

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

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: sey59@mail.ru

МНОГОМЕРНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ДАННЫХ АКТИВНО-ПАССИВНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ОСУШЕННЫХ ПОЧВАХ

Мониторинг опасных подповерхностных процессов переувлажнения осушенных заболоченных почв и самовозгорания торфяников, которые происходят в Украине на значительных территориях, затруднен без применения средств дистанционного зондирования Земли. Для эффективного мониторинга обширных территорий необходимы методы современной компьютерной идентификации проявлений опасных явлений по данным аэрокосмической съемки активно-пассивными средствами дистанционного зондирования Земли. Предложены и испытаны методы трехмерной кластеризации данных последовательного ночного и дневного термально-радиолокационного авиационного зондирования переувлажненных осушенных почв и подповерхностного самонагревания органических веществ. Результаты трехмерной кластеризации данных свидетельствуют о надежном разделении кластеров и уверенном соотношении для выбранного участка полученных кластеров с результатами экспертных оценок исходных данных. Для распространения методики на другие территории необходимо проведение обработки ее с использованием как дистанционных, так и синхронных наземных данных на больших территориях. Ил. 4. Табл. 4. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, многомерная классификация данных, влажность, почва, самонагревание, низкотемпературное окисление.

В Украине практически повсеместно наблюдается активизация катастрофических процессов подтопления территорий, т. е. подъем уровня грунтовых вод, обусловленного хозяйственно-техногенной человеческой деятельностью. Значительная часть территории Украины покрыта заболоченными почвами. Площадь 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. Общий мелиоративно-болотный фонд Украины состоит из болот и торфоболотных земель, заболоченных и переувлажненных земель в 6,6 млн га. При этом система мелиоративного водоотвода в значительной степени запущена. Развиваются процессы переувлажнения ранее осушенных заболоченных почв, а также возникновения самовозгорания торфяников [1].

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 дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В работах [2–5] представлены положительные результаты экспериментов по обнаружению проявлений переувлажнения почвы и предвестников самовозгораний на осушенных почвах методом суточной (т. е. дневной и ночной на протяжении одних суток в наиболее благоприятных для съемки 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 монито-

ринга обширных территорий необходимо отработать методы современной программной идентификации их проявлений по данным аэрокосмической съемки активно-пассивными средствами ДЗЗ.

1. Практический мониторинг подтопленных территорий. Для отработки методик совместного использования данных суточной и сезонной авиационной видео, инфракрасной (ИК) и радиолокационной съемки для обнаружения таких опасных явлений, как проявления переувлажнения почвы, а также предвестников самовозгораний на ранее осушенных почвах, использовался авиационный комплекс дистанционного зондирования АКДЗ-30. В его состав [6, 7] входит: радиолокатор бокового обзора (РБО) 8-мм диапазона, сканирующий радиометр термального ИК-диапазона, аэрофотокамера и система бортовой обработки, накопления, интерпретации и отображения информации, а также навигационный приемник системы глобального позиционирования (GPS). Комплекс АКДЗ-30 ориентирован на решение широкого круга научных и практических задач в интересах регионов Украины. Прежде всего, это оперативное обнаружение предвестников и мониторинг проявлений разнообразных природных и техногенных катастроф, критических ситуаций (таких как наводнения, разливы на водной поверхности нефтепродуктов, ледовые заторы на реках, крупномасштабные пожары и др.), а также поиск проявлений полезных ископаемых, обнаружение судов-нарушителей границ морской экономической зоны и т. д. Комплекс размещен на борту самолета АН-30, который принадлежит МЧС Украины, имеет относительно невысокие эксплуатационные расходы и при этом достаточно хорошие летные характеристики.

Внешний вид комплекса АКДЗ-30, а также его основных систем представлены на рис. 1, а ос-

новные параметры систем дистанционного зондирования комплекса АКДЗ-30 приведены в табл. 1–3.



а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Внешний вид самолета АН-30 с установленным на нем авиационным комплексом дистанционного зондирования АКДЗ-30 (а); внутренний вид салона с установленными рабочими местами бортовых операторов (б); приемно-передающая часть РБО-08 (в); аэрофотоаппарат и ИК-сканер «Малахит-1» (г)

Таблица 1

Основные параметры радиолокационной системы авиационного комплекса дистанционного зондирования АКДЗ-30

Рабочий диапазон радиоволн	8 мм
Тип радиолокатора	РБО
Поляризация сигналов	ВВ
Импульсная излучаемая мощность	16 кВт
Длительность зондирующего импульса	43 нс
Диапазон рабочих высот	500...7 000 м
Рабочая полоса обзора	15 км
Среднее пространственное разрешение	7...10 м
Предельно обнаруживаемая ЭПР	0,03 м ²
Обработка информации	цифровая, на борту
Отображение информации	на мониторах <i>IBM PC</i>
Общая масса	85 кг
Общая потребляемая мощность	1 кВт
Обслуживающий персонал	1 оператор

Таблица 2

Основные характеристики аэрофотоаппаратов, которые используются в составе комплекса АКДЗ-30

Параметры	АФА-41/7,5	АФА-41/10	АФА-41/20
Тип объектива	Ортогон-1	МРО-2	Орион-20
Фокусное расстояние	75 мм	100 мм	200 мм
Относительное отверстие	1:6,8	1:8	1:6,3...1:22
Угол поля зрения	119°	104°	65°
Ширина захвата ($H = 6\ 000$ м)	14,4 км	10,8 км	5,4 км
Протяженность маршрута (перекрытие 60 %, $H = 6\ 000$ м)	1 612 км	1 210 км	605 км

Таблица 2

Основные характеристики сканера инфракрасного диапазона «Малахит-1»

Наименование параметра	Значение
Тангенциальная скорость $W/H, c^{-1}$	0,05...0,36
Обзор местности	3,4H
Мгновенное поле обзора, рад	$1,75 \cdot 10^{-3}$
Спектральный диапазон, мкм	8–14
Энергетическое разрешение на уровне 20° С, при соотношении сигнал/шум, равному 1, °С	0,1...0,15
Скорость вращения сканирующей призмы, об./мин	2 250
Частота строк, Гц	150
Полоса пропускания электронного тракта	1 Гц...150,0 кГц

Информация радиолокатора 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 быстротекающих 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 натурального 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 водотода, позволявшая ранее понизить уровень подповерхностных вод и, соответственно, существенно уменьшить площадь переувлажненных вследствие этого земель и площадей, занятых болотами, в большей степени запущена. Значительная часть дренажных каналов загромождена, заросла камышом и не выполняет задач, возлагаемых на мелиоративную систему [8].

2. Многомерная кластеризация данных комбинированной суточной радиолокационной и радиотепловой авиационной съемки авиационным комплексом АКДЗ-30. Для осуществления процедуры кластеризации данных

радиолокационной и радиотепловой (термальной ИК (ТИК)) съемки было осуществлено построение трехмерного пространства признаков с координатами – интенсивность принятого сигнала ночного ТИК-излучения, дневного ТИК-излучения и интенсивность принятого рассеянного подстилающей поверхностью радиолокационного сигнала.

Исходные файлы ТИК- и РБО-изображений (рис. 2), 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. Ночное и дневное ТИК-изображения получались механическим сканированием (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 [5] дневных ($I_{\max \text{ дн.}} \sim T = 293 \text{ К} \div I_{\min \text{ дн.}} \sim T = 282 \text{ К}$) и ночных ($I_{\max \text{ н.}} \sim T = 286 \text{ К} \div I_{\min \text{ н.}} \sim T = 271 \text{ К}$) ТИК-изображений таким образом, чтобы вес одинаковых измеряемых температурных контрастов был для этих изображений одинаковым. После этого было осуществлено нормирование всех трех переменных к единому диапазону значений сигналов через отношение $Z = (I - \bar{I}) / (I_{\max} - I_{\min})$, где I_{\max} и I_{\min} – максимальное и минимальное значение интенсивности сигнала на каждом изображении (по всему полю изображения).

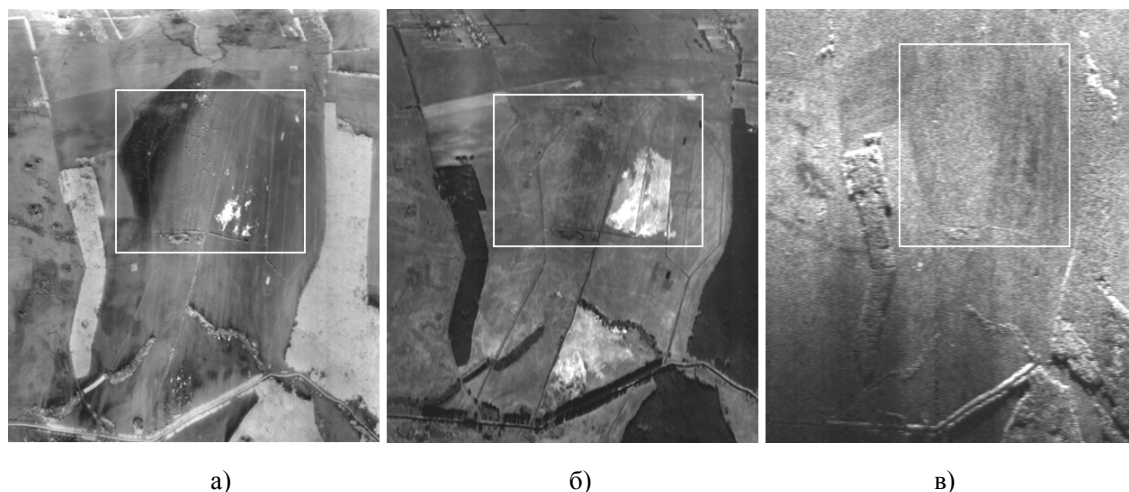


Рис. 2. Исходные (до совмещения) изображения тестового полигона: а) – ночное ТИК-изображение; б) – дневное ТИК-изображение; в) – РБО-изображение

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 (рис. 2). Это вызвало необходимость проведения процедуры совмещения этих изображений, которая была выполнена с помощью геоинформационной системы «ENVI». Каждое из полученных изображений было привязано к одной и той же топографической карте масштаба 1:100 000 с использованием системы устойчивых реперных точек (пересечения дорог и каналов, углы лесных массивов и полей, точки поворота речного русла и т. п.).

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 [4], обозначенного на исходных изображениях (рис. 2) прямоугольниками.

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. В результате были получены совмещенные изображения выделенных фрагментов (рис. 3) съемки экспериментального полета. Размеры изображений всех файлов одинаковы (1 835×2 652 байт). Для согласования пространственного разрешения ТИК-

и радиолокационных изображений совмещенные фрагменты были подвергнуты процедуре пространственной фильтрации (фильтром с окном 10×10 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 ТИК-сигнала/интенсивность дневного ТИК-сигнала/интенсивность РБО-сигнала.

Для выполнения самой процедуры кластерного анализа текстовые данные были импортированы в программный пакет *STATISTICA*, где была выбрана функция *K-Means Clustering* с автоматическим поиском центров шести 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 черно-белого изображения с градациями серого (рис. 4).

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 градаций яркости с привязкой к номеру кластера (рис. 4).

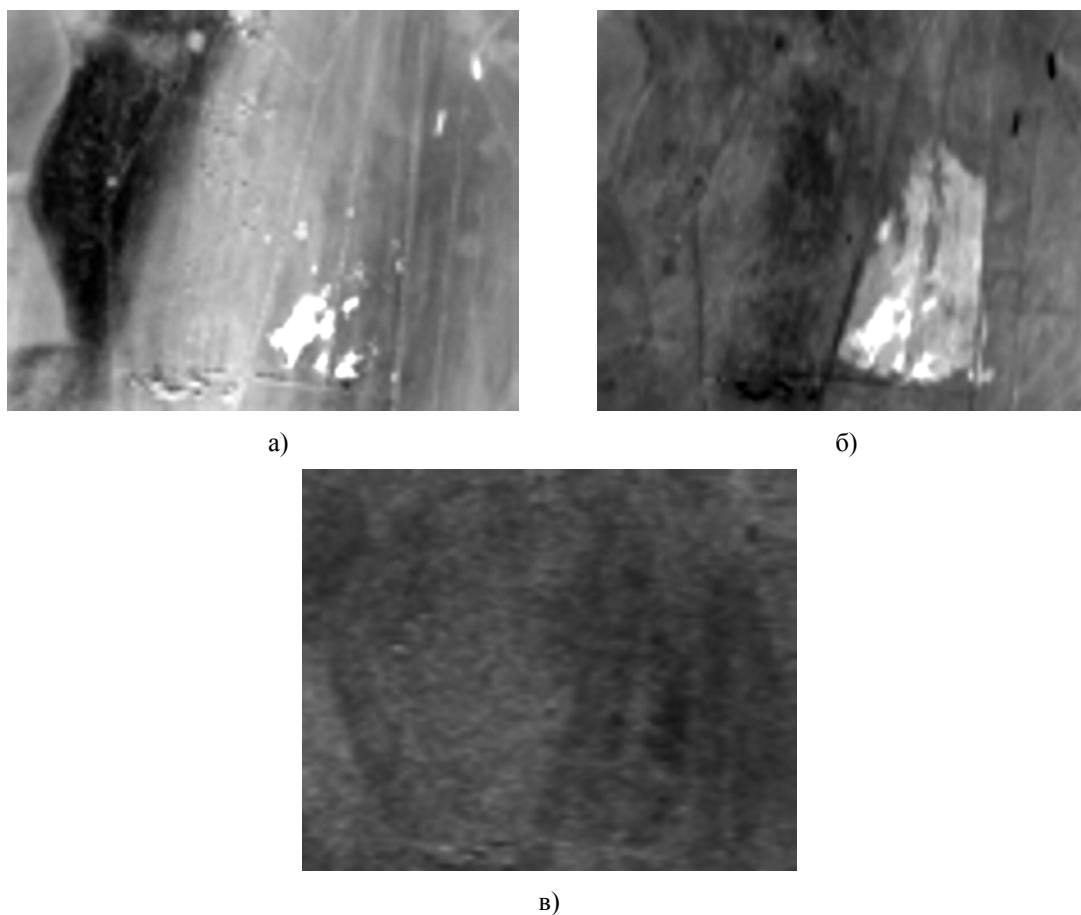


Рис. 3. Совмещенные изображения исследуемого участка: а) – дневное ТИК-изображение; б) – ночное ТИК-изображение; в) – РБО-изображение

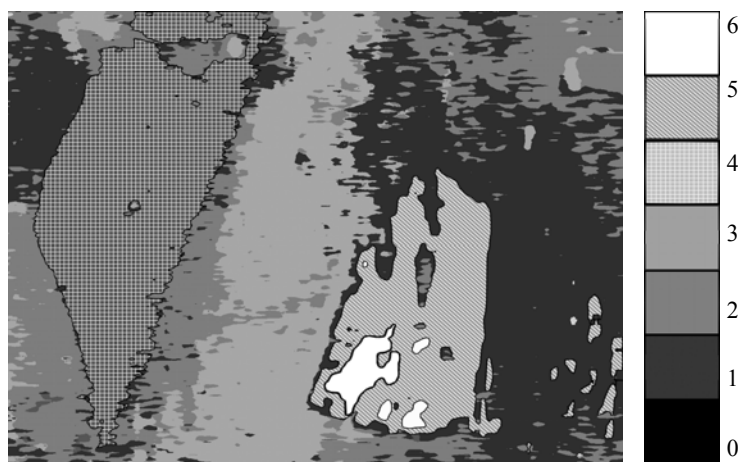


Рис. 4. Визуальное представление результатов трехмерной кластеризации данных (выбранного участка) комбинированной суточной радиолокационной и радиотепловой авиационной съемки авиационным комплексом АКДЗ-30

В табл. 4 приведены числовые результаты, характеризующие проведенную трехмерную кластеризацию результатов комбинированной суточной радиолокационной и радиотепловой авиационной съемки, которые свидетельствуют о надежном разделении кластеров и уверенном соотношении полученных кластеров с результа-

тами экспертных оценок исходных данных [5, 8]. 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.

Результаты трехмерной кластеризации данных

Номер кластера	Ближайшее евклидово расстояние до другого кластера	Ср. зн./ ср. кв. откл. интенсивн. дневн. ТИК в кластере	Ср. зн./ ср. кв. откл. интенсивн. ночн. ТИК в кластере	Ср. зн./ ср. кв. откл. интенсивн. РБО в кластере	Идентификация явления, образования, соответствующего кластеру
6	65,6	198,1/24,6	186/32,9	80,9/11	Зоны подповерхностного саморазогрева органических веществ
5	45,5	136/13,9	92/15	70,1/15	Зона изменений травостоя, индикаторов вероятности развития процессов саморазогрева (предположительно)
4	26,1	81/7	47,5/11,7	90,8/13,2	Зона проявления значительного подповерхностного переувлажнения почвы
3	16,1	64,4/9,5	112/8,2	97/15,2	Зоны незначительного изменения влажности почвы и состояния травостоя
2	16,1	81/9,6	92,6/11	108/13,4	
1	22	92,1/11	87/10,2	72,4/11,1	

Кроме того, кластеру 5 соответствуют очень интересные зоны повышенного на 1...2°C относительно окружающего фона дневного ИК-излучения, причиной возникновения которых, очевидно, являются специфические аномалии в альbedo 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-изображениях 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 было высказано предположение [5], что такие специфические аномалии коротковолнового альbedo 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.

Выводы. 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 комбиниру-

ванной суточной радиолокационной и радиотепловой авиационной съемки свидетельствуют о надежном разделении кластеров и уверенном соотношении для выбранного участка полученных кластеров с результатами экспертных оценок исходных данных. Для распространения этой методики на другие территории, уточнения предположений о вероятных предвестниках развития процессов саморазогревания и возгорания органических веществ и грациях увлажнения почвы необходимо проведение целенаправленной широкомасштабной отработки с использованием как дистанционных, так и синхронных наземных данных.

Библиографический список

1. *Болотные массивы* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.photoukraine.com/russian/articles?id=24>. – Загл. с экрана.
2. *Комплексный мониторинг проявления подтопления земель авиационным комплексом дистанционного зондирования АКДЗ-30* / В. Н. Цымбал, С. Е. Яцевич, Д. М. Бычков и др. // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2011. – 16, № 1. – С. 15–26.
3. *Авиационная дистанционная радиолокационно-радиотепловая диагностика переувлажнения почв* / В. К. Иванов, А. Я. Матвеев, В. Н. Цымбал, С. Е. Яцевич // *Физические основы приборостроения*. – 2012. – 1, № 2. – С. 91–106.
4. *Изучение проявлений подтоплений и предвестников самовозгораний на осушенных почвах активными и пассивными методами* / Д. М. Бычков, В. К. Иванов, В. Н. Цымбал, С. Е. Яцевич // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2013. – 10, № 2. – С. 166–173.
5. *Экспериментальные исследования подтопления почв, покрытых растительностью, в ИК и СВЧ диапазонах* / Д. М. Бычков, В. К. Иванов, В. Н. Цымбал, С. Е. Яцевич // *Физические основы приборостроения*. – 2013. – 2, № 3. – С. 104–113.
6. *Радиолокационные методы и средства оперативного дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических но-*

- сителей // Под ред. С. Н. Конюхова, В. И. Драновского, В. Н. Цымбала. – К.: Джулия принт, 2007. – 439 с.
7. *Оперативный мониторинг подтопленных авиационным комплексом дистанционного зондирования АКДЗ-30* / В. Н. Цымбал, Д. М. Бычков, А. С. Гавриленко и др. // Мат. 3-й научно-практич. конф. Подтопление-2005: Неотложные проблемы предупреждения и борьбы с региональным подтоплением земель. – Лазурное: НПЦ «Экология, наука, техника», 2005. – С. 28–30.
8. *Рожок Г. П.* Определение зон подтопления территорий с использованием влагоуровнемера радиоволнового диапазона / Г. П. Рожок, В. О. Гунченко // Там же. – С. 26–27.

Рукопись поступила 26.03.2014.

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

MULTIDIMENSIONAL CLASSIFICATION OF ACTIVE-PASSIVE REMOTE SENSING DATA FOR HAZARDOUS PROCESSES ON DRAINED SOILS MONITORING

The monitoring of dangerous processes such as overmoistening of drained boggy soils and spontaneous combustion of peat, which occur in Ukraine over large areas, is difficult without remote sensing systems utilizing. The methods of modern computer identification of hazardous processes according to the data of aerospace survey by active-passive remote sensing are needed for effective monitoring of vast area. The methods of three-dimensional clustering of data on consecutive day and night thermal-radar airborne sensing of overwet drained soil and subsurface self-heating of organic matter have been proposed and tested. The results of the three-dimensional clustering of data demonstrate the reliability of the separation of clusters and confident correlation for the selected area of obtained clusters with the results of expert assessments of initial data. For propagation techniques to other

areas it is necessary to conduct working out using both remote and synchronous ground data over large areas.

Key words: remote sensing, multidimensional data classification, moisture, soil, self-heating, low-temperature oxidation.

Д. М. Бычков, В. К. Иванов,
В. М. Цимбал, С. Е. Яцевич

БАГАТОВИМІРНА КЛАСИФІКАЦІЯ ДАНИХ АКТИВНО-ПАСИВНОГО ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ НЕБЕЗПЕЧНИХ ЯВИЩ НА ОСУШЕНИХ ҐРУНТАХ

Моніторинг небезпечних підповерхневих процесів перезволоження осушених заболочених ґрунтів і самозаймання торфовищ, які відбуваються в Україні на значних територіях, утруднено без застосування засобів дистанційного зондування Землі. Для ефективного моніторингу великих територій необхідні методи сучасної комп'ютерної ідентифікації проявів небезпечних явищ за даними аерокосмічної зйомки активно-пасивними засобами дистанційного зондування Землі. Запропоновано й випробувано методи тривимірної кластеризації даних послідовного нічного та денного термально-радіолокаційного авіаційного зондування перезволожених осушених ґрунтів і підповерхневого самонагрівання органічних речовин. Результати тривимірної кластеризації даних свідчать про надійний поділ кластерів і впевнене співвіднесення для обраної ділянки отриманих кластерів з результатами експертних оцінок вихідних даних. Для поширення методики на інші території необхідно відпрацювання її з використанням як дистанційних, так і синхронних наземних даних на великих територіях.

Ключові слова: дистанційне зондування, багатовимірна класифікація даних, вологість, ґрунт, самонагрівання, низькотемпературне окислення.