

## Определение проявлений переувлажнения почв при радиолокационно-радиотепловом авиационном мониторинге

В.К. Иванов, А.Я. Матвеев, В.Н. Цымбал, С.Е. Яцевич

*Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины  
61085, Харьков, Акад. Проскуры, 12  
E-mail: vn\_tymbal@mail.ru*

В статье анализируются теоретические подходы и результаты комплексного мониторинга проявлений переувлажнения почв радиолокатором бокового обзора 8-мм диапазона, аэрофотоаппаратом и сканером ИК-диапазона авиационного комплекса дистанционного зондирования АКДЗ-30, проведенного последовательно в дневное и ночное время в сухой осенний сезон. Показано хорошее взаимное дополнение информации видео, ИК- и СВЧ-диапазонов для идентификации проявлений подтоплений.

**Ключевые слова:** влажность, почва, дистанционное зондирование, ИК- и СВЧ-данные, обработка данных.

### Введение

В настоящее время задача регулярного комплексного мониторинга развития регионального подтопления земель становится одной из важнейших. Решить эту задачу в полном объеме возможно лишь при оптимальном сочетании традиционных контактных методов измерений (площадного бурения скважин и т. п.) и методов дистанционного картографирования проявлений подтоплений с применением аэрокосмических средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (Кронберг, 1988).

Для проведения исследований влажности почвенных покровов используются многочисленные космические РСА радиолокационные (РЛ) системы ДЗЗ (RADARSAT-1, -2, ENVISAT ASAR, ERS-1, -2, ALOS PALSAR, TerraSAR-X1, -X2, Sar-Lupe, COSMO-SkyMed-1...-4, и многие другие), а также космические оптические и ИК-системы низкого (AVHRR ИСЗ NOAA, MODIS EOS/Terra и др.) и среднего разрешения (ASTER и TM/ETM).

Однако сложный многопараметрический характер зависимостей рассеянного радиолокационного сигнала и излученного радиотеплового излучения от состояния поверхности почвы и поверхностной растительности позволяет решать эту задачу только при значительном пространственном усреднении полученных данных и в сочетании космического ДЗЗ с обширными и трудоемкими полевыми измерениями многочисленных параметров грунта и растительности. При этом наилучшим образом решается задача для почвы с минимальной растительностью. Мониторинг проявлений увлажнения почвы за счет подъема уровня грунтовых вод (проявления процессов подтопления) весьма затруднен без сочетания космических и авиационных средств ДЗЗ (Радиолокационные..., 2007; Цымбал и др., 2011). Это вызвано как недостаточным пространственным разрешением космических радиотепловых систем, так и большим периодом между повторными наблюдениями одного и того же района, за время которого с большой вероятностью могут измениться атмосферные условия, облачность, влажность и многое другое.

Известно, что температура открытой земной поверхности зависит от плотности потока суммарной солнечной радиации, поступающей на земную поверхность, альбедо земной поверхности, коэффициента излучения, тепловой инерции, плотности теплового потока из земных недр, влажности почвы, геометрии поверхности и структуры грунта, метеорологических условий, концентрации в атмосфере оптически активных газов и времени. Большое количество факторов, влияющих на измеряемую температуру земной поверхности, не позволяет путем визуального анализа ее пространственного распределения однозначно выяв-

лять участки с вызванными повышенной влажностью аномальными значениями температуры поверхности (Горный и др., 1993).

Энергетический баланс открытой (не покрытой растительностью) поверхности Земли в литературе рассмотрен достаточно полно, например, в работах (Чудновский, 1976; Кондратьев и др., 1978) и литературе, приведенной там.

Для почвы, покрытой растительностью, определение влажности собственно почвы становится трудной проблемой. Для этого случая определение отношения между поверхностной влажностью и электромагнитным излучением является недоопределённой проблемой со многими неизвестными, существенно затрудняющими однозначную интерпретацию полученных данных. Воздействие комплекса влияющих факторов, включая падающее коротко- и длинноволновое излучение, температуру воздуха, влажность, ветер на соответствующей высоте, объединяется различными моделями, например, упрощенной моделью простой биосферы SSiB (Xue et al., 1991, 1998). Около 20 параметров растительности и почвы необходимы в этой модели для определения состояния почвы. В модели учитываются три слоя почвы, один слой растительного покрова и восемь прогностических переменных, включая влажность для трех слоев почвы (0,02; 0,48 и 1,1 м), водное содержание, сохраненное растительным покровом, снегом на земле, и температура покрова. Используются две температуры почвы: температура поверхности почвы и температура на глубине почвы, которая получается методом восстановления. Модель учитывает устьичное сопротивление растительности ( $r_c$ ), сопротивление почвы ( $r_{soil}$ ), и сопротивление граничного слоя растительного покрова ( $r_b$ ), и два аэродинамических сопротивления, управляющих обменом импульсами, тепла, и влаги между атмосферой и поверхностью земли.

На практике для оценки возможного влияния слоя поверхностной растительности на степень достоверности определения эффективной радиационной температуры подстилающей поверхности используется выражение  $T_{s,eff} = BT_f + (1 - B)T_g$ , где  $T_g = T_f$  — температура почвы, равная температуре растительности;  $B$  — проективное покрытие). Проективное покрытие растительностью  $B = (NDVI - NDVI_g)/(NDVI_v - NDVI_g)$ , где  $NDVI_v$  и  $NDVI_g$  — вегетационные индексы для растительности и голой почвы, определенные как максимальное и минимальное значения  $NDVI$ .

Для решения задач радиолокационного исследования влажности почв в микроволновом диапазоне практическое применение находят три типа теоретических моделей — Кирхгофа, физической и геометрической оптики и метода малых возмущений (Басс, Фукс, 1972; Ulaby et al., 1986). Эти модели в общем виде представляют собой произведение функции, описывающей диэлектрические свойства среды, зависящей от влажности, солености, поляризации и угла облучения, на функцию, учитывающую влияние шероховатости поверхности или спектра поверхностных неровностей.

Для определения интенсивности рассеяния РЛ-сигналов почвами, покрытыми растительностью, наиболее распространенной является модель покровного облака (Attema, Ulaby, 1978; Ноекман et al., 1982). В рамках данной модели сигнал, отраженный от почвы, испытывает двукратное ослабление из-за прохождения сквозь слой растительности. Кроме того, слой растительности вносит свою компоненту в рассеянный сигнал из-за объемного рассеяния в нем:  $\sigma_{покр}^0(\theta) = \sigma_{раст}^0(\theta) + \sigma_{поч}^0(\theta)/L^2(\theta)$ , где  $\sigma_{покр}^0$  — суммарная удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) покрова;  $\sigma_{раст}^0(\theta)$  — УЭПР растительности;  $\sigma_{поч}^0(\theta)$  — УЭПР границы растительность – почва;  $L(\theta)$  — коэффициент ослабления поля в слое растительности;  $\theta$  — угол падения. На частотах свыше 8 ГГц при  $\theta \geq 30^\circ$  удельный вклад растительности оказывается преобладающим, а на более низких частотах и при  $\theta = 10...30^\circ$  более заметным оказывается вклад рассеяния почвой (Kulemin et al., 1989), интенсивность которого связана с объемным влагосодержанием почвы эмпирической моделью Халликайнена (Hallikainen et al., 1985).

## Мониторинг подтоплений территорий с борта самолета-лаборатории

В работах (Радиолокационные..., 2007; Цымбал и др., 2005, 2011) приведены результаты многосезонных экспериментов по обработке комплексного радиолокационно-радиотеплового мониторинга проявлений подтопления земель авиационным комплексом дистанционного зондирования АКДЗ-30 (Радиолокационные..., 2007). Для проведения экспериментов был выбран тестовый полигон в зоне Нежинского района Черниговской области (Украина), в районе поселка Хорошее Озеро. Район проведения экспериментов характеризуется наличием железной дороги и автомобильных дорог разной категории, сельхозугодий, лесных массивов, болот, рек и разветвленной мелиоративной системы. Регион характеризуется значительной заболоченностью. Уровень грунтовых вод находится достаточно близко к поверхности. Существующая система мелиоративного водоотвода, позволявшая раньше понизить уровень подповерхностных вод, и, соответственно, существенно уменьшить площадь переувлажненных вследствие этого земель и площадей, занятых болотами, в значительной степени запущена. Значительная часть дренажных каналов загромождена, заросла камышом, и не выполняет задач возлагаемых на мелиоративную систему (Рожок и др., 2005).

Целью проведения натурных экспериментов была отработка метода авиационного мониторинга проявлений поверхностной и подповерхностной влажности и, в особенности, проявлений подповерхностного переувлажнения грунта, вызванного подъемом уровня грунтовых вод. Натурные эксперименты проводились в условиях разных сезонов — зимой, летом и осенью при помощи радиолокатора бокового обзора 8-мм диапазона (РБО), сканера теплового ИК-диапазона «Малахит-1» и аэрофотоаппарата АФА-41/7,5.

Наиболее информативными оказались результаты осенней съемки (Цымбал, 2011). Визуальный анализ тепловых ИК (последовательных, дневных и ночных), радиолокационных и оптических изображений тестового полигона позволил выделить (кроме определяемых на оптическом изображении зон растительности, характерной для заболоченных участков почвы) проявляющие эффект тепловой инверсии зоны в различной степени подповерхностно влажной и переувлажненной почвы как на сельхоз полях, так и в непосредственной близости от железной дороги. Эти зоны отчетливо наблюдаются в виде потемнений на ночных ИК-изображениях, (например на полях № 2 и 3, рис. 1б). Выпадения осадков в районе исследований за время авиационной съемки и в течение предшествующих двух недель не наблюдалось.

На рис. 1 приведены изображения тестового полигона в районе пос. Хорошее Озеро, полученные с борта авиационного комплекса дистанционного зондирования АКДЗ-30 в дневное и ночное время в начале октября 2004 г. (а — ИК дневное; б — ИК ночное; в — РБО).

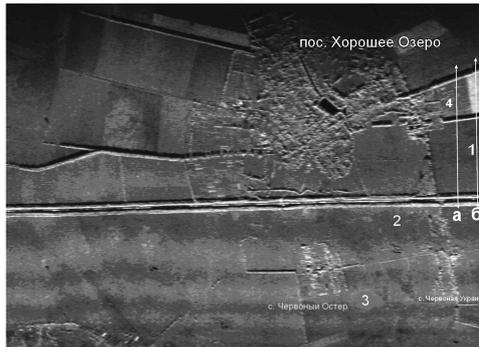
Цифрами отмечены номера исследуемых полей. Стрелками показаны исследованные разрезы (столбцы), проходящие через одни и те же участки полей на различных изображениях: столбец «а» проходящий (с юга на север, снизу вверх) последовательно через лесопосадки у железной дороги, поле со стерней от убранной пшеницы, лесопосадку, огороды с различными культурами; столбец «б», проходящий через лесопосадки у железной дороги, поле со стерней, лесопосадку, поле ростков озимой пшеницы; столбец «в» проходящий через открытый водоем и заболоченный участок, заброшенное поле с признаками подтопления (отмечены флажками) и лесопосадки у железной дороги; столбец «г», проходящий через убранное поле со следами транспортировки (волочения) соломы, частично поросшее бурьяном. На рис. 1з представлено увеличенное ИК дневное изображение поля № 3 со следами волочения соломы, горизонтальной стрелкой отмечены стог соломы, а вертикальными стрелками зоны затенения прямого солнечного облучения за лесополосами. На рис. 1д — оптическое изображение поля № 3, полученное аэрофотосъемкой (зимой). И на рис. 1е показано строчное изображение столбца «д» на поле № 3 (рис. 1з), проходящего через стог соломы и зону тени. Строчные изображения этих столбцов представлены на рис. 2.



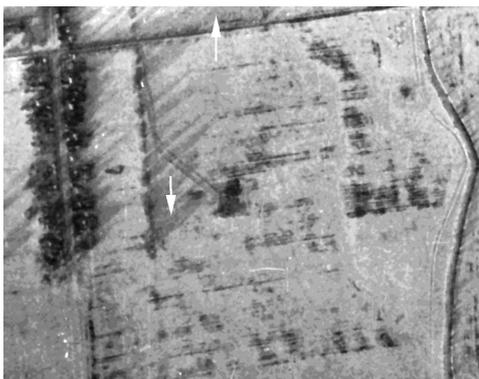
а)



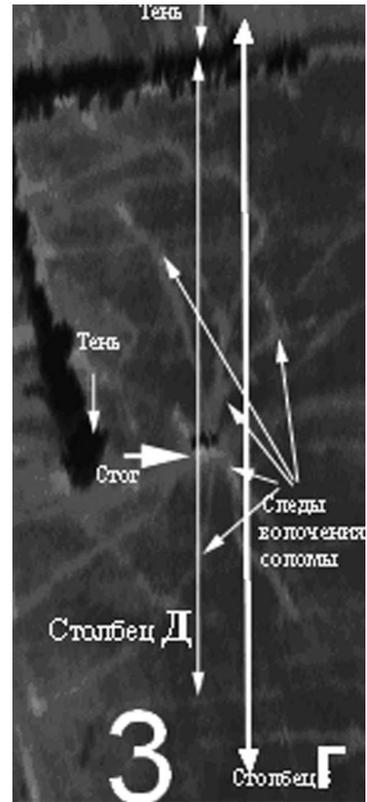
б)



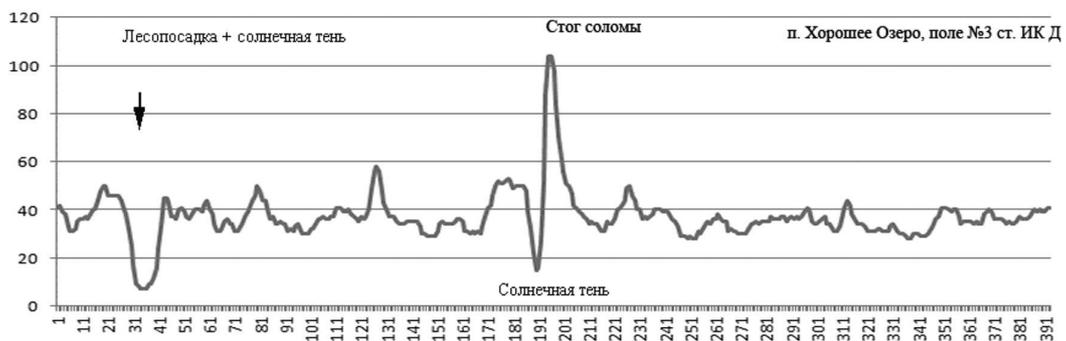
в)



д)



е)



е)

Рис. 1. Изображения тестового полигона, полученные в дневное и ночное время в осенний период 2004 г.: а — ИК дневное; б — ИК ночное; в — РБО; г — увеличенное ИК дневное изображение поля № 3 со следами волоочения солом (горизонтальной стрелкой отмечено изображение стога солом, а вертикальными стрелками зоны затенения прямого солнечного облучения за лесополосами); д — оптическое изображение поля № 3, полученное аэрофотосъемкой (зимой); е — строчное изображение столбца на поле № 3 (г), проходящего через стог солом и зону тени

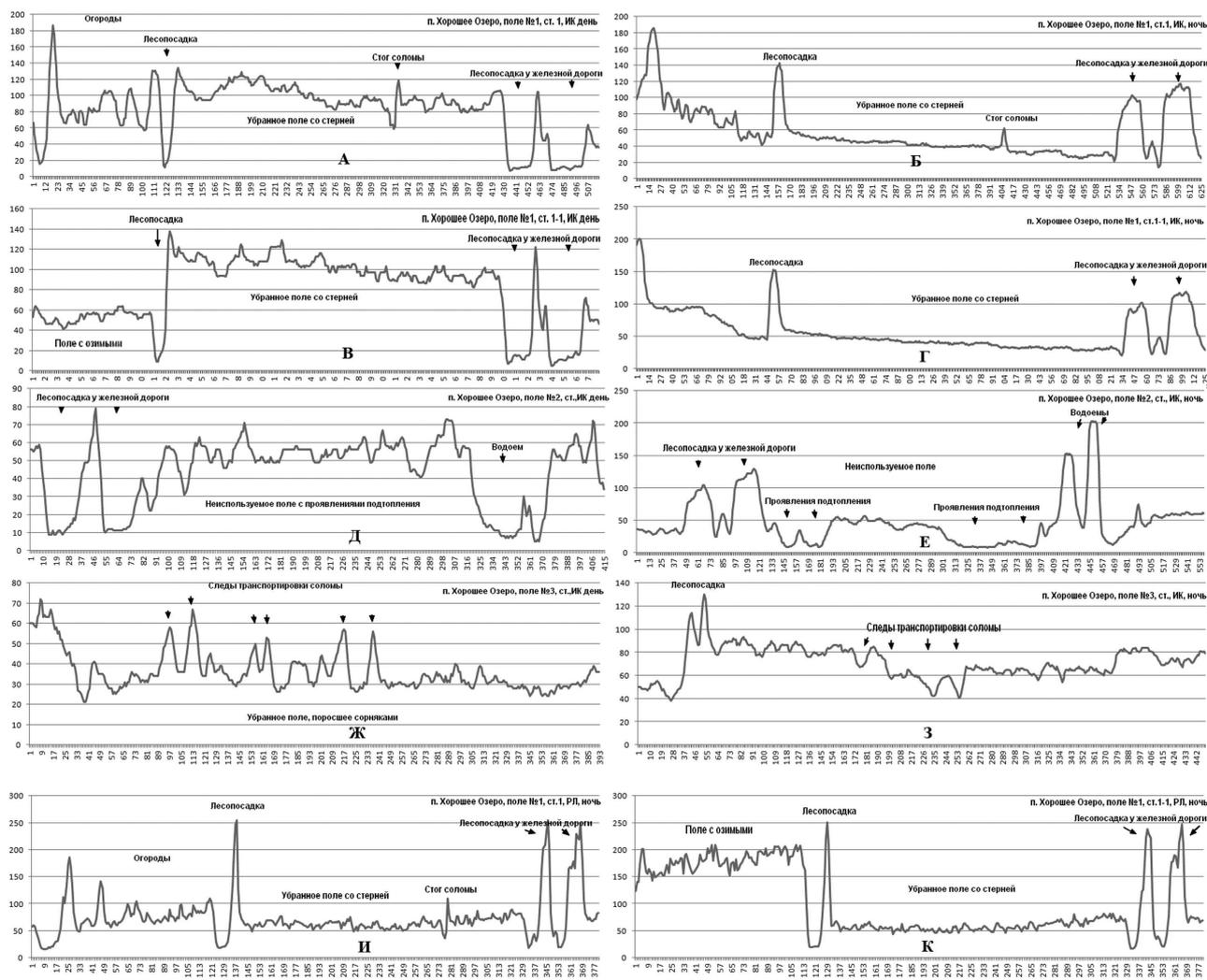


Рис. 2. Строчные изображения столбцов ИК- и РБО-изображений, отмеченных на рис. 1: столбца «а» (ИК дневное — а; ночное — б) проходящего снизу вверх через лесопосадки у железной дороги, поле со стерней от убранный пшеницы, лесопосадку, огороды с различными культурами; столбца «б» (ИК дневное — в; ночное — г) проходящего через лесопосадки у железной дороги, поле со стерней, лесопосадку, поле всходов озимой пшеницы; столбца «в» (ИК дневное — д; ночное — е) проходящего через открытый водоем заболоченный участок, заброшенное поле с признаками подтопления и лесопосадки у железной дороги; столбца «г» (ИК дневное — ж; ночное — з) проходящего через убранный поле со следами транспортировки (волочения) соломы, частично поросшее бурьяном; столбцов «а» (РБО — и) и «б» (РБО — к)

Сопоставление ИК- (ночь, день) и РБО-изображений, а также столбцов этих изображений, проходящих через одни и те же участки полей, позволяет прийти к заключению:

- дневные радиотепловые ИК-изображения (рис. 1а) в значительной степени формируются под воздействием рассеянного земной поверхностью солнечного излучения и обусловлены различиями в альбедо полей и объектов. Например, регистрируемое тепловое ИК-излучение от поля № 1, покрытого стерней злаковой культуры светло-желтого цвета (рис. 2а), значительно превышает среднее излучение поля № 3, которое после уборки злаковой культуры поросло сорняками и имеет зеленый оттенок (рис. 2ж), на нем отчетливо просматриваются следы волочения соломы, которые имеют желтый цвет и значительно большую интенсивность ИК-излучения. Об уровне рассеиваемого солнечного излучения можно судить сопоставив уровень ИК-излучения от поля № 3 и от зоны солнечной тени, расположенной за лесопосадками на его границах (рис. 1з–е);

- ночные ИК-изображения (рис. 1б) демонстрируют значительное остаточное влияние дневного воздействия солнечного излучения на их тепловое состояние — например, среднее тепловое излучение поля № 1 (рис. 2б, з) (которое в дневное время наиболее интенсивно рассеивала солнечное излучение) значительно ниже, чем у поля № 3 (рис. 2з), на котором также хорошо выделяются следы волочения соломы (как более холодные);
- сухой осенний сезон является благоприятным периодом для проведения радиолокационно – радиотеплового мониторинга проявлений подтопления территорий, так как они отчетливо (рис. 1б, 2е) проявляются на ночных ИК-изображениях (отмечены флажками, в основном на не используемых полях, например на поле № 2). При этом РБО-изображение (рис. 1в) свидетельствует, что вегетация полевой сорняковой растительности, покрывающей не используемые поля, например поле № 2, практически прекратилась. РБО здесь ее практически «не видит».

А вариации растительности, где вегетация еще не прекратилась (на огородах с различными поздними культурами полей № 4 и 5 с порослью озимой пшеницы) наблюдаются РБО достаточно хорошо (рис. 2и, к). Судя по ночному ИК-изображению огородов на поле № 4 и с противоположной стороны пос. Хорошее Озеро растительность, вегетация которой продолжается, могла бы существенным образом замаскировать проявления подтоплений.

Проведение натуральных авиационных экспериментов сопровождалось наземными контактными измерениями влажности грунта (подтвердившими наличие подтоплений в дистанционно обнаруженных участках (Рожок и др., 2005)), при этом получались также метеоданные по температуре почвы, воды и воздуха в ночных и дневных условиях. Учитывая, что наиболее стабильное опорное значение у температуры воды в водоемах (+9 °С днем и +8 °С ночью), а температура поверхности грунта изменялась от +13 °С днем до +3 °С ночью, и полагая, что грунт поля № 1 (имеющий наибольшее альбедо) в наименьшей степени накопил тепла днем за счет солнечного излучения и поэтому температура его поверхности ночью наиболее близка к измеренной на метеостанции, были проведены оценки температурных контрастов (относительно средних по соответствующему полю на ночных ИК-изображениях) зон проявления подтопления (3,5...4 °С) и зон отличающихся альбедо, например, следов волочения соломы (2...3 °С).

Сопоставление этих результатов позволяет заключить, что отрицательные температурные контрасты сами по себе не могут служить надежным признаком определений проявлений подтоплений по интенсивности ночного ИК излучения, т.к. они могут быть вызваны различными факторами. Надежное определение возможно лишь на основании системы признаков, учитывающих влияние накопления тепла в грунте за счет солнечного излучения, вариаций теплового потока в глубину грунта (вызванных изменениями подповерхностной влажности) и слоя растительности над грунтом. Необходимо рассмотрение так называемого многомерного «пространства признаков».

На рис. 3 в качестве примера представлено изображение трехмерного «пространства признаков» иллюстрирующее распределение признаков проявлений подтопления по результатам дневной и ночной тепловой ИК- и РБО-съемки. По осям изображения отложены интенсивность измеренных в машинных уровнях оцифровки отсчетов значений столбцов (см. рис. 2) дневного ИК ( $I_{ИК Д}$ , маш. ед.), ночного ИК ( $I_{ИК Н}$ , маш. ед.) и РБО изображений ( $I_{РБО}$ , маш. ед.). Белой окружностью отмечены признаки, соответствующие зонам проявления подтопления. Видно, что для условий проведения натурального эксперимента (сухая осень) признаки зон подтопления достаточно надежно могут быть выделены в трехмерном «пространстве признаков», построенном по результатам последовательной дневной – ночной радиолокационно-радиотепловой съемки.

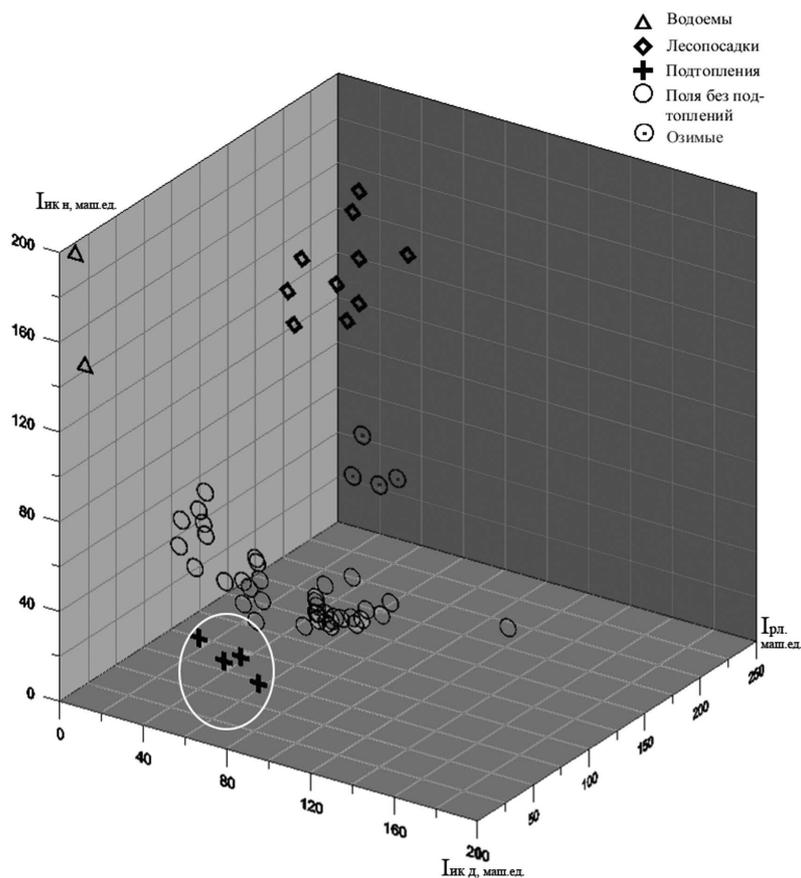


Рис. 3. Трехмерное изображение «пространства признаков» проявлений подтоплений по результатам дневной и ночной ИК- и РБО-съемки. По осям изображения: интенсивность измеренного в машинных уровнях оцифровки значений дневного ИК-изображения (ИИК Д, маш. ед.), ночного ИК-изображения (ИИК Н, маш. ед.) и РБО-изображения (IРЛ, маш. ед.). Белым кругом отмечены значения соответствующие зонам проявлений подтопления

## Выводы

Анализ результатов натурных экспериментов по обработке метода авиационного радиолокационно-радиотеплового мониторинга проявлений подповерхностного переувлажнения грунта, вызванного подъемом уровня грунтовых вод, показал, что в условиях сухой осени совместное использование данных последовательного дневного и ночного зондирования позволяет в трехмерном пространстве признаков (ИК день, ИК ночь и РЛ) достаточно надежно выделить область проявлений переувлажнения грунта, как без растительности, так и покрытого растительностью. Для условий развитой вегетации растительности, по-видимому, понадобится анализировать пространства признаков большей размерности, с использованием данных многозональной оптики, СВЧ-радиометрии и т. п.

## Литература

1. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
2. Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И. Тепловая аэрокосмическая съемка. М.: Недра, 1993. 128 с.
3. Кондратьев К.Я., Пивоварова З.И., Федорова М.П. Радиационный режим наклонных поверхностей. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 215 с.

4. *Кронберг П.* Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии: Пер. с нем. М.: Мир, 1988. 343 с.
5. Радиолокационные методы и средства оперативного дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических носителей / Под ред. С.Н. Конюхова, В.И. Драновского, В.Н. Цымбала. Киев: Джулиа принт, 2007. 439 с.
6. *Рожок Г.П., Гунченко В.О., Цымбал В.Н.* Определение зон подтопления территорий с использованием влагоуровнемера радиоволнового диапазона // Материалы 3-й НПК «Подтопление-2005»: Неотложные проблемы предупреждения и борьбы с региональным подтоплением земель. 2005. Лазурное, Херсонская обл. НПЦ «Экология, наука, техника». 2005. С. 26–27 (на укр. яз.).
7. *Цымбал В.Н., Бычков Д.М., Гавриленко А.С.* и др. Оперативный мониторинг подтоплений авиационным комплексом дистанционного зондирования АКДЗ-30 // Материалы 3-й НПК «Подтопление-2005»: Неотложные проблемы предупреждения и борьбы с региональным подтоплением земель. 2005. Лазурное, Херсонская обл. НПЦ «Экология, наука, Техника». 2005. С. 28–30 (на укр. яз.).
8. *Цымбал В.Н., Яцевич С.Е., Бычков Д.М.* и др. (2011а) Комплексный мониторинг проявления подтопления земель авиационным комплексом дистанционного зондирования АКДЗ-30 // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т. 16. № 1. С. 15–26.
9. *Цымбал В.Н., Яцевич С.Е., Матвеев А.Я.* и др. (2011б) Мониторинг подтопления земель авиационным комплексом дистанционного зондирования АКДЗ-30 // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2011. Вып. 8. Т. 3. С. 199–208.
10. *Чудновский А.Ф.* Теплофизика почв. М.: Наука, 1976. 352 с.
11. *Attema E.P.W., Ulaby F.T.* Vegetation modeled as a water cloud // Radio Science. 1978. N. 13(2). P. 357–364.
12. *Hallikainen M.T., Ulaby F.T., Dobson M.S., El-Raies, Lin-Kun Wu.* Microwave dielectric behavior of Wet soil // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 1985. V. 23. N. 1. P. 25–34.
13. *Hoekman D.H., Krul L., Attema E.P.W.* A multilayer model for radar backscattering from vegetation canopies // Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. Munich, 1–4 June 1982. V. 2. P. 4.1–4.7.
14. *Kulemin G. R., Shcherbinin I. V., Yatsevich S. E.* et. al. Physical Principles of Microwave Remote Sensing of Terrains // Proc. 6<sup>th</sup> Physics Intern. School “Microwave physics and technique”. Varna. World Scientific Publ. Co. Singapore: Utopia Press, 1989. P. 16–33.
15. *Ulaby F.T., Moor R.K., Fung A.K.* Microwave Remote Sensing: Active and Passive. V. 3. Norwood, Massachusetts: Artech House. 1986. 2162 p.
16. *Xue Y., Sellers P. J., Kinter J. L. III, & Shukla J.* A simplified biosphere model for global climate studies // J. Climate. 1991. V. 4. P. 345–364.
17. *Xue Y., Zeng F. J., Schlosser C. A., Allen. S.* A simplified Simple Biosphere Model (SSiB) and its application to land–atmosphere interactions // Chinese J. Atmospheric Sciences. 1998. V. 22. P. 468–480.

## **Airborne radar – thermal infrared diagnosing of waterlogged soils**

**V.K. Ivanov, A.Ya. Matveev, V.N. Tsymbal, S.Ye. Yatsevich**

*Institute of Radophysics and Electronics of NAS of Ukraine, Kharkov*

*E-mail: vn\_tsymbal@mail.ru*

In the paper are analyzed theoretical approaches and results of airborne remote sensing complex ACRS-30 side-looking Ka-band radar, an aerial camera and thermal IR scanner joint of waterlogged soils monitoring, realized sequentially during day and night time of dry autumn season. A good mutual supplement video, thermal infrared and microwave data to the underfloodings manifestations identification.

**Keywords:** moisture, soil, remote sensing, IR and microwave data, data processing.