Идентификация опасных явлений на осушенных почвах по данным активно-пассивного дистанционного зондирования

Д.М. Бычков, В.К. Иванов, В.Н. Цымбал, С.Е. Яцевич

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАНУ Харьков 61085, Украина E-mail: sev59@mail.ru

В статье представлены первые результаты отработки методики автоматической идентификации опасных подповерхностных явлений на осушенных болотах (переувлажнения почв, саморазогревания и возгорания органических материалов - торфа, сена, соломы и т.п.). Методика построена на использовании данных дистанционного зондирования Земли. Обрабатывалась информация авиационного комплекса дистанционного зондирования Земли (АКДЗ-30) установленного на борту самолета-лаборатории АН-30. В состав комплекса входит сканирующий радиометр термального инфракрасного диапазона (ТИК, $\Delta\lambda$ =8-14 мкм) и классический радиолокатор бокового обзора (РБО, λ =8 мм). Данные получены при последовательной, в течение одних суток, дневной и ночной съемке одного и того же тестового полигона в Черниговской области (Украина). Для отработки методики использовалась процедура кластеризации дистанционных данных радиолокационно-радиотепловой съемки в трехмерном пространстве информационных признаков. В качестве координат пространства информационных признаков были выбраны, соответственно, интенсивности принятых сигналов – СВЧ радиолокационного сигнала, дневного и ночного ТИК излучения. Выделены 6 кластеров, которые надежно разделяются в трехмерном пространстве информационных признаков и уверенно соотносятся (для выбранного участка) с результатами экспертных оценок исходных данных. Полученные в режиме автоматического разделения результаты подтверждают перспективность использования данной методики для целей дистанционного зондирования больших территорий.

Ключевые слова: многомерная кластеризация данных, влажность, почва, низкотемпературное окисление и самонагревание торфа, дистанционное зондирование, ИК и СВЧ данные.

Введение

В Украине практически повсеместно наблюдается активизация катастрофических процессов подтопления территорий, т.е. подъёма уровня грунтовых вод, обусловленного хозяйственно-техногенной человеческой деятельностью. Значительная часть территории Украины покрыта заболоченными почвами. Площадь собственно болот и торфоболотных земель в настоящее время оценивается примерно в 1 млн. га. При этом довольно значительная часть болот осушена, и используется в сельском и лесном хозяйстве. Примерно каждый шестой гектар осушенных земель находится в неблагоприятном мелиоративном состоянии и около 70 тыс. га земель переосушены, т.к. система мелиоративного водоотвода, в значительной степени запущена. Развиваются процессы как переувлажнения ранее осушенных заболоченных почв, так и возникновения самовозгорания торфяников (Болотные массивы Украины, [сайт]).

Мониторинг динамики проявлений таких опасных процессов как переувлажнение ранее осушенных заболоченных почв за счет подъема уровня грунтовых вод (проявления процессов подтопления), а также самовозгорание торфяников весьма затруднен без сочетания космических и авиационных средств ДЗЗ. В (Цымбал и др., 2011; Иванов и др., 2012; Бычков и др., 2013) представлены положительные результаты экспериментов по обнаруже-

нию проявлений переувлажнения почвы и предвестников самовозгораний на осушенных почвах методом суточной (т.е. дневной и ночной на протяжении одних суток в наиболее благоприятных для сьемки условиях сухого осеннего сезона) и сезонной (осень-зима) авиационной радиолокационно-радиотепловой съемки. Эти результаты позволяют реализовать оперативный аэрокосмический мониторинг таких опасных процессов, однако, для эффективного практического мониторинга обширных территорий необходимо отработать методы современной программной идентификации их проявлений по данным аэрокосмической съемки ДЗЗ.

Практический мониторинг подтоплений территорий в видео, ИК и СВЧ диапазонах

Для отработки методик совместного использования данных суточной (осень) и сезонной (осень-зима) авиационной видео, ИК и радиолокационной съемки по обнаружению таких опасных явлений, как проявления переувлажнения почвы, а также предвестников самовозгораний на ранее осушенных почвах, использовался авиационный комплекс дистанционного зондирования АКДЗ-30. В состав АКДЗ-30 (под ред. Конюхова, 2007; Цымбал и др., 2005) входит РБО 8-мм диапазона, сканирующий радиометр термального ИКдиапазона, аэрофотокамера и система бортовой обработки, интерпретации и отображения информации, а также навигационный приемник системы GPS.

Информация РБО и ИК сканера обрабатывается непосредственно на борту самолета в реальном времени. На борту проводится накопление, визуализация полученных изображений, производится перезапись данных на дополнительный компьютер для оперативной бортовой интерпретации, что особенно необходимо при мониторинге быстропротекающих катастрофических процессов.

Для проведения натурных экспериментов по отработке методик мониторинга проявления подповерхностного переувлажнения почв был выбран тестовый полигон в зоне Нежинского района Черниговской области (Украина). Район проведения натурного эксперимента 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 ранее понизить уровень подповерхностных вод, и, соответственно, существенно уменьшить площадь переувлажненных вследствие этого земель и площадей, занятых болотами, в значительной степени запущена. Дренажные каналы загромождены, заросли камышом, и не выполняет задач мелиорации (Рожок и др., 2005).

Многомерная кластеризация данных комбинированной суточной радиолокационно – радиотепловой (термальной ИК (ТИК)) авиационной съемки авиационным комплексом АКДЗ-30

Для осуществления процедуры кластеризации данных радиолокационнорадиотепловой съемки было осуществлено построение трехмерного пространства признаков с координатами – интенсивность принятого сигнала ночного ТИК излучения, дневного ТИК излучения и интенсивность принятого рассеянного подстилающей поверхностью СВЧ радиолокационного сигнала.

Исходные файлы ТИК и РБО изображений, полученные в ходе проведения летных экспериментов, были записаны в виде последовательности строк, где каждая точка строки представляет собой интенсивность принятого сигнала на определенной дальности от траектории самолета-лаборатории (*puc. 1*).



Рис. 1. Исходные (до совмещения) изображения тестового полигона (выделен участок в котором проводилась многомерная кластеризация данных): а - ТИК ночное (ТИКН),
б - ТИК дневное (ТИКД) и в - РБО изображения, с использованием которых производилась отработка метода выявления переувлажнения ранее осушенных заболоченных почв,
а также предшествующих самовозгоранию процессов низкотемпературного окисления и самонагревания органических веществ под поверхностью, путем многомерной кластеризации данных комбинированной суточной радиолокационно – радиотепловой (термальной ИК (ТИК)) авиационной съемки авиационным комплексом АКДЗ-30

Ночное и дневное ТИК изображения получались методом механического сканирования (с постоянной угловой скоростью) симметрично поперек оси самолета, а РБО изображения – возвратно-наклонным радиолокационным зондированием влево от оси самолета.

Для корректного сопоставления однотипных информационных признаков было проведено совмещение динамических диапазонов интенсивностей (Иванов и др., 2012) дневных (I_{max дн.}~ T=293K^o ÷ I_{min дн.}~ T=282K^o) и ночных (I_{max н.}~ T=286K^o ÷ I_{min н.}~ T=271K^o) ТИК изображений таким образом, чтобы вес одинаковых измеряемых температурных контрастов был для этих изображений одинаковым. После этого была осуществлено нормирование всех трех переменных к единому диапазону значений путем выражения через

отношение Z=(I-Ī)/(I_{max}-I_{min}), где I_{max} и I_{min} - максимальное и минимальное значение интенсивности сигнала на каждом изображении (по всему полю изображения).

При этом изменения скорости полета самолета, его крена, тангажа и рыскания различались во время дневной и ночной съемки. Нестабильности параметров полета различным образом сказывались на пространственных искажениях ТИК и РБО изображений (*puc. 1a-в*). Это вызвало необходимость проведения процедуры совмещения этих изображений, которая была выполнена с помощью геоинформационной системы «ENVI». Каждое из полученных изображений были привязано к одной и той же топографической карте масштаба 1 : 100000 (точность нанесения объектов на которых порядка 10-20 м) с использованием системы устойчивых реперных точек (пересечения дорог и каналов, углы лесных массивов и полей, точки поворота речного русла и т.п.).

С учетом того, что пространственное разрешение ИК сканера (Малахит-1) в режиме съемки составляло 3-5 м, пространственное разрешение радиолокатора бокового обзора (РБО-0.8) в режиме съемки составляло 10-15 м, а при совмещении изображений с различным пространственным разрешением определяющим является худшее разрешение, использование для совмещения топоосновы карты такого масштаба (особенно для мониторинга объектов с нечеткими, плохо выраженными границами, например, болот) представляется обоснованным и не вносящим существенных погрешностей.

Для построения пространства признаков были использованы совмещенные данные наиболее информативного участка осушенного болота, на котором присутствуют признаки как существенного подповерхностного переувлажнения почвы, так и процессов саморазогревания торфяников (Бычков и др., 2013), обозначенного на исходных изображениях (*puc. 1*) прямоугольниками белого цвета.



Рис. 2. Совмещенные изображения исследуемого участка (а - дневное ТИКД; б - ночное ТИКН: в - РБО)

На совмещенных ТИК (день, ночь) и РБО изображениях была проведена процедура выделения и формирования исследуемого фрагмента с помощью системы математического моделирования MathCAD. Для этого в импортированных в программу изображениях задавалось значение начального положения формируемого фрагмента по осям X и Y и значение размера фрагмента по осям. Выделенные в результате обработки фрагменты представлены на *рис. 2*. В результате были получены совмещенные изображения: дневной ТИК (ТИКД), ночной ТИК (ТИКН) и радиолокационной (РБО) съемки экспериментально-го полета. Размеры изображений всех файлов одинаковы (1835х2652 байт).

Для согласования пространственного разрешения ТИК и радиолокационного изображений, совмещенные фрагменты, были подвергнуты процедуре пространственной фильтрации (фильтром с окном 10x10 пикселей).

Данные промежуточных изображений (с измененным пространственным разрешением) были переформированы в текстовый файл данных, в котором каждый отсчет представлял собой точку в трехмерном пространстве с координатами – интенсивность ночного ТИКН сигнала/интенсивность дневного ТИКД сигнала/интенсивность РБО сигнала.

Для выполнения самой процедуры кластерного анализа текстовые данные были импортированы в программный пакет «STATISTICA», где была выбрана функция «К-Means Clustering» с автоматическим поиском центров 6-ти кластеров в трехмерном пространстве признаков.

Результат был сохранен в виде файла внутреннего формата пакета «STATISTICA» (Spreadsheet30.por), который был переименован в текстовый, считан в бинарном виде, при этом выделены и сформированы в массив значения номеров определенных кластеров с привязкой к координатам исходных точек совмещенных изображений.

Массив значений определенных кластеров был преобразован в массив чернобелого изображения с градациями серого (*puc. 3*).



Рис. 3. Визуальное представление результатов трехмерной кластеризации данных (выбранного участка) комбинированной суточной радиолокационно – радиотепловой (термальной ИК (ТИК)) авиационной съемки авиационным комплексом АКДЗ-30

Для получения результата в удобном для визуального анализа виде, была применена процедура формирования поля определенных кластеров в виде растрового изображения, совмещенного с исходными изображениями (MathCAD). Дополнительно для идентификации кластера был построен вспомогательный массив условных обозначений с привязкой к номеру кластера (*puc. 3*).

В *табл.* 1 приведены числовые результаты (в машинных уровнях), характеризующие проведенную трехмерную кластеризацию результатов комбинированной суточной радиолокационно – радиотепловой авиационной съемки.

Номер клас- тера	Ближайшее евкл. расст.	Средн. знач./ср.кв.откл. интенсивности переменных			Идентификация явления, образования соответствующего
	до другого	ТИКД в	ТИКН в	РБО в	кластеру (по мнению экспертов)
	кластера	кластере	кластере	кластере	
6	65,6	198,1/24,6	186/32,9	80,9/11	Зоны подповерхностного са-
					моразогрева органических ве-
					ществ
5	45,5	136/13,9	92/15	70,1/15	Зона изменений травостоя, ин-
					дикаторов вероятности разви-
					тия процессов саморазогрева
					(предположительно)
4	26,1	81/7	47,5/11,7	90,8/13,2	Зона проявления значительно-
					го подповерхностного переув-
					лажнения почвы
3	16,1	64,4/9,5	112/8,2	97/15,2	Зоны незначительного измене-
2	16,1	81/9,6	92,6/11	108/13,4	ния влажности почвы и со-
1	22	92,1/11	87/10,2	72,4/11,1	стояния травостоя

Таблица 1. Результаты трехмерной кластеризации данных РБО-ТИК съемки

Результаты свидетельствуют о надежном разделении кластеров и уверенном соотнесении полученных кластеров с результатами экспертных оценок исходных данных (Бычков и др., 2013). Особо стоит подчеркнуть, что наиболее опасные явления подповерхностного переувлажнения почвы и развития процессов низкотемпературного саморазогрева органических веществ под поверхностью почвы надежно выделены в кластеры 6 и 4.

Кроме того, кластеру 5 соответствуют очень интересные зоны повышенного на 1-2 °С относительно окружающего фона дневного ИК-излучения. Причиной возникновения которых, очевидно, являются специфические аномалии в альбедо поверхностного слоя сухого травостоя.

Проведенный дополнительный анализ показал, что ни на ночном суточном ИК изображении, ни на зимних аэрофотоснимках и ИК-изображениях, ни на РБО изображении не отмечаются какие либо температурные аномалии или видимые изменения растительного покрова, совпадающие с этими зонами.

Поскольку все зоны подповерхностного саморазогрева располагаются внутри этих аномальных зон, то в (Бычков и др., 2013) было высказано предположение, что такие специфические аномалии коротковолнового альбедо поверхностного слоя сухого травостоя в осенний период являются предвестниками процессов формирования в приповерхностном слое почвы условий, благоприятствующих развитию низкотемпературного окисления и самонагревания органических веществ (торфа, сена, соломы и т.п.), а в последующем и их возгорания. Это предположение требует проведения дополнительных целенаправленных исследований.

Заключение

В статье представлены результаты первых экспериментов по отработке методики программной идентификации таких опасных явлений, как подповерхностное переувлажнение почвы, а также процессов подповерхностного низкотемпературного саморазогревания и возгорания органических веществ (торфа, сена, соломы и т.п.) на ранее осушенных заболоченных почвах на основе данных термальной ИК и радиолокационной съемки. Полученные результаты процедуры трехмерной кластеризации данных комбинированной суточной радиолокационно – радиотепловой (РБО-ТИК) авиационной съемки свидетельствуют о надежном разделении кластеров и уверенном соотнесении для выбранного участка полученных кластеров с результатами экспертных оценок исходных данных. Поскольку особенностью исследуемого района являлось наличие неконтролируемых опасных явлений, а именно возвратного переувлажнения ранее осушенного болота (т.е. часть территории опять вернулась в заболоченное состояние) и подповерхностного саморазогрева органических веществ с последующим возгоранием, что исключало возможность безопасного доступа без специального оборудования на поверхность наиболее интересных участков для проведения контактных наземных измерений и составления подробной карты увлажнения и саморазогрева, то контактные измерения проводились точечно в тех местах, к которым можно было безопасно проехать (Рожок и др., 2005). Для распространения этой методики на другие территории, определения ее точностных характеристик, уточнения предположений о вероятных предвестниках развития процессов саморазогревания и возгорания органических веществ и градациях увлажнения почвы необходимо проведение целенаправленной широкомасштабной отработки с использованием как дистанционных, так и широкомасштабных синхронных наземных данных.

Литература

- 1. Болотные массивы Украины: [сайт]. URL: http://www.photoukraine.com/russian/articles?id=24.
- 2. *Бычков Д.М., Иванов В.К., Цымбал В.Н., Яцевич С.Е.* Изучение проявлений подтоплений и предвестников самовозгораний на осушенных почвах активными и пассивными методами // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 166-173.
- 3. *Бычков Д.М., Иванов В.К., Цымбал В.Н., Яцевич С.Е.* Экспериментальные исследования подтопления почв, покрытых растительностью, в ИК и СВЧ диапазонах // Физические основы приборостроения. 2013. Т. 2. № 3. С. 110-119.
- 4. Иванов В.К., Матвеев А.Я., Цымбал В.Н., Яцевич С.Е. Авиационная дистанционная радиолокационнорадиотепловая диагностика переувлажнения почв // Физические основы приборостроения. 2012. Т. 1. № 2. С. 91-106.
- 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 радиволнового диапазона // Материалы 3-й НПК «Подтопление-2005»: Неотложные проблемы предупреждения и борьбы с региональным подтоплением земель. Лазурное, Херсонская обл.: НПЦ «Экология, наука, техника». 2005. С. 26-27.
- 7. *Цымбал В.Н., Яцевич С.Е., Бычков Д.М., Матвеев А.Я., Кабанов А.В.* Комплексный мониторинг проявления подтопления земель авиационным комплексом дистанционного зондирования АКДЗ-30 // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т. 16. № 1. С. 15-26
- Цымбал В.Н., Бычков Д.М., Гавриленко А.С., Матвеев А.Я., Лялько В.И, Рожок Г.П, Оголенко В.С. Оперативный мониторинг подтоплений авиационным комплексом дистанционного зондирования АКДЗ-30 // Мат. 3-й НПК «Подтопление-2005»: Неотложные проблемы предупреждения и борьбы с региональным подтоплением земель. Лазурное, Херсонская обл.: НПЦ «Экология, наука, техника». 2005. С. 28-30.

Hazardous processes identification on drained soils by active-passive remote sensing

D.M. Bychkov, V.K. Ivanov, V.N. Tsymbal, S.Ye. Yatsevich

Institute of Radophysics and Electronics NASU Kharkov 61085, Ukraine E-mail: sey59@mail.ru

In the paper, first results of development tests of the technique for automated identification of dangerous subsurface phenomena such as soils overflooding, self-heating and ignition of organic matters (peat, hay, straw etc.) on dried swamps are presented. The technique is based on the data of remote sensing of the Earth. Information from ACRS-30 remote sensing complex mounted on board aircraft-laboratory AN-30 was processed. The complex includes a scanning thermal IR radiometer (TIR, $\Delta\lambda$ =8-14 µm) and a classical side-looking radar (SLR, λ =8 mm). Data were obtained during one day at successive (day-and-night) surveillance of the same test area in Chernigov region (Ukraine). For technique implementation, the procedure of clusterization of radar and radiometer remote sensing data in 3D information attributes space was used. Respectively, intensities of received microwave radar signals and day and night IR radiation were chosen as coordinates for information attributes space. Six clusters, which can be reliably separated in 3D information attributes space and confidently correlate (for chosen area) with the results of expert original data estimation were eliminated. Results obtained in the regime of automated separation confirm good potential of the proposed technique for remote sensing of large areas.

Keywords: multidimensional data clusterization, overmoistered soil, organic substances low-temperature oxidation and self-heating zones, thermal IR and radar microwave remote sensing data.

References

- 1. http://www.photoukraine.com/ russian/articles?id=24.
- 2. Bychkov D.M., Ivanov V.K., Tsymbal V.N., Yatsevich S.Ye., Izuchenie proyavlenii podtoplenii i predvestnikov samovozgoranii na osushennykh pochvakh aktivnymi i passivnymi metodami (Manifestations of

underfloodings and harbingers of spontaneous ignitions on drained-out wetlands investigation by active and passive methods), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 105-114.

- 3. Bychkov D.M., Ivanov V.K., Tsymbal V.N., Yatsevich S.Ye., Eksperimental'nye issledova-niya podtopleniya pochv pokrytyh rastitel'nost'yu, v IK i SVCh diapazonakh (Underflooding manifestations on vegetated soil identification by consecutive day-time and night-time and seasonal radar thermal IR aviation remote sensing), *Fizicheskie osnovy priborostroeniya*, 2013, Vol. 2, No. 3, pp. 110-119.
- 4. Ivanov V.K., Matveev A.Ja., Tsymbal V.N., Yatsevich S.Ye., Aviatsionnaya distantsionnaya radiolokatsionnoradioteplovaya diagnostika pereuvlazhneniya pochv (Airborne radar – thermal infrared diagnosing of waterlogged soils), *Fizicheskie osnovy priborostroeniya*, 2012, Vol. 1, No. 2, pp. 91-106.
- 5. Radiolokatsionnye metody i sredstva operativnogo distantsionnogo zondirovaniya Zemli s aerokosmicheskikh nositelei (Radar Techniques and Facilities for On-Line Remote Sensing of the Earth from Aerospace Carriers), Eds. Konyukhov S.N., Dranovskii V.I., Tsymbal V.N., Kiev: Dzhulia print, 2007, 439 p.
- 6. Rozhok G.P., Gunchenko V.O., Tsymbal V.N. Opredelenie zon podtopleniya territorii s ispol'zovaniem vlagourovnemera radivolnovogo diapazona (Defining zones of flooding areas using by the moisture-level meter of the radio-wave range), "*Podtoplenie-2005*": *Neotlozhnye problemy preduprezhdeniya i bor'by s regional'nym podtopleniem zemel'* ("Flooding 2005": Urgent Problems of Preventing and Combating Regional Waterlogging), Proc. 3rd Scientific Practical Conference, Lazurnoe, the Kherson region: NPC "Ekologija, nauka, tehnika", 2005, pp. 26-27.
- 7. Tsymbal V.N., Yatsevich S.Ye., Bychkov D.M., Matveev A.Ja., Kabanov A.V., Kompleksnyi monitoring proyavleniya podtopleniya zemel' aviatsionnym kompleksom distantsionnogo zondirovaniya AKDZ-30 (Integrated monitoring of lands underflooding manifestations by the aviation remote sensing complex ACRS-30), *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*, 2011, Vol. 16, No. 1, pp. 15-26.
- Tsymbal V.N., Bychkov D.M., Gavrilenko A.S., Matveev A.Ja., Ljal'ko V.I, Rozhok G.P, Ogolenko V.S., Operativnyj monitoring podtoplenij aviacionnym kompleksom distancionnogo zondirovanija AKDZ-30 (Operational flooding monitoring by aviation remote sensing complex ACRS-30), "Podtoplenie-2005": Neotlozhnye problemy preduprezhdenija i bor'by s regional'nym podtopleniem zemel ("Flooding 2005": Urgent Problems of Preventing and Combating Regional Waterlogging), Proc. 3rd Scientific Practical Conference, Lazurnoe, the Kherson region: NPC "Ekologija, nauka, tehnika", 2005, pp. 28-30.