

УДК 528.88:63

## Исследования земельных ресурсов по материалам многочастотной радиолокационной съемки

С. Е. Яцевич<sup>1</sup>, В. Б. Ефимов<sup>2</sup>, В. Н. Цымбал<sup>2</sup>, А. Б. Ачасов<sup>3</sup>, А. В. Шатохин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, Харків

<sup>2</sup>Центр радіофізичного зондування Землі НАН України і НКА України, Харків

<sup>3</sup>Институт ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського УААН України, Харків

Надійшла до редакції 19.10.98

Розглядаються результати дистанційного дослідження системи «агрофон—ґрунт» за матеріалами зйомки багаточастотної авіаційної радіолокаційної системи (МАРС) в  $X$ -,  $L$ - та  $VHF$ -діапазонах. Описуються різні шляхи інтерпретації радіолокаційної інформації.

В настоящее время важное значение приобретают дистанционные методы исследования Земли, направленные на решение природоохранных, мелиоративных, гидрологических и сельскохозяйственных задач, в частности динамики изменения почвенного покрова, связанной с антропогенными нарушениями почв в результате эрозии, заболачивания, отчуждения почв и т. п.

Исторически наибольшее количество исследований проведено в оптическом диапазоне, однако радиофизические методы дистанционного мониторинга Земли с использованием активных систем СВЧ-диапазона находят все более широкое применение благодаря тем преимуществам, которые присущи этим методам. К числу несомненных достоинств радиофизических методов следует отнести существующую связь характеристик рассеянного сигнала с электрофизическими характеристиками почвы и агрофона [3, 5, 6].

Для количественного анализа взаимодействия системы «агрофон—почва» авторами был проведен эксперимент с помощью многочастотного радиолокационного комплекса, размещенного на борту самолета-лаборатории Ил-18Д МАРС, включающего в себя радиолокационные системы сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов с реальной

и синтезированными апертурами [2]. Характеристики системы приведены в табл. 1.

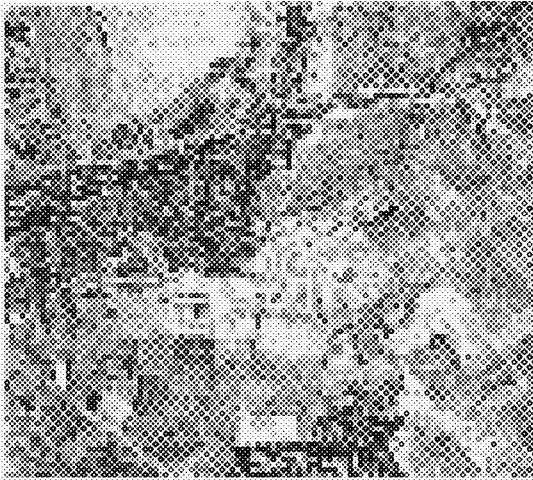
В представленной работе рассмотрены вопросы возможностей получения информации о состоянии почвогрунтов по данным многочастотного радиолокационного зондирования тестовых полигонов путем установления связей между рассеянным сигналом от грунта и его природными морфологическими характеристиками. При этом учитывалась сложность и физическая неоднородность как всей системы «грунт—агрофон», так и отдельно каждой составляющей этой системы.

Таблица 1. Характеристики многоцелевой авиационной радиолокационной системы (МАРС)

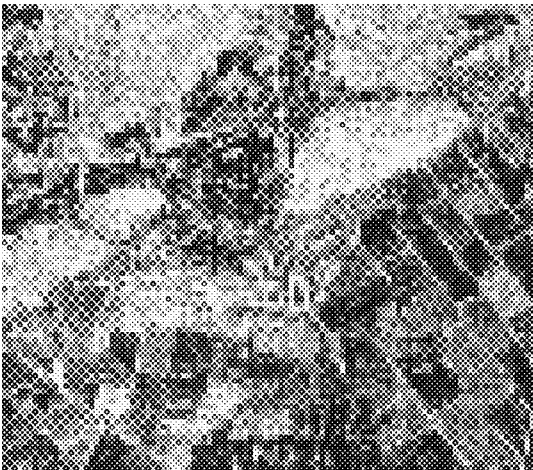
Тип радиолокатора	РБО-3	РСА-23	РСА-180
$\lambda$ , см	3	23	180
Подяризация	ВВ	ВВ, ГГ, ВГ, ГВ	ВВ, ГГ, ВГ, ГВ
Угол падения	20—80°	20—85°	20—85°
Разрешение*, м <sup>2</sup>	30—50	30—50	30—100
		2.5—50**	2.5—50**
Полоса обзора*, км	2×40	30	30

\* — для высоты полета 7000 м,

\*\* — для обработки на земле.



X



L



VHF

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

Для проведения исследований использовался полигон, расположенный на северо-востоке Харьковской области. Этот район представляет собой лесостепную геосистему с интенсивным сельскохозяйственным использованием земель. Ее динамика характеризуется быстрой сменой состояний, обусловленной как гидрометеорологическими факторами, так и развитием растительного покрова.

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 агрофонов и степени обработки полей (высота растений, площадь проективного покрытия, направление вспашки, глубина борозд, комковатость и пр.).

Работы проводились в два периода года — летом (в середине августа) и осенью (в середине октября). Это позволило оценить поля как с растительным покровом, так и после их уборки, вспашки и культивации.

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

#### ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МНОГочАСТОТНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ТЕСТОВОГО ПОЛИГОНА

В качестве первого пути интерпретации РЛИ была выбрана обработка данных методом парной корреляции. На тестовом участке было отобрано 12 контрольных площадок, которые характеризовали состояние земельных угодий на момент съемки. Оценивались плотность почвы (до глубины 50 см), содержание физической глины (до глубины 50 см), влажность почвы в % от массы и объема (до глубины 50 см), площадь проективного покрытия растений, их высота и влажность, объемная влажность агрофона. Последний показатель предложен авторами и представляет собой комплексную характеристику агрофона, показывающую содержание влаги в квазиобъеме растительного покрова:

$$W_a = W_r / H \cdot S,$$

где  $W_a$  — объемная влажность агрофона,  $W_r$  — влажность растительности,  $H$  — высота растительности,  $S$  — площадь проективного покрытия.

Использовались геоморфологические характеристики площадок (уклоны, экспозиции высот и пр.), а также такие показатели, как емкость нанорельефа и максимальный размер глыб на полях.

На РЛИ был проведен выбор «окон» с учетом нахождения точек отбора проб на реальной местности. Каждое «окно» содержало 20 пикселей. В соответствии с общей методикой эти пиксели были сгруппированы по пять и усреднены. Таким образом, при обработке каждая площадка характеризовалась четырьмя элементами радиолокационного образа (ЭРО).

Результаты обработки представлены в табл. 2. Их анализ показывает, что наиболее тесная связь наблюдается между отраженными сигналами и показателями агрофона. При этом значения коэффициентов корреляции  $r$  между объемной влажностью агрофона и данными РЛИ уменьшается с увеличением длины волны ( $r_{см} = 0.68$ ,  $r_{дм} = 0.66$ ,  $r_m = 0.4$ ). Также следует отметить большие значения коэффициента корреляции для содержания влаги в растительности.

Следует отметить наибольшую корреляцию рассеянного сигнала с плотностью грунта на глубинах 0—10 и 10—20 см в см- и дм-диапазонах. В метровом диапазоне коэффициент корреляции составляет 0.53—0.56 для слоев 0—10, 10—20, 20—30 см.

Таким образом, 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.

Наиболее тесная связь между содержанием объемной влаги в слое 0—10 см установлена для дециметрового и метрового 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 ( $r = 0.53$ ).

Анализ приведенных в таблице данных показывает, что характеристики рельефа и шероховатости поверхности слабо коррелируют с данными РЛИ-зондирования. Слабая зависимость объясняется тем, что в данном эксперименте не проводились детальные измерения шероховатости поверхности, в масштабах сравнимых с длиной радиоволны.

Вместе с тем в работах проведенных в ИРЭ НАНУ в 1980-е гг., были установлены устойчивые связи между РЛИ сантиметрового диапазона и параметрами культурной обработки сельскохозяйственных полей. Проведенные профилометрические

Таблица 2. Значения коэффициентов корреляции между данными РЛ съемки и характеристиками комплекса «грунт—агрофон»

Показатель	РБО-3	РСА-23	РСА-180
$W_a$	0.78	0.68	0.40
$G$ (0—20 см)	0.05	0.15	0.31
$G$ (20—40 см)	0.01	0.09	0.27
$G$ (40—60 см)	0.01	0.11	0.28
$W_m$ (0—10 см)	0.27	0.06	0.28
$W_m$ (10—20 см)	0.53	0.31	0.33
$W_m$ (20—30 см)	0.41	0.42	0.43
$W_m$ (30—40 см)	0.53	0.44	0.45
$W_v$ (0—10 см)	0.28	0.38	0.41
$W_v$ (10—20 см)	0.16	0.26	0.32
$W_v$ (20—30 см)	0.02	0.12	0.23
$W_v$ (30—40 см)	0.17	0.03	0.08
$\rho$ (0—10 см)	0.63	0.61	0.56
$\rho$ (10—20 см)	0.58	0.53	0.52
$\rho$ (20—30 см)	0.31	0.34	0.53
$\rho$ (30—40 см)	0.53	0.20	0.21
$H$	0.20	0.27	0.04
$W_r$	0.61	0.73	0.57
$V_n$	0.25	0.34	0.43
$R$	0.31	0.39	0.45
$E$	0.10	0.09	0.06
$N$	0.37	0.48	0.27

Примечание.  $W_a$  — объемная влажность агрофона,  $H$  — высота растений,  $G$  — содержание физической глины,  $W_r$  — влажность растений  $W_m$  — влажность грунта в % от массы,  $V_n$  — емкость нанорельефа,  $W_v$  — влажность грунта в % от объема,  $R$  — размер комков,  $\rho$  — плотность грунта,  $E$  — экспозиция,  $N$  — наклон

измерения и их анализ совместно с полученными РЛИ позволили определять направление вспашки, влияние комковатости поверхности и степени замытости вспашки [1].

Для учета комплекса показателей системы «почва—агрофон» использовалась модель, в основе которой лежит уравнение многомерной линейной регрессии (в нашем случае пошаговой). 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,  $x_4$  — объемная влажность растительности,  $x_5$  — содержание физической глины на глубине 0—20 см,  $x_6$  — плотность почвы на глубине 0—10 см.

В ходе обработки были получены следующие уравнения регрессии:

$$Y_{см} = -66.93 + 0.49x_1 - 0.65x_2 + 147.89x_6 \\ (R = 0.89; R^2 = 0.79),$$

$$Y_{дм} = 145.7 - 1.03x_2 + 1.03x_3 - 96.42x_6 + 0.75x_1 \\ (R = 0.89; R^2 = 0.79),$$

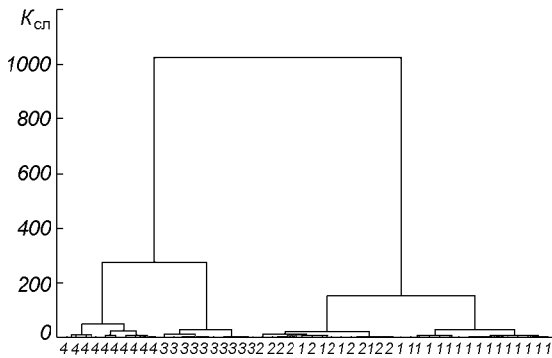


Рис. 2. Распознавание типов агрофонов по данным РЛ-съемки в см-диапазоне радиоволн ( $\lambda = 3$  см): 1 — стерня зерновых культур, 2 — многолетние травы, 3 — кукуруза, 4 — сахарная свекла. Линии показывают разделения дендрограммы на кластеры (по Трондайку)

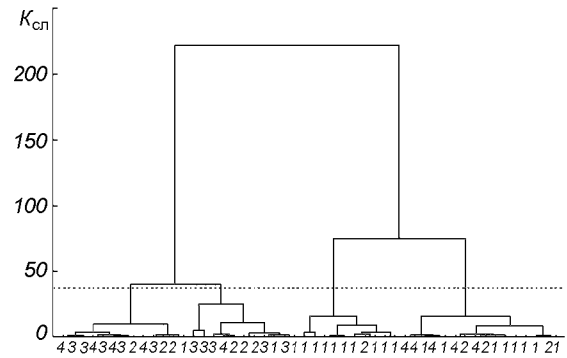


Рис. 3. Распознавание типов агрофонов по данным РЛ-съемки в дм-диапазоне радиоволн ( $\lambda = 23$  см): 1 — стерня зерновых культур, 2 — многолетние травы, 3 — кукуруза, 4 — сахарная свекла. Линии показывают разделения дендрограммы на кластеры (по Трондайку)

$$Y_M = 35.7 - 0.27x_2 - 57.2x_6 + 1.54x_5 + 0.2x_1$$

$$(R = 0.65; \quad R^2 = 0.42),$$

где  $Y_{см}$ ,  $Y_{дм}$ ,  $Y_M$  — 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 использовании кластерного анализа. В качестве векторов, описывающих многомерное пространство, выступали данные РЛ-съемки в различных диапазонах радиоволн.

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 одной — 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 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 агрофоны, во второй — очень схожие.

Для каждого агрофона на РЛ-снимках были выбраны «окна», содержащие по 50 пиксел. После первичной статистической обработки данных, каж-

дое поле характеризовалось десятью ЭРО. Наилучшее распознавание агрофонов происходит при использовании данных см-диапазона.

Результаты классификации представлены на дендрограмме рис. 2 (по оси ординат отложен коэффициент  $K_{сл}$  слития). Согласно критерию Трондайка [4] на ней выделяется четыре класса. Анализ дендрограммы показывает, что происходит четкое разделение контрастных агрофонов: кукурузы и сахарной свеклы. Они образуют два непересекающихся кластера. В свою очередь, так же четко отделяются от этих агрофонов культуры сплошного сева. Между собой разделение этих культур происходит немного хуже: пять ЭРО стерни зерновых попадает в кластер «многолетние травы». Последнее объясняется различным состоянием данных культур (высотой среза стерни и высотой растений многолетних трав).

Проверка классификации по критерию хи-квадрат показала, что расчетное значение  $\chi^2$  с учетом поправки Ятса [4] составляет 125, а табличное — 21.67 (для уровня значимости 0.01). Превышение фактического значения  $\chi^2$  над теоретическим показывает, что достоверность распознавания агрофонов подтверждается на 99 % уровня вероятности.

В дециметровом и метровом диапазонах радиоволн распознавание типов проективного покрытия происходит значительно хуже ввиду незначительного вклада агрофонов в обратное рассеяние (рис. 3, 4). Комбинированное использование данных нескольких диапазонов не улучшает классификацию.

Для исследования гранулометрического состава почв по данным РЛ-данных на территории полигона были отобраны «легкие» почвы (супесчаные и

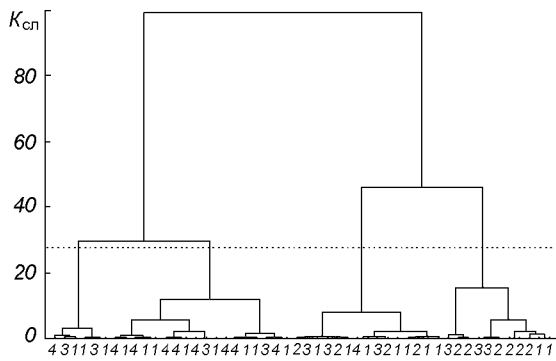


Рис. 4. Распознавание типов агрофонов по данным РЛ-съемки в м-диапазоне радиоволн ( $\lambda = 180$  см): 1 — стерня зерновых культур, 2 — многолетние травы, 3 — кукуруза, 4 — сахарная свекла. Линии показывают разделения дендрограммы на кластеры (по Трондайку)

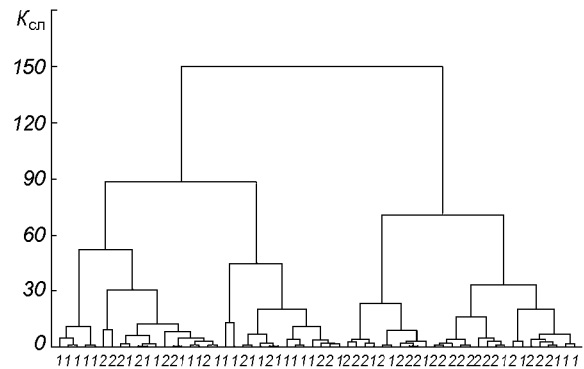


Рис. 5. Распределение грунтов по гранулометрическому составу по данным РЛ-съемки в см- и дм-диапазонах радиоволн: 1 — «легкий» гранулометрический состав, 2 — «тяжелый» гранулометрический состав. Линии показывают разделения дендрограммы на кластеры (по Трондайку)

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 агрофона полигона и данные см-диапазона. Для заведомого исключения влияния растительности на отраженный сигнал использовались вспаханные и боронованные поля. В результате была сформирована группа из шести 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 лессовых породах и плотных глинах — «тяжелого» гранулометрического состава.

Кластерный анализ показал, что при любой комбинации радиодиапазонов объекты разделяются на

два кластера, однако точность классификации зависит от используемых комбинаций. Для оценки точности использован критерий  $\chi^2$ . В табл. 3 представлены значения  $\chi^2$  для различного сочетания радиодиапазонов. Чем больше это значение, тем достовернее классификация.

Наилучшее распознавание происходит при использовании данных см- и дм-диапазонов (рис. 5). В этом случае в первый класс попадает 22 ЭРО почв «легкого» гранулометрического состава и 11 ЭРО почв «тяжелого» гранулометрического состава, во второй класс — соответственно 8 и 19 ЭРО. Сопоставление фактического (8.15) и теоретического (6.63) значений  $\chi^2$  дает основание считать полученную классификацию достоверной при 99 % уровне вероятности.

В третьем случае использовалась методика классификации протяженных (сложных) объектов, основанная на методе аналитической аппроксимации отношения правдоподобия [7]. Использование этого метода позволяет проводить классификацию объектов при негауссовских законах распределения признаков.

В предложенной методике коэффициенты полинома, минимизирующие ошибку аппроксимации, определяются из системы линейных уравнений, которая получена приравниванием к нулю производных ошибки аппроксимации по коэффициентам. Известные коэффициенты равенств получены через оценки моментов выборок обучения. Решение о принадлежности неизвестного вектора признаков к одному из классов принимается по значению полинома, вычисленного для этого вектора признаков.

Проводился предварительный визуальный анализ РЛ-изображений в разных диапазонах радиоволн в

Таблица 3. Оценка точности распознавания грунтов по гранулометрическому составу с использованием критерия  $\chi^2$

Комбинации радиодиапазонов	$\chi^2$
сантиметровый (см)	5.55
дециметровый (дм)	3.59
метровый (м)	4.45
см, дм, м	7.94
дм, м	5.45
см, м	5.94
см, дм	8.15

«окне»  $21 \times 21$  пиксел с использованием пакета трехмерной графики.

В качестве признаков выбраны 10 пикселов, размещенных горизонтально, что дало возможность включить пикселы, размещенные один от другого на некотором расстоянии, а не один пиксел. Это позволило сформировать обучающую выборку из 42 векторов в 10-мерном пространстве признаков.

На этом этапе исследований за итоговую функцию была принята гиперплоскость. В этом случае коэффициенты полинома  $a_0 - a_{10}$  вычислялись по векторам математических ожиданий ковариационных матриц классов. Итоговая функция имеет вид

$$R(\bar{x}) = a_0 + \sum_{i=1}^{10} a_i x_i,$$

где  $R(\bar{x})$  — итоговая функция,  $a_0, a_i$  — коэффициенты полинома,  $x$  — составляющая вектора признаков,  $i = 1 \dots 10$  — составляющая вектора обучающей выборки.

Для определения статистического постоянства оценок моментов выборок использовался метод скользящего контроля. Проводились вычисления верхнего и нижнего порога математических ожиданий, дисперсий и автокорреляционных функций, имеющих вид

$$M_{kl} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{kli}.$$

Здесь  $M$  — математическое ожидание,  $k$  — номер класса,  $i = 1 \dots N$  — номер вектора обучающей выборки,  $l = 1 \dots 10$  — номер признака;

$$\sigma_{kl}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{kli} - M_{kl})^2,$$

$$\tau_{klt} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(x_{kli} - M_{kl})(x_{klti} - M_{klt})}{\sigma_{kl}\sigma_{klt}},$$

где  $\tau$  — автокорреляционная функция,  $\sigma^2$  — дисперсия,  $t = 1 \dots 10$  — номер признака для вычисления автокорреляционной функции.

При работе по этой методике использовались только типы грунта и агрофона, без их детальных характеристик.

Были отобраны участки с однородным грунтом (чернозем типичный среднегумусный), но разным проективным покрытием (озимые, пашня). Результаты представлены на рис. 6. В см-диапазоне хорошо распознаются исследуемые поверхности (вероятность верного распознавания ВВР = 0.95). В дециметровом ВВР хуже и составляет 0.8. В метровом диапазоне влияние агрофона мало (ВВР = 0.5).

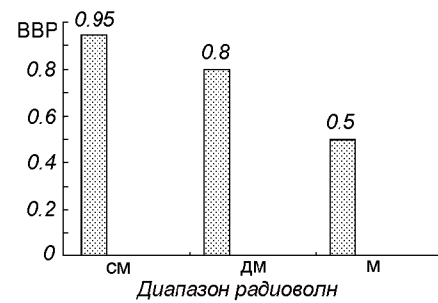


Рис. 6. Определение качества распознавания грунтов с агрофонами (ВВР — вероятность верного распознавания)

## ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Проведенная обработка РЛ-информации проходила в трех направлениях. Во всех трех случаях можно уверенно говорить о взаимосвязи между показателями агрофона и данными РЛ-съемки. При этом влияние растительности на отраженный радиосигнал уменьшается с увеличением длины волны. Об этом свидетельствует снижение корреляции между характеристиками агрофона и РЛ-показателями, а также ухудшение распознавания типов агрофонов (при переходе к более длинноволновому диапазону).

В ходе исследований установлено, что на отраженный сигнал сильнее всего оказывают влияние показатели растительного покрова, характеризующие его влажность. Оптимальным показателем, описывающим вклад растительности в формирование радиосигнала, на наш взгляд, является «объемная влажность агрофона». Отметим, что этот вывод получен для сезона, когда часть культур убрана, а часть находится в ранней стадии развития. Вероятно, что для других сезонов потребуются другие показатели, более полно описывающие радиофизические особенности отражения агрофонами.

Четкое разделение различных типов агрофонов в см-диапазоне при использовании кластерного анализа и методики [7] подтверждает литературные данные о возможности успешного использования материалов высокочастотной РЛ-съемки для наблюдения за состоянием растительного покрова.

При анализе результатов изучения почвенной составляющей комплекса «почва—агрофон» необходимо учитывать многообразие и сложность структуры агроландшафтов, определяющих характеристики рассеянных радиосигналов.

Кроме этого, для РЛ-съемки в см-диапазоне необходимо учитывать влияние шероховатости поверхности почвы, вызванное вспашкой, которое

может сильно «затенять» влияние почвенных характеристик. Влияние шероховатости зависит от ряда факторов: длина рабочей волны, ориентация борозд по отношению к падающему излучению, поляризация сигнала и т. п.

Результаты исследований показывают, что существенная связь между данными РЛ-зондирования и характеристиками почвенного покрова тестового участка имеет место только для плотности почвы на глубине 0—10 и 10—20 см.

Анализ показывает, что связь между данными летней РЛ-съемки и весовой влажностью почвы существует: средняя степень зависимости составляет  $r = 0.45...0.53$ ). Вполне вероятно, что при учете влияния агрофонов на отраженный радиосигнал, корреляция между материалами РЛ-зондирования и влагозапасом почвы значительно усилится.

Использование метода пошаговой регрессии позволило количественно описать взаимосвязь между данными РЛ-съемки и рядом показателей комплекса «почва—агрофон».

Результаты данного метода подтверждают, что формирование РЛ-сигнала при  $\lambda = 3$  см и  $\lambda = 23$  см практически полностью зависит от параметров растительности и верхнего слоя почвы. Для полного описания данных РЛ-зондирования при  $\lambda = 180$  см необходимо ввести дополнительные переменные (возможно, характеризующие более глубокие слои почвы).

Проведенное распознавание полей с почвами различного гранулометрического состава по их радиолокационным образам показало, что зная априорно только лишь содержание физической глины, можно проводить почвенное районирование по этому признаку. Данный вывод необходимо дополнить двумя поправками, исходящими из выбранной методики исследований: во-первых, исследуемые почвы значительно контрастировали между собой по гранулометрическому составу (от супесчаных до среднеглинистых); во-вторых, рассматривались почвы, не занятые сельскохозяйственными культурами.

Таким образом, полученные результаты характерны для определенных условий, при которых можно эффективно проводить дистанционный мониторинг почвенного покрова.

Отметим, что лучшее распознавание почв по гранулометрическому составу наблюдается для комбинации данных см- и дм-диапазонов.

В заключение добавим, что для создания методик дешифрирования состояния системы «агрофон—почва» требуются более полные сезонные многочастотные радиолокационные исследования. Съемка желательна в сухую погоду, чтобы исключить влияние повышенной влажности верхнего слоя исследуемой поверхности.

Авторы благодарят сотрудников ИРЭ НАНУ, ЦРЗЗ НАН и НККАУ, ИПА УААН, а также летно-технический состав РосНИИ ГА за помощь.

1. Гавриленко А. С., Калмыков А. И., Пичугин А. П. Опыт радиолокационных наблюдений земных покровов в 3-х сантиметровом диапазоне радиоволн // Исслед. Земли из космоса.—1987.—№ 1.—С. 85—92.
2. Калмыков А. И., Цымбал В. Н., Блинков А. Н. и др. Многоцелевой радиолокационный комплекс исследования Земли. — Харьков, 1990.—25 с.—(Препринт / АН УССР, ИРЭ; № 90-13).
3. Калмыков А. И., Щербинин И. В., Яцевич С. Е. Комплексные радиофизические исследования сельскохозяйственных угодий // Космич. наука и техника.—1990.—Вып. 5.—С. 32—36.
4. Ким Дж.-О., Мьюллер Ч. У., Клекка У. Р. и др. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: Пер. с англ. — М.: Финансы и статистика, 1989.—215 с.
5. Радиолокационные методы исследования Земли / Под ред. Ю. А. Мельника. — М.: Сов. Радио, 1980.—264 с.
6. Радиолокация поверхности Земли из космоса / Под ред. Л. М. Митника, С. В. Викторова. — Л.: Гидрометеиздат, 1990.—200 с.
7. Volosiuik V. G. Classification of Image Data by Analytic Approximation of Likelihood Relation Technique // EUSAR'96 / European Conf. on Synthetic Aperture Radar, Koenigswinter, 26—28 March, 1996.—P. 97—100.

---

#### INVESTIGATIONS OF LAND RESOURCES FROM MULTIFREQUENCY RADAR SURVEYING DATA

S. Ye. Yatsevich, V. B. Yefimov, A. B. Achasov,  
and A. V. Shatokhin

We discuss remote sensing data from surveying the “vegetation—soil” system with the airborne multifrequency radar facility (MARS) in the X, L, and VHF bands. Various methods for radar data interpretation are presented.