

Особенности применения многочастотной радиолокационной информации при дистанционных исследованиях аграрных территорий

С. Е. Яцевич¹, В. К. Иванов¹, Е. И. Яцевич¹,
А. В. Шатохин²

¹Институт радиофизики и электроники НАН Украины ім. А. Я. Усикова, Харьков

²Национальный центр Институт грунтоведения и агрохимии УААН им. А. Н. Соколовського, Харьков

Для рационального использования природных ресурсов, экологического мониторинга покровов суши необходимо разработать и ввести в практику природопользователей дистанционные методы определения характеристик почвенного и растительного покровов, различного рода проявлений антропогенного характера на эти подстилающие поверхности. Актуальность решения этих задач не вызывает сомнения, так как традиционные методы контактных измерений обеспечивают получение информации с недостаточной для большинства практических задач детальностью в пространстве и времени и, кроме того, оказываются трудоемкими.

Решение всех указанных выше проблем невозможно без внедрения дистанционных методов исследования Земли, основанных на анализе структуры сигналов, сформированных в результате отражения или излучения электромагнитных волн природными образованиями. Для получения наиболее полной информации об изучаемых подстилающих поверхностях необходимо использовать широкий спектр электромагнитных колебаний, поскольку разные его участки содержат различную информацию об окружающей среде. Достаточно интенсивно используются данные оптического и инфракрасного диапазонов, позволяющие выделить информацию о состоянии растительного покрова и земной поверхности (оптический диапазон), о ее температуре, скрытых пожарах, утечках нефти и газа (инфракрасный диапазон). Существенным недостатком этих диапазонов является зависимость от погоды, так как облачность и темное время суток не позволяют получить информацию о состоянии поверхности. Радиофизические методы дистанционного зондирования свободны от этих недостатков и отлича-

ются высокой проникающей способностью. Эти методы основаны на связи геометрических и электрофизических характеристик поверхностных и подповерхностных образований с параметрами отраженных или излученных поверхностью сигналов.

РАССЕЯНИЕ РАДИОВОЛН ПОЧВАМИ И РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ

При радиолокационных методах изучения системы, включающей растительный покров и почву, на которой он произрастает, удельная эффективная поверхность рассеяния (УЭПР) выглядит как [7, 9]:

$$\sigma_{\Sigma}^0(\theta) = \sigma_p^0(\theta) + \sigma_n^0(\theta)/L^2(\theta), \quad (1)$$

где $\sigma_p^0(\theta)$ — УЭПР растительного покрова; $\sigma_n^0(\theta)$ — УЭПР почвы, $L(\theta)$ — коэффициент ослабления электромагнитного поля в слое растительности.

На частотах свыше 8 ГГц при $\theta \geq 30^\circ$ удельный вклад первого слагаемого оказывается преобладающим, в то время как на более низких частотах и при $\theta = 10...30^\circ$ более заметным является вклад второго слагаемого.

В более сложном, приближенном к реальности, случае обратное рассеяние от этой системы моделируется выражением

$$\sigma^0 = \sigma_n^0 + \sigma_p^0 + \sigma_{int}^0. \quad (2)$$

Первое слагаемое в этом случае соответствует модели малых возмущений [8].

Объемное рассеяние растительным покровом определяется эмпирической зависимостью, основанной на использовании усовершенствованной «модели покровного облака» [11]:

$$\sigma_p^0 = 0.742w(1 + 0.536w\tau - 0.237(w\tau)^2) \times [1 - \exp(-2.119\tau \sec\theta)] \cos\theta, \quad (3)$$

где $w = k_s/(k_s + k_a)$ — альбеда растительного слоя, $\tau = (k_s + k_a)h$ — его оптическая толщина, k_s и k_a — коэффициенты рассеяния и поглощения, h — физическая толщина слоя, θ — угол падения электромагнитного излучения. Взаимодействие поверхность—объем в предположении, что в структуре растительности доминирующими являются случайно распределенные дискообразные рассеивающие элементы (листья), описывается эмпирическим выражением для ГГ поляризации [11]:

$$\sigma_{int}^0 = 1.924w [1 + 0.924w\tau + 0.398(w\tau)^2] \times [1 - \exp(-1.925\tau \sec\theta)] \exp[-1.372\tau^{1.12} \sec\theta] \times \exp[-0.836(k\sigma)^2 \cos\theta] |R_{rr}|^2 \cos\theta, \quad (4)$$

где $|R_{rr}|^2$ — коэффициент Френеля.

Такого типа модель пригодна для низкой растительности (соя, клевер и т. п.). В случае же, к примеру, созревшей кукурузы, листья которой высыхают и содержат незначительную часть общего влагосодержания растительного покрова (с точки зрения диэлектрических характеристик) являются вертикально ориентированные цилиндры (стебли), и значение σ_{int}^0 определяется более общим выражением

$$\sigma_{int}^0 = 2\exp[-4(k\sigma)^2 \cos^2\theta] \exp(-2\tau \sec\theta) |R_{rr}|^2 |R_{st}|^2, \quad (5)$$

где $|R_{st}|^2$ — эффективная отражательная способность стеблей растений, величина которой пропорциональна их влагосодержанию.

Для учета вклада второго компонента в выражение (1) практическое применение находят три типа теоретических моделей: Кирхгофа, физической и геометрической оптики (метод касательной плоскости) и метода малых возмущений [1, 2, 12]. Эти модели в общем виде представляют собой произведение двух функций:

$$\sigma_{pp}^0(f, \theta_i) = D_{pp}[\varepsilon_s(f), \theta_i] S[(f, \theta_i)], \quad (6)$$

где D_{pp} представляет собой функцию, описывающую диэлектрические свойства среды, зависящую от поляризации и угла облучения; функция S учитывает влияние шероховатости поверхности и описывается в случае рассеяния на случайных изотропных поверхностях одномерной корреляционной функцией $\rho(\xi)$ поверхностного профиля $h(z)$ или спектром поверхностных неровностей.

Использование на ранних стадиях исследований природной среды Земли одночастотных радиолокационных систем не позволило однозначно связать параметры радиолокационного сигнала с параметрами поверхности (шероховатостью, диэлектрической проницаемостью и т. д.), что явно следует из

вида уравнений (1), (2), (6), включающих достаточно большое количество переменных величин.

Теоретические и экспериментальные проведенные в ИРЭ НАНУ [3, 5, 10] показали, что разработка многочастотных систем, работающих на нескольких частотах и поляризациях излученного сигнала, с совместной обработкой полученных многоканальных данных, позволит увеличить объемы получаемой информации и приблизиться к определению однозначной связи параметров исследуемых поверхностей с характеристиками рассеянного сигнала СВЧ. Другим путем повышения информативности может служить повторная съемка одних и тех же территорий под одинаковыми углами, проведенная за короткий промежуток времени, либо одновременное наблюдение их под разными углами визирования.

Исследования показали, что излучение миллиметрового (ММ) диапазона взаимодействует с верхним слоем растительного покрова, сантиметровое (СМ) излучение проникает внутрь слоя растительности, достигая почвы, дециметровое (ДМ) и метровое (М) излучение практически не испытывает влияния растительности и проникает в почву на глубину, которая зависит от диэлектрических свойств почвы. Синхронное зондирование во всех этих диапазонах обеспечивает послойное наблюдение почв и растительного покрова, что позволяет по-новому решать задачи дистанционного зондирования аграрных территорий.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АГРАРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

С 1981 по 1995 гг. разработанные методы прошли экспериментальную проверку на ряде тестовых полигонов с использованием разработанного в ИРЭ НАН Украины многочастотного радиолокационного комплекса, размещенного на самолете-лаборатории Ил-18 [4]. В состав комплекса входили радиолокаторы с реальной апертурой миллиметрового и сантиметрового диапазонов, дециметрового и метрового диапазонов с синтезированием апертуры. Для комплекса радиолокаторов характерны совмещенные полосы обзора (в среднем 30 км) и согласованное пространственное разрешение (в среднем 20—50 м). Для всех радиолокаторов применена автоматическая бортовая внутренняя калибровка [6]. В состав аппаратуры также входил сканирующий радиометр миллиметрового диапазона с полосой обзора 10 км, пространственным разрешением 100 м с высоты 7000 м.

Летные исследования были дополнены совместными наземными контактными измерениями агрофизических характеристик почв и растительности

на опытных полигонах, гидрометеорологической и другой наземной информацией.

Тестовые полигоны находились на севере, юге, юго-востоке и юго-западе и западе Харьковской области. Общая площадь полигонов составила около 10000 км². Исследуемые районы представляет собой лесостепную геосистему с интенсивным сельскохозяйственным использованием земель. Ее динамика характеризуется относительно быстрой сменой состояний, обусловленной как гидрометеорологическими факторами, так и ростом и развитием растительного покрова. Территории полигонов присущ волнистый рельеф, разделенный балками на ряд межбалочных водоразделов. Вершины водоразделов сравнительно узкие, склоны пологие. Расчлененность массивов, наличие склонов различной крутизны, глубокий базис эрозии обусловили на полигонах интенсивное развитие эрозионных процессов.

Наиболее распространенной почвообразующей породой на территории полигона являются лессовые породы, которые залегают на выровненных участках и склонах местных водоразделов, основной механический состав тяжелосуглинистый. На таких породах сформировались сравнительно плодородные почвы, основной из которых является типичный для северной подзоны степи мощный средне-гумусовый чернозем и реградированные оподзоленные почвы.

Естественная растительность представлена в основном степными злаками и луговыми видами растений, а также культурами сплошного сева. В верхоях оврагов и балок находятся массивы лиственных лесов. На участках развития песчано-боровых террас произрастают сосновые леса.

Высокое разнообразие растительных сообществ на фоне сельскохозяйственных угодий обеспечивает высокую мозаичность радиолокационных изображений полигона, что является благоприятным фактором при установлении основных закономерностей сезонной динамики радиоотражательных характеристик.

Радиолокационная съемка была проведена синхронно с полевыми работами, включающими отбор проб грунта и растительного покрова с их последующей камеральной обработкой.

Параллельно проводились измерения и описание состояния растительного покрова и степени обработки полей (высота растений, площадь проективного покрытия, направление вспашки, глубина борозд, комковатость и пр.).

На рис. 1 приведены радиолокационные изображения (РЛИ) тестового полигона в X-, L-, VHF-диапазонах радиоволн. На них отчетливо видны исследуемые поля, разделяющие их лесополосы, овраги, лесные массивы, поселки. Изменение интенсив-

ности тона изображения на полях определяется их состоянием на момент съемки, вызывающим вариации отраженного радиосигнала.

Обработка многочастотной информации была проведена методом парной корреляции путем сравнения контактных данных с данными радиолокаторов различных длин волн.

Оценивались следующие параметры: плотность почвы (до глубины 50 см), содержание физической глины (до глубины 50 см), влажность почвы в % от массы и объема (до глубины 50 см). Использовались геоморфологические характеристики площадок (уклоны, экспозиции высот и пр.), а также такие показатели как емкость нанорельефа и максимальный размер глыб на полях и др.

По итогам вычислений наибольшая корреляция рассеянного сигнала с плотностью грунта наблюдается на глубинах 0—10 и 10—20 см в сантиметровом и дециметровом диапазонах. В метровом диапазоне коэффициент корреляции составляет 0.53—0.56 для слоев 0—10, 10—20, 20—30 см. Из всех характеристик грунта радиолокационные данные наиболее связаны с плотностью грунта в слое 0—10 см, причем этот показатель уменьшает свое влияние на отражательную способность по мере увеличения длины волны радиолокатора.

Наибольшая связь между содержанием объемной влаги обнаружена в слое 0—10 см для дециметрового (0.58) и метрового (0.6) диапазонов. В более глубоких слоях такая зависимость не наблюдается.

Обработка РЛИ позволила оценить связь с содержанием влаги в грунте (в весовых процентах). Эта связь наиболее выражена в сантиметровом диапазоне на глубинах 10—20 и 30—40 см. ($r = 0.53$).

Для учета комплекса показателей системы «почва—агрофон» использовалась модель в основе которой лежит уравнение многомерной линейной пошаговой регрессии. Проводилось построение уравнения зависимости РЛ данных по каждому диапазону со следующими переменными: x_1 — объемная влажность агрофона, x_2 — влажность растительности, x_3 — площадь проективного покрытия, x_4 — содержание физической глины на глубине 0—20 см, x_5 — плотность почвы на глубине 0—10 см.

В ходе обработки были получены следующие уравнения регрессии:

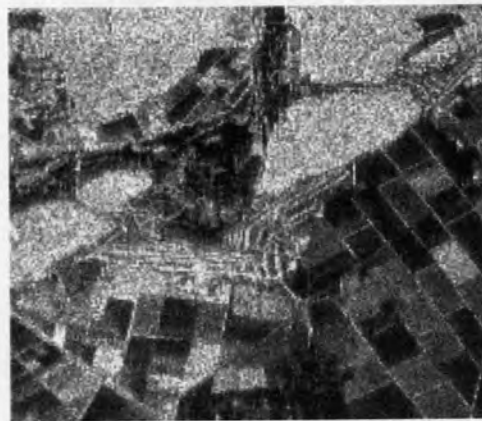
$$Y_{\text{см}} = -66.93 + 0.49x_1 - 0.65x_2 + 5.89x_4 - 147.89x_5 \\ (R = 0.89; R^2 = 0.79), \quad (7)$$

$$Y_{\text{дм}} = 145.7 - 1.03x_2 + 1.03x_3 - 96.42x_5 + 0.75x_1 \\ (R = 0.89; R^2 = 0.79) \quad (8)$$

$$Y_{\text{м}} = 35.7 - 0.27x_2 - 57.2x_5 + 1.54x_4 + 0.2x_1 \\ (R = 0.65; R^2 = 0.42), \quad (9)$$



а

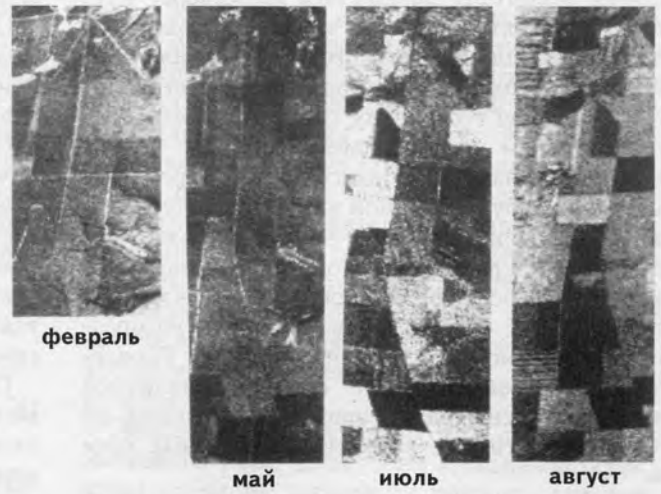


б



в

Рис. 1. Радиолокационные изображения тестового полигона: а — сантиметровом (X), б — дециметровом (L) и в — метровом диапазонах радиоволн (VHF)



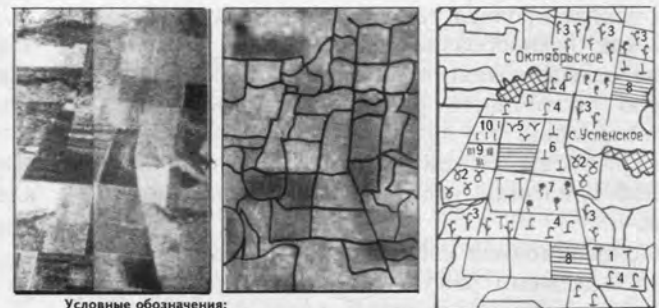
февраль

май

июль

август

Рис. 2. Сезонная радиолокационная съемка полигона радиолокатором трехсантиметрового диапазона



Условные обозначения:

1- подсолнечник, 2- свекла, 3- кукуруза, 4- ячмень, 5- овес, 6- люцерна,
7- рожь, 8- пшя, 9- многолетни травы, 10- пшеница

Рис. 3. Совместное радиолокационно-радиометрическое изображение полигона и тематическая карта сельскохозяйственных культур

где $Y_{см}$, $Y_{дм}$, $Y_{м}$ — нормированная РЛ-интенсивность в сантиметровом, дециметровом и метровом диапазонах радиоволн соответственно, R — множественный коэффициент корреляции, R^2 — коэффициент детерминации.

Второе направление дешифрирования РЛ-снимков базировалось на использование метода иерархического кластерного анализа. Вычисления проводились по алгоритму Уорда в евклидовом пространстве. В качестве векторов, описывающих многомерное пространство, выступали данные РЛ-съемки в различных диапазонах радиоволн. Дендрограммы представляют собой результат кластерного анализа в виде графического отображения разделения образцов по классам. При этом по горизонтальной оси откладываются номера объектов через равные интервалы, а по вертикальной — значение меры схожести между этими объектами. В качестве меры схожести использован коэффициент слития, показывающий расстояние между классами в заданном многомерном пространстве.

Целью исследований являлось определение вклада показателей состояния «почва—агрофон» в формирование РЛ-сигнала. Для получения качественных результатов на тестовом полигоне отбирались площадки, идентичные по всем характеристикам, кроме изучаемой. Например, при распознавании растительного покрова все исследуемые участки имели сходные почвенные характеристики. В данных условиях четкость разделения объектов по изучаемому признаку позволила говорить как о чувствительности к нему какого-либо радиодиапазона или их комбинаций, так и о степени влияния данного параметра на отраженный радиосигнал.

Для исследования взаимосвязи РЛ-данных с гранулометрическим составом почв были отобраны поля с «легкими почвами» (супесчаные и легкосуглинистые с содержанием физической глины 10—30 %) и «тяжелые» (легкоглинистые и среднеглинистые с содержанием физической глины 60—85 %). На отобранных площадках «легкого» и «тяжелого» гранулометрического состава проводилось машинное разделение по типам агрофонов с использованием кластерного анализа с обучением. В качестве обучающей выборки использовались вышеупомянутые агрофоны полигона и данные сантиметрового диапазона. Для заведомого исключения влияния растительности на отраженный сигнал использовались вспаханные и боронованные поля. В результате была сформирована группа полей, включающих следующие почвы: черноземы оподзоленные на лессах, подстилаемых на глубине 1—2 м песком, и песках «легкого» гранулометрического состава, а также черноземы, оподзоленные на лесовых породах и плотных глинах — «тяжелого» гранулометрического состава.

Обработка данных кластерным анализом показала, что при любой комбинации радиодиапазонов объекты разделяются на два кластера, однако точность классификации зависит от используемых комбинаций.

Наилучшее распознавание происходит при использовании данных сантиметрового и дециметрового диапазонов (рис. 4).

При исследовании растительного покрова оценивались следующие параметры: площадь проективного покрытия растений, их высота и влажность, объемная влажность агрофона. Последний показатель представляет собой комплексную характеристику агрофона, показывающую содержание влаги в квазиобъеме растительного покрова:

$$W_a = W_r / HS, \quad (10)$$

где: W_a — объемная влажность агрофона, W_r — влажность растительности, H — высота растительности, S — площадь проективного покрытия. Результаты обработки представлены в таблице.

Анализ данных показывает, что наиболее тесная связь наблюдается между отраженными сигналами и показателями агрофона. При этом значения коэффициентов корреляции r между объемной влаж-

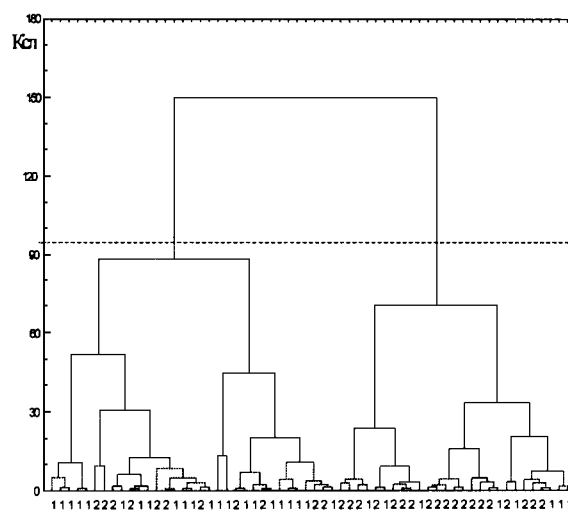


Рис. 4. Распределение грунтов по гранулометрическому составу по данным РЛ-съемки в сантиметровом (3 см), дециметровом (23 см) диапазонах волн: 1 — «легкий» гранулометрический состав, 2 — «тяжелый» гранулометрический состав, пунктир — линия разделения дендрограммы на кластеры

Значения коэффициентов корреляции между данными РЛ-съемки и характеристиками растительности

Показатель	РБОЗ	РСА23	РСА180
W_a	0.78	0.68	0.40
H	0.20	0.27	0.04
W_r	0.61	0.73	0.57

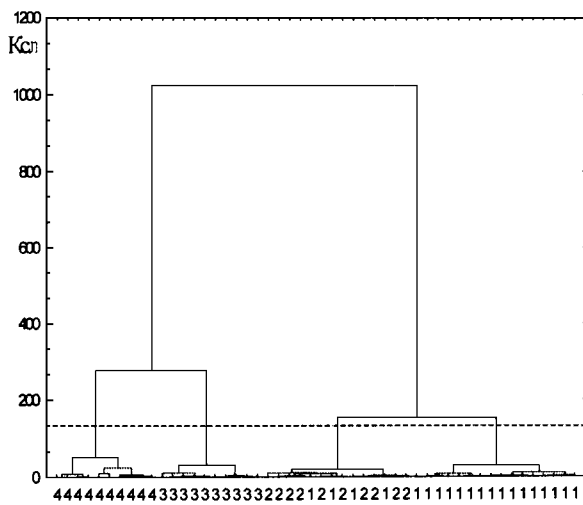


Рис. 5. Распознавание типов агрофонов по данным РЛИ-съемки в сантиметровом диапазоне радиоволн (3 см): 1 — стерня зерновых культур, 2 — многолетние травы, 3 — кукуруза, 4 — сахарная свекла, пунктир — линия разделения дендрограммы на кластеры

ностью агрофона и данными РЛИ уменьшается с возрастанием длины волны ($r_{\text{см}} = 0.78$, $r_{\text{дм}} = 0.68$, $r_{\text{м}} = 0.4$). Также следует отметить большие значения коэффициента корреляции для содержания влаги в растительности.

Для анализа агрофонов были выбраны две группы: а) пропашные культуры (кукуруза, сахарная свекла), б) культуры сплошного сева (стерня зерновых и многолетние травы).

В первой группе выбраны заведомо контрастные агрофона, во второй — очень схожие.

Наилучшее распознавание агрофонов происходит при использовании данных сантиметрового диапазона. Результаты классификации представлены на дендрограмме (рис. 5) (по оси ординат отложен $K_{\text{сл}}$ — коэффициент слития).

Анализ дендрограммы показывает, что происходит четкое разделение агрофонов: кукурузы и сахарной свеклы. Они образуют два непересекающихся кластера. В свою очередь, также четко отделяются от этих агрофонов культуры сплошного сева. Между собой разделение этих культур происходит немного хуже: часть зерновых попадает в кластер «многолетние травы». Это объясняется различным состоянием данных культур (высотой среза стерни и высотой растений многолетних).

В дециметровом и метровом диапазонах радиоволн распознавание типов проективного покрытия происходит значительно хуже ввиду незначительного вклада агрофонов в обратное рассеяние. Комбинированное использование данных нескольких диапазонов не улучшает классификацию.

Наибольшее количество исследований было проведено в сантиметровом диапазоне волн, наиболее чувствительном к обработке пахотного слоя и биометрическим параметрам растительности.

При радиолокационных исследованиях в пределах сельскохозяйственных территорий ранней весной и поздней осенью приходится иметь дело преимущественно с полями, лишенными растительности. Шероховатость таких поверхностей определяется системой обработки пахотного слоя. Типичный сезонный цикл обработки почвы приводит к формированию вспаханных, боронованных, культивированных и засеянных полей, общей отличительной чертой является квазирегулярность поверхностных неровностей (на рис. 2 представлена сезонная съемка полигона, демонстрирующая изменения интенсивности отражения от полей полигона в течение сезона).

По экспериментальным данным было обнаружено, что при больших углах визирования (более 45°) наблюдается линейная зависимость между свойствами растительного покрова (проективное покрытие и высота растений) и интенсивностью отраженного сигнала, причем наиболее тесные связи между этими показателями наблюдаются при исследовании территорий с развитым растительным покровом. Для почвенных характеристик свойственна обратная зависимость — наиболее тесные связи отмечены для площадей со слабо развитым растительным покровом в углах визирования $30\text{--}35^\circ$.

Если при радиолокационной съемке направление обработки почвы неизвестно, то возникают неопределенности в трактовке результатов. Пример, иллюстрирующий это, приведен на рис. 6.

Неопределенность из-за неизвестного направления обработки не создает заметных трудностей, так как первоначальная квазирегулярная структура поверхности со временем становится менее выраженной из-за замытости. Зависимость сохраняется, изменяется лишь σ^0 .

Радиолокационные изображения сельскохозяйственных площадей ранней весной характеризуются мозаичностью, обусловленной главным образом различиями обработки почвенного покрова, которая, в свою очередь, определяется амплитудой и пространственным периодом поверхностных неровностей.

На рис. 7 приведены экспериментальные угловые зависимости УЭПР для полей с различно обработанным почвенным покровом.

Значения УЭПР в диапазоне углов визирования $25\text{--}40^\circ$ наиболее выровненной поверхности (засеянное поле) падает на 6.5 дБ, тогда как для вспаханных и боронованных полей эта величина не превышает 5 дБ.

Сельскохозяйственные растения, культивирован-

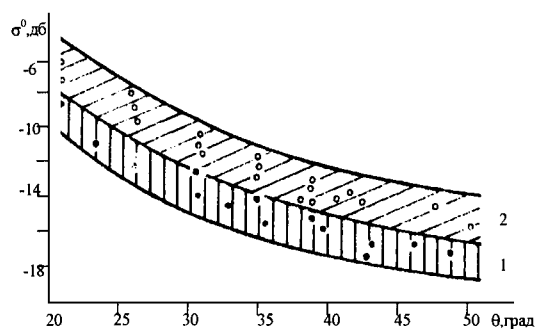


Рис. 6. Экспериментальные угловые зависимости УЭПР для боронованных полей с направлением борозд, параллельным (1) и перпендикулярным (2) направлением обзора

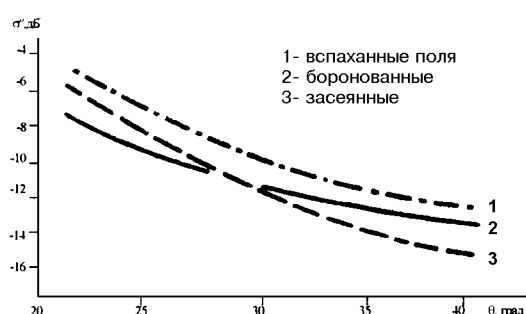


Рис. 7. Экспериментальные угловые зависимости УЭПР для полей с открытым почвенным покровом (направление обзора перпендикулярно бороздам обработки): 1 — вспаханные, 2 — боронованные, 3 — засеянные поля

ные на полигоне дистанционного зондирования, ограничены несколькими видами — кукуруза, ячмень, многолетние кормовые травы, подсолнечник. На рис. 8 приведены экспериментальные угловые зависимости УЭПР для этих культур по результатам радиолокационной съемки, проведенной в первой декаде июля.

Этот период интересен тем, что к концу июня — началу июля растения достигают зрелых стадий вегетации. Подсолнечники и кукуруза обладают наиболее высоким отражением, что обусловлено особенностями ориентации листьев и соцветий этих культур, а также большей, по сравнению с зерновыми, биомассой. Посевы многолетников и ячменя имеют сходные УЭПР, можно лишь отметить чуть более пологий график угловой зависимости для ячменя.

Как показали исследования, сезонный цикл каждой из культур характеризуется тремя основными фазами. Первая фаза — прорастание и развитие посевов, приводит к постепенному росту значений УЭПР. В определенный для каждой культуры период времени значения УЭПР стабилизируются. Это означает переход ко второй фазе, отвечающей зрелой стадии культуры с относительно постоянными

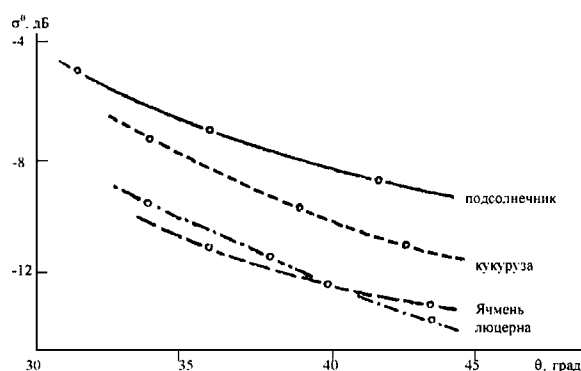


Рис. 8. Экспериментальные угловые зависимости σ^0 сельскохозяйственных растений

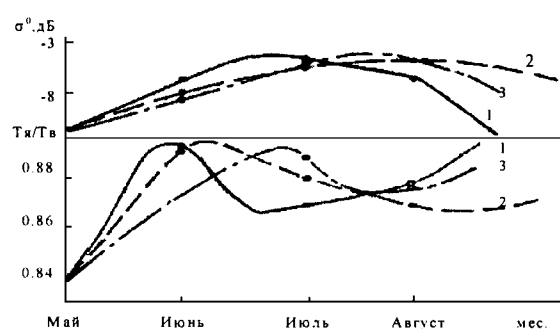


Рис. 9. Зависимость УЭПР от стадий вегетации ($\theta = 30^\circ$)

биомассой и влагосодержанием. Третья фаза отвечает заключительной стадии вегетации — растение резко теряет влагу, часть листьев; УЭПР заметно уменьшается. Эти фазы можно видеть на рис. 9, где в качестве примера рассматриваются посевы подсолнечника (1), свеклы (2), кукурузы (3).

При интерпретации РЛ данных нередко возникали неоднозначности в идентификации типов культур (РБО-3 см). Использование в комплексе системы датчиков радиолокатор-радиометр (РМ-08 см) позволило достаточно уверенно различать типы культур (рис. 3).

Результаты экспериментальной классификации приведены на рис. 10. По оси у отложены данные радиолокатора σ^0 , а по оси x — данные радиометра, характеризующиеся коэффициентом черноты (отношение радиояркой и физической температур подстилающей поверхности).

В случае с подсолнечником наблюдается азимутальная неоднозначность в интерпретации типа культуры, как радиолокатором, так и радиометром. Данная культура уверенно распознается в двух областях (рис. 10) при использовании обоих приборов одновременно. Разница в отражении и излучении заключается в ориентации головок подсолнеч-

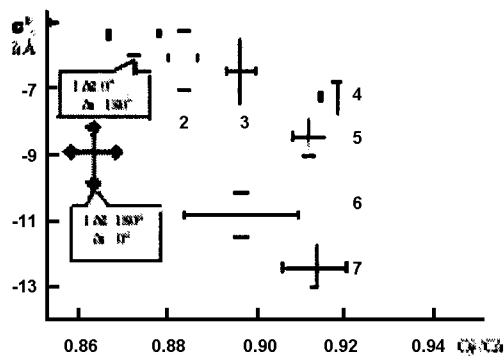


Рис. 10. Распознавание типов сельскохозяйственных культур по данным РБО-3 см и РМ-08 см ($\theta = 40^\circ$): 1 — подсолнечник, 2 — свекла, 3 — кукуруза, 4 — ячмень, 5 — овес, 6 — люцерна, 7 — пашня

ника относительно курса самолета-лаборатории. В данном случае солнце находилось на востоке, и в одном случае его излучение, а соответственно и направленность головок, совпадали с направлением излучения радиолокатора и приема радиометра, а в другом — нет.

Данные радиометра (рис. 9, нижний) также позволяют проследить сезонные изменения коэффициента черноты для посевов подсолнечника, кукурузы и свеклы. Рост Тя/Тв на начальной стадии развития растений связан с существенным влиянием излучения почвы и прекращается в момент полного экранирования почвы растительностью. Различие фенологических фаз развития различных видов растительности позволяют при длительном наблюдении обеспечивать правильную классификацию посевов. В то же время сезонные наблюдения позволяют определять степень созревания посевов, сроки их уборки, а сравнительные характеристики различных сезонов дают возможность прогнозировать урожайность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретически показано, что многочастотные синхронные подходы позволяют успешно проводить исследование параметров почв и растительного покрова. Наличие взаимосвязи между радиолокаци-

онными и агрофизическими характеристиками подтверждено экспериментально. В частности, применение длинноволновых датчиков наиболее характерно для описания почвенных характеристик, таких как влажность, плотность, гранулометрический состав. Коротковолновые датчики наиболее информативны для описания параметров растительного покрова, таких как влажность, высота, проективное покрытие и др.

Исследования, представленные в публикации, выполнены при частичной поддержке ДФФД Украины по плану работы по проекту № Ф7/354-2001.

1. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. — М., 1972.—424 с.
2. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах. — М.: Мир, 1981.—Т. 2.—317 с.
3. Калмыков А. И., Фукс И. М. Модели рассеяния радиоволн подстилающей поверхностью и их учет в системах радиолокационного зондирования // Радиофизика и радиоастрономия.—1996.—1, № 1.—С. 31—41.
4. Калмыков А. И., Цымбал В. Н., Курекин А. С. и др. Многоцелевой радиолокационный комплекс исследования Земли «МАРС» // Радиофизика и радиоастрономия.—1998.—3, № 2.—С. 119—129.
5. Калмыков А. И., Шербинин И. В., Яцевич С. Е. Комплексные радиофизические исследования сельскохозяйственных угодий // Космическая наука и техника: Сб. науч. тр. / АН УССР. — Киев: Наук. думка, 1990.—С. 32—36.
6. Яцевич С. Е., Курекин А. С., Уваров В. Н., Левда А. С. Автоматическая внутренняя калибровка радиолокационных систем дистанционного зондирования // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 2/3.—С. 34—39.
7. Attema E. P., Ulaby F. T. Vegetation modeled as a water cloud // Radio Science.—1978.—N 13(2).—P. 357—364.
8. El-Rayes M. A., Ulaby F. T. Microwave Dielectric Spectrum of Vegetation. Part 1: Experimental Observations // IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.—1987.—25, N 5.—P. 541—557.
9. Hoekman D. H., Krul L., Attema E. P. W. A multilayer model for radar backscattering from vegetation canopies // Digest, II Annual Int. G.S & R. S. Symp. — Munich, 1982.—Vol. II.—P. 4.1—4.7.
10. Kulemin G. R., Shcherbinin I. V., Yatsevich S. E., et al. Physical Principles of Microwave Remote Sensing of Terrains // Proc. of the 6th physics international school «Microwave physics and technique», 2—7 Oct. 1989. — Varna (Bulgaria): Utopia Press, 1989.—P. 16—33.
11. Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K. Microwave remote sensing: active and passive. — Addison-Wesley Publ. Company Inc., Reading, MA, 1982.—Vol. II.—607 p.
12. Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive, From Theory to Applications. — Dedham, MA: Artech House, 1986.—2162 p.