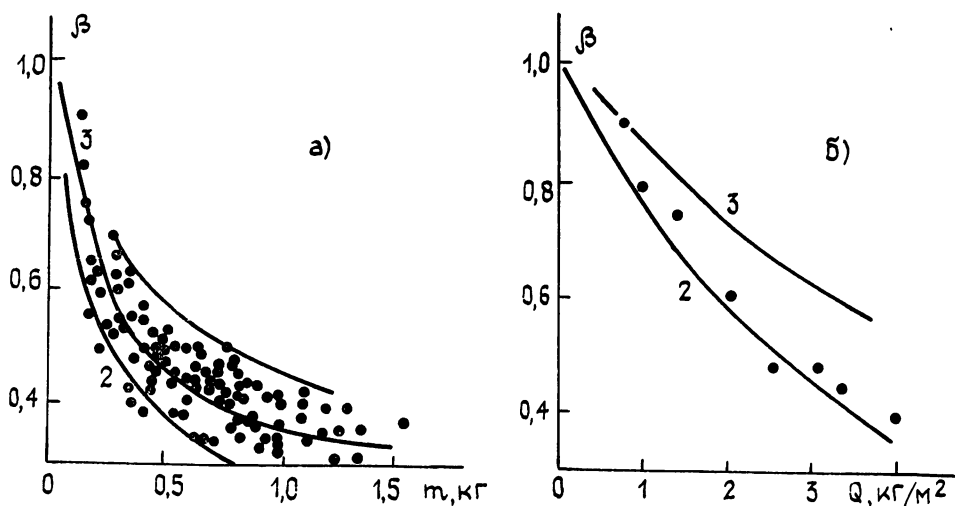


Рис. 4. а) Зависимость коэффициента передачи посева томатов на длине волны 27 см от массы одного куста:

1 — эксперимент (●●●), 2 — расчет при 7 кустах на 1 м²; верхняя кривая — расчет при 10 кустах на м²; 3 — усредненная зависимость.

б) Зависимость коэффициента передачи гороха (1, 2) и колосовых (3) на длине волны 27 см от биомассы:

1 — эксперимент (●), 2 — расчет.

Усредненная зависимость коэффициента передачи β (рис. 4 а) от биомассы (стадии вегетации посева) использована для определения коэффициента излучения почвы под растительностью, а затем влажности почвы по радиационно-влажностной зависимости для открытой почвы (рис. 1). Погрешность определения влажности почвы при учете влияния РП не превысила 0,04—0,06 г/см³, что согласуется с результатами работ [4, 9].

Аналогичные приведенным результаты получены для посевов гороха. Экспериментальные данные коэффициента передачи β для гороха (рис. 4 б) удовлетворительно согласуются с расчетной зависимостью по выражению [10]

$$\beta \approx \exp(-2uQ/\lambda) \quad (4)$$

при $u = 3,5$. Анализ полученных данных для β и сопоставление их с известными, например, для колосовых (рис. 4 б) подтверждает выводы работ [1, 2, 4] о том, что экранирующее влияние существенно зависит от типа РП.

При практическом использовании рассмотренной методики учета влияния РП значения биомассы могут быть получены либо непосредственно из данных биометрических измерений, либо путем экспертной оценки состояния посева с относительной погрешностью определения биомассы не хуже 30% [4].

Заключение. Развита и отработана методика исследования СВЧ радиационных характеристик почв и растительных покровов и опреде-

ления характеристик ослабления СВЧ излучения РП с помощью передвижной наземной установки.

Получена устойчивая радиационно-влажностная зависимость для открытой неоднородно увлажненной почвы в динамике увлажнения — высыхания. Теоретически эта зависимость удовлетворительно описывается моделью с поверхностным переходным слоем. Найденная зависимость позволяет производить оперативное определение влажности почвы в слое почвы 0—20 см по данным измерений на одной длине волны.

Получены значения коэффициента передачи β для ряда сельскохозяйственных культур в течение срока вегетации. Показано, что в исследованном диапазоне длин волн определяющий вклад в ослабление СВЧ излучения в томатах вносит биомасса листьев (с боковыми стеблями), а вклад плодов незначителен. Для культур, которые характеризуются квазихаотической ориентацией и малыми размерами фитоэлементов (горох), вклад в ослабление вносит вся биомасса (все органы) посева.

Экспериментально проверена методика дистанционного СВЧ радиометрического определения влажности почвы в системе «почва—РП», основанная на одноволновых измерениях и априорном задании коэффициента передачи РП по данным наземных измерений биомассы или по экспертной оценке состояния посева. Использование данной методики позволяет определять влажность почвы в реальных условиях с погрешностью не более 0,04—0,06 г/см³ при биомассе РП до 4 кг/м².

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирдяшев К. П., Чухланцев А. А., Шутко А. М. // Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24. № 2. С. 256.
2. Чухланцев А. А., Шутко А. М. // Геодезия и аэрофотосъемка. 1982. № 2. С. 80.
3. Ulaby F. T., Razani M., Dobson M. C. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1983. V. GE-21. № 1. P. 51.
4. Чухланцев А. А., Шутко А. М. // Исследование Земли из космоса. 1983. № 2. С. 67.
5. Головачев С. П., Клевицкий З. С., Мальцев М. Л. и др. // Тезисы докл. Всесоюзного науч.-техн. симпоз. Дистанционное зондирование земных покровов радиометодами. — М.: Радио и связь, 1985. С. 124.
6. Башаринов А. Е., Шутко А. М. // Радиотехника и электроника. 1978. Т. 23. № 9. С. 1778.
7. Реутов Е. А., Шутко А. М. // Исследование Земли из космоса. 1985. № 1. С. 73.
8. Реутов Е. А., Шутко А. М. // Исследование Земли из космоса. 1986. № 1. С. 73.
9. Shutko A. M. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1982. V. GE-20. № 1. P. 18.
10. Чухланцев А. А., Шутко А. М. // Исследование Земли из космоса. 1987. № 5. С. 42.

Институт радиотехники и электроники
АН СССР

Поступила в редакцию
17 марта 1987 г.
после переработки
19 июля 1988 г.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MICROWAVE EMISSION OF VEGETABLE CROPS

S. P. Golovachev, E. A. Reutov, A. A. Chukhlantsev, A. M. Shutko

Experimental investigations have been conducted to study the screening effect of a number of crops. The radiometric measurements were carried out at the wavelength of 15—30 cm using moving ground platform. Experimental data are in a good agreement with calculated results. The procedure for one-channel microwave remote sensing of soil moisture using a priori information about crop loss factor is offered. Data about screening effect of vegetation may be obtained using experimentally confirmed technique.