

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ,
ПЛАНЕТ И ДРУГИХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.
ГЕОЭКОЛОГИЯ И КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПОИСКА И СПАСАНИЯ

УДК 528.

**Комплексный аэрокосмический мониторинг
водохозяйственных систем**

Г. Г. Язерян

к. т. н., ОАО «Российские космические системы»

e-mail: gyazeryan@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрен вопрос дистанционного мониторинга рисовых оросительных систем как пример сложной водохозяйственной системы. Информация о ключевых характеристиках рисового агроценоза используется для управления технологическими процессами возделывания риса с целью повышения урожайности и экономии водных ресурсов.

Ключевые слова: мониторинг, рисовые оросительные системы, ДЗЗ, СВЧ-радиометр

**Complex Aerospace Monitoring
of Water Management Systems**

G. G. Yazeryan

candidate of engineering science, Joint Stock Company “Russian Space Systems”

e-mail: gyazeryan@yandex.ru

Abstract. The question of remote monitoring of rice irrigation systems as an example of a complex water management system is studied. Information on the key characteristics of rice agroecosystem is used for controlling the process of rice cultivation to improve rice yields and to save water resources.

Key words: monitoring, rice irrigation systems, Earth remote sensing, microwave radiometer

Введение

Развитие сельскохозяйственного производства требует постоянной и надежной защиты от засух и наводнений и в преобладающей степени определяется умелым применением оросительной мелиорации. Объективный характер дистанционного мониторинга имеет решающее значение для повышения эффективности управления. При этом чем на более ранней стадии производства будет принято правильное решение, тем большее значение оно будет иметь для экономических показателей. Практически все агротехнические мероприятия, направленные на повышение плодородия почв и коррекцию текущего развития важнейших сельскохозяйственных культур, могут быть оптимизированы по результатам предварительного тематического анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). При проведении оперативного мониторинга агроэкосистем, ориентированного на оценку состояния сельскохозяйственных культур и гидротехнических сооружений, важным является выбор оптимальных сроков получения дистанционной и опорной информации. В наибольшей степени это относится к основным товарным культурам: зерновым колосовым, в особенности к рису, озимой пшенице, и подсолнечнику. Оптимальные сроки проведения мониторинга прямо связаны с биологическими особенностями роста и развития растений указанных культур. Данные ДЗЗ и результаты их тематического анализа составляют информационную основу технологии независимого объективного мониторинга ряда параметров сельскохозяйственного производства, непосредственно связанных с радиометрическими свойствами агроценозов. Эта технология наиболее результативна при контроле структуры севооборотов, посевных площадей, агроэкологического состояния, урожайности важнейших сельскохозяйственных культур.

Исходные положения

Водохозяйственная система — это совокупность связанных между собой объектов, предназначенных для обеспечения рационального использования и охраны водных ресурсов. К ним относятся гидротехнические и водопроводные сооружения,

а также сельскохозяйственные угодья, занимающие огромные территории. Сельскохозяйственная деятельность — это сектор экономики, потребляющий основной объем водных ресурсов (на нужды сельского хозяйства используется до 70–90% всей потребляемой воды). Особенно велико водопотребление при возделывании риса (оно на порядок выше, чем при производстве других злаковых культур). При производстве риса вода используется не только для обеспечения требуемой влаги в почве, но и как инструмент управления ее тепловым режимом, к которому весьма чувствительна данная культура. Контроль и управление водно-тепловым режимом рисовых оросительных систем — важная инженерно-техническая задача, эффективное решение которой достигается использованием методов и средств аэрокосмического зондирования.

По итогам многолетних научно-производственных работ по использованию дистанционных радиофизических методов для контроля производственных процессов и состояния сельскохозяйственных и водохозяйственных объектов при участии автора данной работы были разработаны методики и технологии, которые привели, в частности к повышению эффективности производства риса в Краснодарском крае. Речь идет о методиках, основанных на использовании радиометров СВЧ- и ИК-диапазонов: определения влажности почвы, уровня залегания грунтовых вод, микрорельефа поверхности, солености и температуры оросительной воды, биомассы растений. Научным руководителем этих работ был заведующий лабораторией ИРЭ РАН, д. т. н., профессор, лауреат Государственной премии СССР (1985 г.) А. М. Шутко.

Организационно мониторинг сельскохозяйственного производства по данным ДЗЗ представляет собой многоуровневую систему информационного обеспечения, включающую в себя программно-аппаратные комплексы приема, первичной обработки и тематического анализа данных ДЗЗ, информационно-аналитические автоматизированные системы с каналами связи и банками данных и системы сбора и передачи опорной информации.

Рассмотрим данный процесс, в частности, на примере производства риса в Краснодарском крае.

Принципиально важное значение для производства риса имеют содержание влаги в пахотном

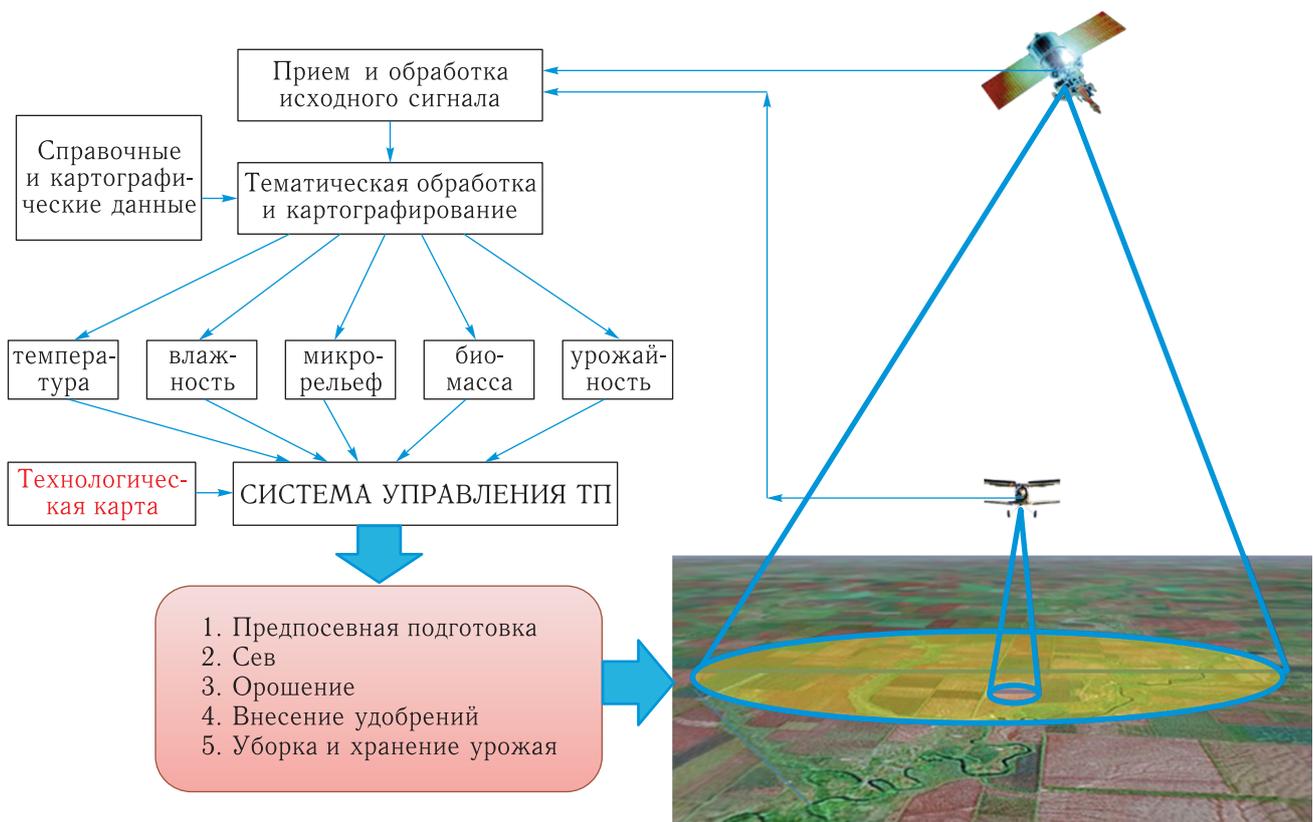


Рис. 1. Структурная схема комплексного аэрокосмического мониторинга

слое почвы и уровень залегания грунтовых вод (УГВ) в период начала полевых работ, в условиях полного отсутствия растительности. Данный показатель не только характеризует одно из главных условий произрастания семян, но и дает возможность рационального использования сельскохозяйственной техники. Многолетние исследования показали принципиальную возможность получения сравнительных оценок влажности поверхностного слоя почвы по данным дистанционных измерений спектральной яркости излучения в видимом и ИК-диапазонах при достаточной однородности почвы по механическому и химическому составу.

Более устойчивая корреляция между излучательными и гидрофизическими характеристиками почвогрунтов наблюдается в СВЧ-диапазоне, что лежит в основе СВЧ-радиолокационного метода (пассивного и активного). Однако из-за сложности технической реализуемости антенных систем с высоким разрешением в данном диапазоне для космических аппаратов используется только аппаратура

авиационного базирования. Исключение составляют РСА — интерферометры, которые в настоящее время не в полной мере приспособлены для решения задач определения гидрологических и физико-химических характеристик сельскохозяйственных полей. Данная проблема представляет большой научно-практический интерес и требует проведения комплексных исследований.

Вопрос дистанционного определения влажности почвы и УГВ при сельскохозяйственном производстве в литературе освещен подробно, в частности в работах А. М. Шутко [1]. Имеется также достаточное количество публикаций по дистанционной оценке биомассы растений, в частности риса [2]. Однако, как утверждают специалисты-рисоводы, важнейшей характеристикой рисовой оросительной системы является микрорельеф (качество планировки поверхности) рисового чека, от которого в первую очередь зависит расход воды и самое главное — урожай риса [3]. И следовательно, по их категоричному мнению, без определения

этого показателя мониторинг РОС не представляется целесообразным. Данное обстоятельство вынудило нас основательно заняться изучением проблемы взаимосвязи радиационных свойств поверхности почвы рисового чека с ее микрорельефом.

Разработка методики определения микрорельефа рисовых чеков

Микрорельеф поверхности рисовых чеков принято характеризовать рядом величин, наиболее часто из которых используются следующие [3]:

- относительная площадь (в процентах) чека с отклонениями «отметок» поверхности от средней в определенных интервалах (например, на 5 см);
- коэффициент годности поля: $\delta = n/N$, где n — количество высотных «отметок», лежащих в пределах ± 5 см, N — общее количество отметок в чеке;
- критерий дефектности планировки, равный отношению суммы абсолютных величин отклонений Δh_i отдельных «точек» чека от средней, превышающих принятый допуск (± 5 см), к общему числу точек:

$$K_D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |\Delta h_i|. \quad (1)$$

Количество точек (или отметок) определяется количеством квадратов размером 20×20 м² в каждом чеке, внутри которых (с помощью нивелира) определяется уровень горизонта поверхности (высотная отметка).

Для характеристики микрорельефа важно знать не только величины отметок (h_i), но и частоту их повторения, т.е. вероятность их распределения. Практически для всех пригодных для рисосеяния чеков плотность распределения вероятности величин h_i при больших значениях ($n \rightarrow \infty$) описывается нормальным законом:

$$p(h_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(h_i - h_{\text{cp}})^2}{2\sigma^2}}, \quad (2)$$

где $(h_i - h_{\text{cp}}) = \Delta h_i$, σ — стандартное отклонение генеральной совокупности ($n \rightarrow \infty$).

Общепринятым способом контроля микрорельефа поверхности рисовых чеков в настоящее время является нивелирная съемка по квадратам размером 20×20 м². Сущность этого метода заключается в том, что на площадь чека как бы накладывается гипотетическая сетка с квадратами 20×20 м², внутри которых (в центре) ставится нивелирная рейка. По положению этой рейки определяется уровень горизонта центральной точки каждого квадрата, который и принимают за высотную отметку всего квадрата (h_i). Затем вычисляется среднее значение этих отметок, что берется за значение среднего горизонта чека (h_{cp}). Разница ($h_i - h_{\text{cp}}$) определяет отклонение уровня горизонта i -го квадрата от средней отметки чека. Затем средняя отметка чека «привязывается» к какому-либо неподвижному объекту вне рисового чека (например, к оголовку водовыпуска) и используется для контроля в процессе планировочных работ.

Этот способ является трудоемким и сложным, и, помимо того, характеризуется невысокой точностью, т.к. данные измерений в одной случайной точке обобщаются для всего квадрата. По ряду причин (включая указанные выше и нехватку персонала) перед севом не представляется возможным выполнение нивелирной съемки для всего рисоводческого хозяйства. А выбор чеков, где выращивание риса не представляется целесообразным и требуется проведение планировочных работ, выполняется исходя из данных о падении урожайности чеков в предшествующие годы (либо по визуальным оценкам).

По итогам многолетних экспериментальных исследований нам удалось разработать методику определения микрорельефа поверхности рисового чека с помощью СВЧ-радиометрического метода [4].

Важной особенностью комплекса экспериментальных работ по исследованию взаимосвязи СВЧ-излучательных характеристик и микрорельефа поверхности рисовых чеков является синхронность измерений всех геофизических и радиометрических характеристик, так как поставленная цель достигается лишь благодаря наблюдению за поведением этих параметров на каждом участке («точке») в процессе динамики высыхания (иссушения) почвы.

Наземные работы включали измерения с помощью передвижной радиометрической установки,

содержащей радиометры с рабочими волнами 2 и 6 см, контактные измерения влажности почвы и нивелирную съемку.

В каждом чеке наземные работы начинались с проведения нивелирной съемки по квадратам $20 \times 20 \text{ м}^2$ для нахождения значения «средней отметки» поверхности чека, по отношению к которой определяют отклонения уровня горизонта элементарных участков (Δh_i). При этом маршруты движения «реечника» (оператора, устанавливающего нивелирную рейку) прокладываются таким образом, чтобы точки нивелирной съемки проходили по середине «лучей» самолетного двухсантиметрового радиометра. Затем в ближайшей окрестности этих точек с помощью наземной передвижной радиометрической установки измеряется интенсивности излучения на двух волнах (2 и 6 см) и берутся пробы почвы на влажность. Одновременно с этим проводилась самолетная СВЧ-радиометрическая съемка (на волнах 2, 18 и 30 см) с максимальной детальностью (высота полета самолета-лаборатории Ан-2 составляло 50–80 м).

Таким образом, были получены для каждого элементарного участка рисового чека одновременно данные об интенсивности излучения ($T_i^{\text{я}}$ или ε) на $\lambda = 2 \text{ см}$, $\lambda = 6 \text{ см}$, $\lambda = 18 \text{ см}$, $\lambda = 30 \text{ см}$, о влажности почвы в слое 0–5 см и 15–20 см и об уровне горизонта (точнее Δh_i).

Сопоставление данных по трем синхронно измеренным параметрам позволило нам сделать такие выводы:

- взаимосвязь между микрорельефом поверхности и влажностью почвы на глубинах более 15–20 см практически отсутствует независимо от даты полива;
- в поверхностном слое почвы (0–5 см) влажность устойчиво коррелирует с уровнем горизонта участка поля (где измеряется влажность). Причем эта связь ослабевает как с увеличением увлажнения в среднем по чеку от значения нормальной влагоемкости, так и с длительным иссушением почвы;
- наблюдается взаимоднозначная связь между интенсивностью СВЧ-излучения на волнах 2 и 6 см и уровнем горизонта участков поля лишь при определенных значениях средней

влажности в скин-слое почвы (для данной λ). Оптимум этой величины близок к значению наименьшей влагоемкости.

Эмпирическая зависимость $\Delta \varepsilon$ от Δh для элементарного участка при оптимальном значении средней влажности по чеку имеет вид:

$$\Delta \varepsilon_i = K_n \ln(1 + \Delta h_i), \quad (3)$$

где K_n — коэффициент зависящей от плотности грунта (почвы) в чеке.

График этой зависимости для значений $K_n = 0,8; 1,0; 1,2$ представлен на рис. 2.

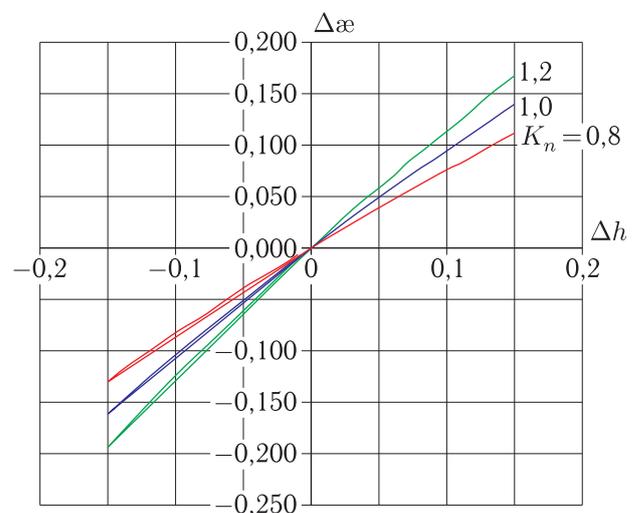


Рис. 2. График зависимости $\Delta \varepsilon$ от Δh при разных K_n

На основе этой зависимости нами были построены карты микрорельефа для чеков на площади около 1000 га по результатам самолетной СВЧ-радиометрической съемки в течение одного дня. Сопоставление этих карт с данными выборочных нивелирных съемок показало их удовлетворительную совместимость. Пример такого сравнения показан на рис. 3.

Опытно-производственные работы, проведенные с участием автора в рисосовхозе «Славянский» Славянского района Краснодарского края в 1985–1991 гг. убедительно доказали экономическую и экологическую целесообразность использования предложенной мониторинговой системы в технологии возделывания риса: повышение урожайности составило до 20%; экономия воды, используемой

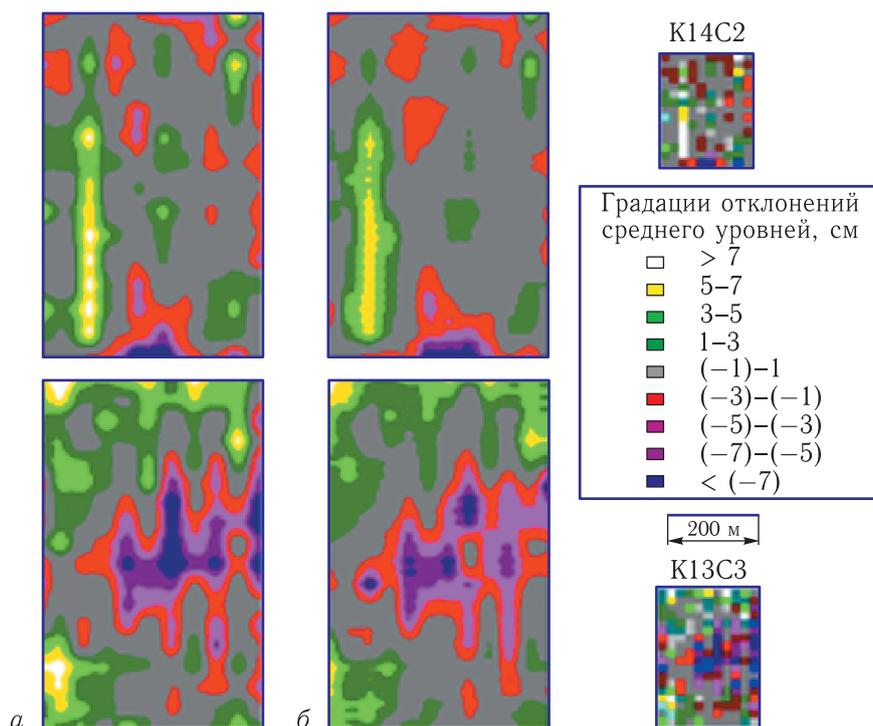


Рис. 3. Сравнение данных самолетной (а) и нивелирной (б) съемок микрорельефа рисовых чеков размером $200 \times 300 \text{ м}^2$ (после компьютерной обработки)

Таблица

Контролируемый параметр	Время измерения	Погрешность измерений	Решение по управлению ТП на РОС	Эффект от использования
УГВ-I УГВ-II	До сева и после уборки урожая	$< 15\%$	Выбор способа затопления, прогноз состояния подземных вод	Предотвращение заболачивания и засоления
Влажность	До сева	$< 10\%$	Определение начала полевых работ, сроков вспашки и сева индивидуального для каждого чека	Повышение урожайности и рациональное использование техники
Микрорельеф	До затопления	$< (\pm 3 \text{ см})$	Оптимизация планировочных работ, исключение дефектных чеков из рисового оборота	Повышение качества РОС, экономия воды, снижение затрат
Вариация температуры ($T^{\text{я}}$) по чекам	До сева	$\pm 1 \text{ К}$	Оценки готовности чеков к севу индивидуально и возможного способа борьбы с сорняками без гербицидов	Оптимизация продолжительности вегетации
Биомасса I	В начале фазы кущения	$< 10\%$	Определение дозы подкорма и режима орошения	Экономия удобрений и сохранение почвенных ресурсов
Биомасса II	В начале трубкования	$< 10\%$	Определение дозы подкормок и предотвращение заболевания растений перикюлярозом	Экономия удобрений и ядохимикатов, охрана окружающей среды
Биомасса III	В фазе молочно-восковой спелости	$< 10\%$	Прогноз урожая по чекам	Минимизация потерь урожая при уборке за счет оптимальной последовательности уборки по чекам

для орошения, — до 15%, ядохимикатов и удобрений — около 10%. Следует отметить, что указанный положительный эффект достигнут отчасти благодаря одновременному применению средств локальной автоматизации процессов водораспределения на РОС [6].

Технологические основы и эффективность использования мониторинговой системы для производства риса представлены в таблице.

В заключение следует отметить, что с учетом современного развития космических средств ДЗЗ, навигации и связи открываются все новые возможности для организации более эффективных систем целевого мониторинга в тесной связи с технологиями производства в каждой сфере. Это в полной мере касается и возможностей спутниковых гиперспектрометров, установленных на отечественных космических аппаратах природоресурсного назначения для агропромышленного сектора экономики [7].

Список литературы

1. Шутко А. М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1985. 215 с.
2. Воробейчик Е. А., Петибская В. С., Чухланцев А. А., Язерян Г. Г. СВЧ-излучательные характеристики рисовых посевов // Радиотехника и электроника, 1988, т. 33, № 11. С. 2420.
3. Алешин Е. П. Программирование высоких урожаев риса на Кубани. Краснодар, 1980. 95 с.
4. Язерян Г. Г., Кибальников С. В. Способ определения микрорельефа увлажненной поверхности. Авторское свидетельство СССР № 1517484, 1989. Открытия, изобретения 1989, № 39.
5. Воробейчик Е. А., Кибальников С. В., Любинский И. А., Шутко А. М., Язерян Г. Г. Использование метода дистанционного СВЧ-радиометрического зондирования для оперативного управления технологическими процессами возделывания риса. Доклады ВАСХНИЛ, 1987, № 3. С. 40–42.
6. Кибальников С. В. Совершенствование управления рисовыми оросительными системами. Докторская диссертация. М.: ВНИИГиМ, 1991.
7. Хайлов М. Н., Заичко В. А. Гиперспектральная съемка — перспективы использования в интересах решения социально-экономических задач. Сборник тезисов докладов Научно-технической конференции «Гиперспектральные приборы и технологии», г. Красногорск, 17–18 января 2013 г.