

9. *Macnae J. C.* Application of geophysics for the detection and exploration of kimberlites and lamproites // *J. Geochem. Explor.* – 1995. – **53**. – P. 213–243.
10. *Macnae J. C.* Kimberlites and exploration geophysics // *Geophys.* – 1979. – **44**. – P. 1395–1416.
11. *Jenke G., Cowan D. R.* Geophysical signature of the Ellendale lamproite pipes, Western Australia Geophysical signatures of Western Australian mineral deposits // *Geol. and Geophys. Univer. West. Australia.* – 1994. – **26**. – P. 403–414.
12. *Smith R. S., Annan A. P., Lemieux J., Pedersen R. N.* Application of modified GEOTEM system to the reconnaissance exploration for kimberlites in the Point Lake area: NWT, Canada // *Geophys.* 1996. – **61**. – P. 82–92.
13. *Jones A. G., Ferguson I. J., Chave A. D. et al.* The electric lithosphere of the Slave craton // *Geol.* – 2001. – **29**. – P. 423–426.
14. *Wu X., Ferguson I. J., Jones A. G.* Magnetotelluric response and geoelectric structure of the Great Slave Lake Shear Zone // *Earth Planet. Sci. Let.* – 2002. – **196**. – P. 35–50.
15. *Griffin W. L., Doyle B. J., Ryan C. G. et al.* Layered mantle lithosphere in the Lac de Gras area, Slave craton: composition, structure and origin // *J. Petrology.* – 1999. – **40**. – P. 705–727.

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна
НАН України, Київ

Надійшло до редакції 23.08.2006

УДК 528.88.63

© 2007

Член-кореспондент НАН України **В. І. Лялько, О. І. Сахацький,
Г. М. Жолобак, Л. Д. Греков**

Контроль площ та стану озимих культур за допомогою знімків MODIS/TERRA та SPOT XI (на прикладі Київської області)

The research of the possibility to use autumn MODIS/TERRA images for the determination of the area and growth conditions of winter crops in the Kyiv region is carried out. The total area of winter wheat fields and winter raps under harvest-2006 has been determined within the indicated region using remote sensing data. It was determined that the total area of winter cultures, identified by using MODIS/TERRA images, differs from that presented in opened information sources by 4–7%. It is shown that satellite data are sensitive to changes of the vegetation covering caused by the tillering of winter cereal crops. It was a background for the determination of the area of winter crops with different growth stage conditions before entering the winter period. The results of the processing of high resolution SPOT XI image were used as reference data for the evaluation of the accuracy of the identification of areas using MODIS/TERRA images. It is proposed to use these methodical approaches for the determination of the area and growing conditions of winter crops for the whole territory of Ukraine.

Впродовж третини століття світова наукова спільнота досліджує можливості застосування знімків земної поверхні з космічної орбіти для розв'язання низки прикладних задач. Важливою складовою серед них є супутникові спостереження за станом рослинності суходолу, зокрема сільськогосподарських угідь. Знімки зі супутника Landsat були першими при розробці системи моніторингу аграрних об'єктів, однак лімітовані часові просторові показники покриття цим супутником під час критичних (фазових) періодів розвитку рослин роблять

ці знімки незручними для впровадження в сільськогосподарські регіональні операційні програми. Знімки з космічного апарата NOAA мають добрі часові характеристики, але надто грубу просторову розрізненість. В останні роки у зв'язку з запуском супутника TERRA багато дослідників розглядає гіперспектральну зйомку сканером MODIS, який встановлено на супутнику TERRA, як альтернативну до моніторингової зйомки AVHRR/NOAA, причому зі значно збільшеними можливостями в плані деталізації стану об'єктів на поверхні Землі. Адже знімки земної поверхні, зроблені за допомогою сканера MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer — сканувальний спектро радіометр середньої розрізняювальної здатності), виконуються у 36-ти спектральних каналах. З них у 29-ти каналах зйомка проводиться з розрізненістю 1 км, у 5-ти (блакитному, зеленому та 3-х ближніх інфрачервоних) — з розрізненістю 500 м та у 2-х (червоному та ближньому інфрачервоному) — з розрізненістю 250 м у надир. Смуга зйомки охоплює 2330 км, що дозволяє робити глобальне покриття усєї земної поверхні кожні один-два дні [1].

Система MODIS орієнтована також на дослідження рослин. Стан рослинності, її реакції на зовнішній вплив вивчаються з використанням вегетаційних індексів. Спеціально для MODIS на підставі NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) розроблено алгоритми розрахунку індексів нового покоління: поліпшеного вегетаційного індексу EVI (Enhanced Vegetation Index), глобального листового індексу LAI (Leaf Area Index) і показника фотосинтетично активної радіації FPAR (Fraction of Photosynthetically Active Radiation). На відміну від традиційно застосовуваного вегетаційного індексу NDVI, для розрахунку LAI/FPAR використовується більша кількість спектральних зон зйомки, враховується карта типів покриву поверхні Землі і додаткова наземна інформація [2]. Виготовлення похідних зображень за даними MODIS шляхом обробки інформації за спеціальними алгоритмами у вибраних зонах дозволяє вивчати первинну продуктивність, біомасу суходолу та інтенсивність фотосинтезу.

З урахуванням застосування даних системи MODIS у моделях прогнозування врожайності кукурудзи та сої спеціалістами Міністерства сільського господарства США під керівництвом метеоролога Р. Doraiswamy [3] було модифіковано схему дистанційних даних для практичного прогнозування врожайності сільськогосподарських культур, в якій замість NDVI, виведеного за результатами NOAA/AVHRR, використовуються 8-денні композити MODIS. Дані дистанційного зондування Землі активно використовують і США, і країни ЄС у сфері офіційної сільськогосподарської статистики [4]. Напрацьовано чимало алгоритмів обробки отриманих знімків, створено системи супутникового моніторингу сільськогосподарських земель на глобальному рівні, які репрезентовано на сайтах Відділення служби аналізу світового сільськогосподарського виробництва при Міністерстві сільського господарства уряду США (<http://www.fas.usda.gov/pecad/>) та проекту MARS Об'єднаного дослідного центру Європейської Комісії (<http://mars.jrc.it/>).

Широкомасштабне застосування дистанційної інформації для розв'язання задач агропромислового виробництва спостерігається в Росії та Казахстані. Зокрема, для моніторингу сільськогосподарських земель Росії науковці Інституту космічних досліджень РАН та Головного обчислювального центру Міністерства сільського господарства РФ розробляють систему автоматизованого збору, обробки і поширення супутникових даних [5]. Опрацювання цієї системи проводиться на прикладах таких регіонів, як Краснодарський край, Ростовська, Липецька, Калузька та Ленінградська області. Тут створено систему архівації супутникових даних, в режимі дослідної експлуатації формуються інформаційні продукти, планується розширення її для 35 російських регіонів та створення спеціалізованих ГІС

федерального рівня. В Казахстані також активно використовують дані космічної зйомки для картування та оцінки посівних площ озимих і ярих зернових культур та прогнозування врожайності яровини [6, 7]. Інформацію, отриману шляхом аналізу космоснімків, впроваджують у практику сільськогосподарського виробництва Білорусі (<http://uip.basnet.by/kosmos2/sec7.htm>) та Азербайджану [8].

В Україні впродовж 2001–2005 рр. спеціалісти Наукового центру аерокосмічних досліджень Інституту геологічних наук НАН України працюють над створенням методики прогнозування врожайності озимої пшениці на рівні адміністративних районів за допомогою використання інформації з приладів дистанційного зондування Землі. Для цього було задіяно космоснімки із супутників AVHRR/NOAA і Landsat-7 [9–11]. З 2004 р. проводиться робота по залученню знімків MODIS для вдосконалення такої методики. Разом з фахівцями з Інституту проблем національної безпеки РНБО України в рамках спільного проекту з вивчення перспектив використання супутникових даних високої розрізненості та визначення параметрів моделей для прогнозування врожайності зернових культур нами вперше в Україні протягом листопада – грудня 2005 р. вивчалась можливість застосування знімків середньої та високої розрізненості з супутників TERRA та SPOT для розв'язання окремих задач сільськогосподарського виробництва. Метою цього повідомлення є висвітлення результатів застосування осінніх знімків MODIS та SPOT XI для визначення площі та стану посівів озимих культур на прикладі Київської області.

Джерелом дистанційної інформації були знімки MODIS за жовтень 2005 р., зокрема за 06.10.2005 р. й 29.10.2005 р. та SPOT XI за 01.11.2005 р. Спочатку знімки MODIS було прив'язано до топографічної карти. Далі, використовуючи програмний продукт ERDAS Imagine 8.4 та наземні спостереження, проведено класифікацію методом найбільшої вірогідності. Виконано кілька варіантів класифікації знімків і виявлено, що найкращі результати показав той варіант, при якому поєднувалось синтезоване зображення, що включає значення NDVI та різницю між значеннями NDVI знімків MODIS за 06.10.2005 р. й 29.10.2005 р. (рис. 1).

При проведенні досліджень (четвертий квартал 2005 р.) обстановка на полях характеризувалася тим, що ярі культури вже зібрано. На площах, які вони займали, або проводилось оброблення ґрунту, або ж вони залишалися вкритими пожнивними залишками. Відповідно, такі ділянки були або забарвлені в темні кольори відповідного типу ґрунту, або мали сіро-жовте забарвлення, характерне для сухої трав'янистої рослинності. Багато-річні трави зменшували фотосинтегичну активність і поступово жовкнули. Тільки озимі культури активно ростуть і збільшують свою біомасу. Тому їх посіви до моменту переходу середньодобової температури нижче 5 °С встигають набути насиченого зеленого забарвлення, яке достовірно фіксується за допомогою дистанційного зондування Землі. Космічні знімки, отримані в цей час, є вдалим засобом ідентифікації таких культур.

В результаті класифікації космічних знімків MODIS нами були визначені площі посівів озимих культур (озимих зернових та озимого ріпаку) в межах Київської області під урожай 2006 р., а саме: площа посівів озимих зернових культур становила 202,97 тис. га, посіви озимого ріпаку займали 28,86 тис. га. Стан посівів був загалом задовільний. Для порівняння отриманих за допомогою космічної інформації даних з фактичними значеннями було зібрано показники засіяних площ (табл. 1).

За результатами розрахунків, дистанційно визначені площі озимих культур під урожай 2006 р. відхиляються від даних, опублікованих засобами масової інформації на 4–7%, що вказує на досить високий рівень узгодженості даних.

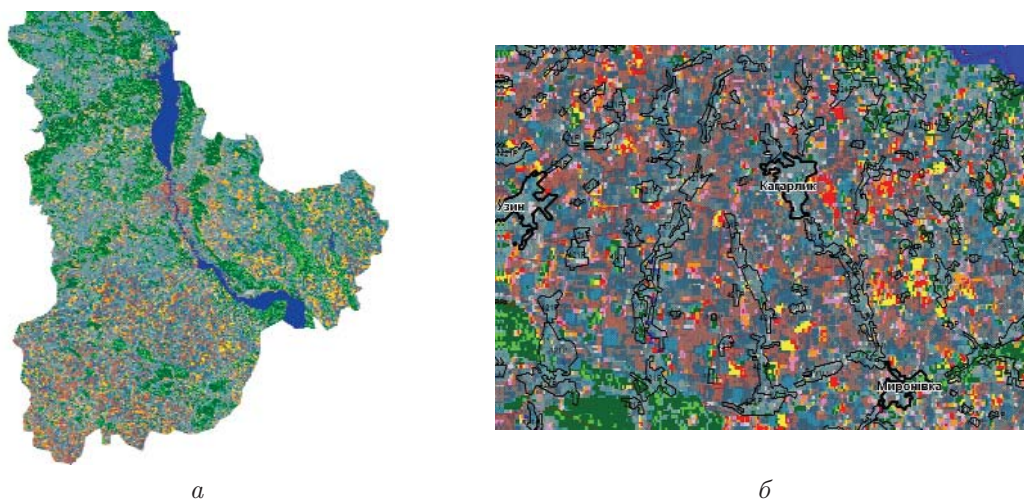


Рис. 1. Класифіковане зображення, отримане за допомогою обробки серії знімків MODIS за жовтень 2005 р.:
a — Київська область; *б* — збільшений фрагмент південної частини Київської області

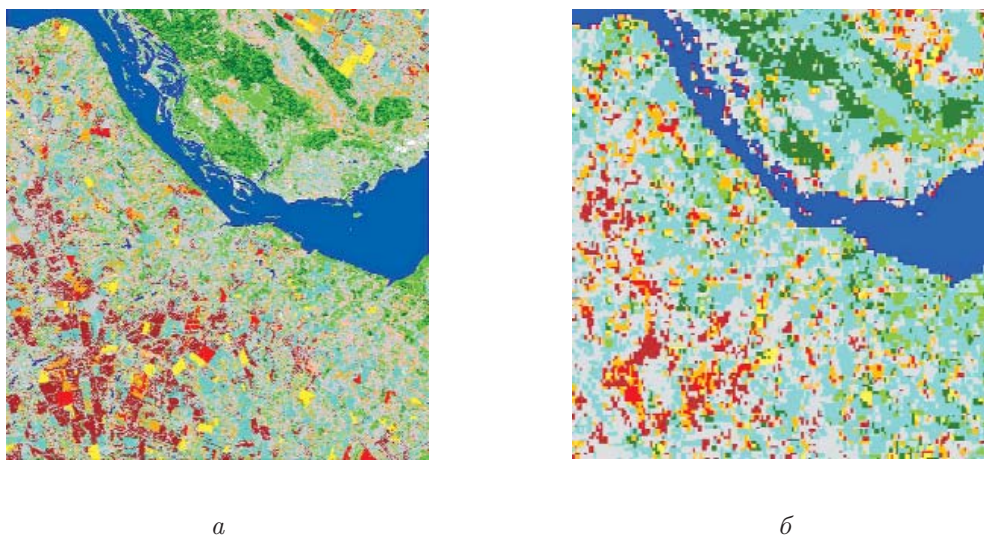


Рис. 3. Класифіковані знімки SPOT XI (*a*) та MODIS (*б*) у межах окремого фрагмента південної частини Київської області з виділенням стану посівів на кінець жовтня — початок листопада.
Червоний колір — фаза куціння озимих зернових; *помаранчевий* — фаза сходів озимих зернових; *жовтий* — посіви озимого ріпаку; *зелений* — ліси та кущі; *синій* — вода. Інші кольори відповідають населеним пунктам, стерні, перелогам та відкритому ґрунту

Проведені вибіркові наземні роботи свідчать, що отримані дані космічної зйомки реагують на зміну проективного покриття, спричинену процесом кушціння озимих зернових, і тому можуть бути використані для оцінки стану кожного конкретного посіву розміром понад 30 га перед початком його перезимівлі. Під час наземних обстежень виділялись посіви озимих зернових культур у фазах: сходи, третій листок, початок кушціння, кушціння, масове кушціння. Оскільки крайні фазові стани цих посівів при класифікації знімка часто помилково визначались програмою як інші класи, зокрема посіви у фазі сходи — третій листок визначались як відкритий ґрунт, а озимі зернові у фазі масового кушціння — як посіви озимого ріпаку, то для коректної класифікації було об'єднано в один клас під назвою “сходи” озимі зернові у фазі сходи — третій листок — початок кушціння, а в другий клас під назвою “кушціння” — озимі зернові у фазі кушціння, масове кушціння. За космічним знімком MODIS було розраховано значення NDVI посівів озимих зернових культур цих двох класів та відкритого прикатаного ґрунту. Для цього використано показники середньої та максимальної яскравостей першого й другого каналів для десяти однотипних посівів та обчислено їх середнє значення (рис. 2).

За результатами аналізу сигнатур посівів озимих зернових культур синтезованого зображення зі знімків MODIS за жовтень 2005 р. і зіставлення його з наземними завірковими даними (третя декада листопада 2005 р.) виявлено, що в межах Київської області у фазі кушціння при входженні в період перезимівлі було 126,32 тис. га озимих зернових (стан готовності до зимівлі добрий та задовільний), а площа 76,65 тис. га була зайнята посівами у фазі сходи (перезимівля посівів буде більш чутливою до несприятливих агрометеоумов).

Для оцінки точності обробки космічний знімок MODIS порівнювався зі знімком високої розрізненості SPOT XI від 01.11.2005 р. Останній був виконаний в усіх стандартних чотирьох каналах: зеленому (0,50–0,59 мкм), червоному (0,61–0,68 мкм), ближньому інфрачервоному (0,79–0,89 мкм) і середньому інфрачервоному (1,58–1,75 мкм). Хмарність знімка SPOT займає близько 1% площі знімка. Якість його в усіх каналах відмінна. Просторова розрізненість на місцевості становить 10 м. Знімок, загальна площа якого становить приблизно 3600 км², охоплює Кагарлицький, Миронівський райони та частину Бориспільського

Таблиця 1. Площа посівів озимих культур Київської області під урожай 2006 р.

Сільськогосподарська культура	Площа посівів, тис. га	Різниця визначеної площі за MODIS у порівнянні з опублікованими даними %	Джерело, дата отримання інформації
Озимі зернові	202,97	0	MODIS, 29.10.2005
	219	-7	УНІАН Київщина, 11 лист. 2005 р., № 73 (73), с. 5 http://unian.net/files/products/_Toc119494062
	211,6	-4	http://www.apk-inform.com/showart.php?id=34494 від 21.03.2006 УНІАН Київщина, 11 січ. 2006 р., № 01 (96), с. 7 http://unian.net/files/products/_Toc124763610
Озимий ріпак	28,86	0	MODIS за 29.10.2005
	27,1	+6	УНІАН Київщина, 26 верес. 2005 р., № 53 (53), с. 55 http://unian.net/files/products/_Toc115520394
	30	-4	УНІАН Київщина, 11 січ. 2006 р., № 01 (96), с. 7 http://unian.net/files/products/_Toc124763610

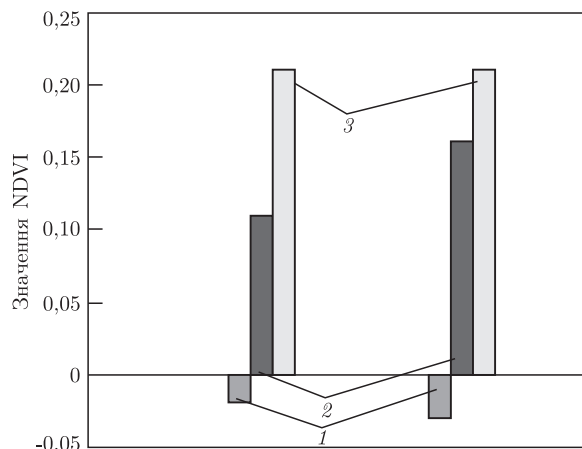


Рис. 2. Значення NDVI посівів озимих зернових культур, розраховані за даними знімків MODIS від 29 жовтня 2005 р.

Лівий блок гістограм відображає значення NDVI, розраховані за показниками середньої яскравості посівів, а правий — за показниками максимальної яскравості; 1 — прикатаний посів; 2 — сходи; 3 — кушніня

та Переяслав-Хмельницького районів Київської області. Класифікація його виконувалась за допомогою програми ERDAS Imagine методом найбільшої вірогідності. Для навчання використовувались дані польових спостережень за посівами Переяслав-Хмельницького, Кагарлицького та Миронівського районів Київської області, що знаходяться в межах космічного знімка. Для зіставлення космічних знімків MODIS та SPOT було виділено однакові фрагменти південної частини Київської області площею 1370 км² (рис. 3).

Аналіз результатів класифікації у межах виділених фрагментів свідчить, що за космознімками MODIS, використовуючи його перший та другий канали та відповідні методичні підходи, можна досить впевнено виділяти поля озимих зернових культур площею у кілька десятків гектарів, які є типовими для Київської області. Поля площею кілька квадратних кілометрів виділяються зі збереженням своєї форми. Підрахунки площ полів за двома класифікованими знімками показують, що за знімком MODIS площа полів визначається з відхиленням від даних SPOT, як правило, в межах 15–30% (табл. 2). Це, на нашу думку, пов'язане зі збільшенням у процентному відношенні змішаних пікселів, які при класифікації відносяться програмою до іншого класу.

Таблиця 2. Зіставлення площі різних класів при визначенні сходів озимих культур за класифікованими знімками MODIS та SPOT XI (у межах виділеного фрагмента)

N п/п	Класи зіставлення	Площа за класифікацією знімків MODIS (S_{modis}), га	Площа за класифікацією знімка SPOT XI (S_{spot}), га	Співвідношення S_{modis}/S_{spot}	Різниця визначеної площі за знімками MODIS у порівнянні зі SPOT XI, %
1	Водна поверхня	13800	15846	0,871	-13
2	Ліси та кущі	14124	17938	0,787	-21
3	Озимий ріпак	2384	2364	1,009	+1
4	Озимі зернові, сходи	9524	11561	0,824	-18
5	Озимі зернові, кушніня	3092	2368	1,306	+31
6	Озимі зернові (два класи разом)	12616	13928	0,906	-9

Таким чином, проведені експерименти показали, що в цілому за осінніми знімками MODIS можна досить надійно виділяти сходи посівів озимих зернових культур для подальшого аналізу динаміки зміни їх спектральних особливостей при прогнозуванні врожайності. Загальна площа полів при цьому визначається з похибкою в межах 15–30% у порівнянні зі знімком високої розрізненості SPOT XI та в межах 4–7% у порівнянні з даними відкритих інформаційних джерел. Але місцезоналення посівів площею кілька десятків гектарів виділяється майже із 100% надійністю. Розроблені методичні підходи можна застосувати для визначення площі та стану посівів озимих культур на всій території України.

1. *Lindsey R., Herring D.* MODIS Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer // NASA Goddard Space Flight Center. – 2002. – 24 p.
2. *Кравцова В. И., Уваров И. А.* Гиперспектральная система MODIS для глобального мониторинга Земли // Информ. бюл. ГИС. Ассоциация. – 2001. – № 2(29) – 3(30). – С. 39–41.
3. *Doraiswamy P. C., Hatfield J. L., Jackson T. J. et al.* Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS // Remote Sensing of Environment. – 2004. – **92**, No 4. – P. 548–559.
4. *Hanuschak G., Delincé J.* Utilization of Remotely Sensed Data and Geographic Information Systems (GIS) for Agricultural Statistics in the United States and the European Union // MEXSAI Third Intern. Conf. on Agricultural Stat. (ICAS III) – Novem. 2–4, 2004.
5. *Барталев С. А., Бурцев М. А., Ершов Д. В., Ефремов В. Ю., Ильин В. В., Лупян Е. А., Мазуров А. А., Мельник Н. Н., Нейштадт И. А., Полищук А. А., Столапов А. В., Прошин А. А., Темников В. А., Флитман Е. В.* Система автоматизированного сбора, обработки и распространения спутниковых данных для мониторинга сельскохозяйственных земель // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сб. науч. ст. Т. 1. – Москва: GRANP polygraph, 2005. – С. 140–148.
6. *Спивак Л. Ф., Архипкин О. П., Нургалиев С. Г., Шагарова Л. В.* Дистанционная оценка площадей зерновых в Казахстане по данным гиперспектрального радиометра MODIS // Исследование Земли из Космоса. – 2003. – № 2. – С. 80–84.
7. *Муратова Н. Р., Терехов А. Г.* Спутниковые вегетационные индексы в задаче прогноза урожайности зерновых культур Северного Казахстана // Сб. тез. Третьей всеросс. открытой конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса” Москва, ИКИ РАН, 14–17 нояб. 2005 г. – <http://smis.iki.rssi.ru/theses/cgi/thesis.pl?id=320>.
8. *Исмамова Х. Р.* Роль данных дистанционного зондирования при создании цифровых карт землепользования в Азербайджане // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сб. науч. ст. Т. 2. – Москва: GRANP polygraph, 2005. – С. 273–279.
9. *Лялько В. И., Сахацкий А. И., Ходоровский А. Я. и др.* Возможности прогнозирования урожайности зерновых культур на основе совместного использования многозональных космических снимков AVHRR, NOAA и “Landsat TM” (на примере Киевской области) // Косм. наука і технологія. – 2002. – **8**, № 2/3. – С. 249–255.
10. *Лялько В. И., Сахацкий А. И., Жолобак Г. М. и др.* Опыт комплексирования многозональных снимков NOAA/AVHRR и “Landsat – 7” для прогноза урожайности озимой пшеницы (на примере районов Киевской области) // Там же. – 2003. – **9**, № 4. – С. 99–103.
11. *Lyalko V. I., Sakhatsky A. I., Hodorovsky A. Ya., Zholobak G. M., Vujanova I. Ja.* The experience of application of NOAA/AVHRR and Landsat – 7 data for cereal crop yield forecasting // Geoinformation for European wide integration. – Rotterdam: Millpress. – 2003. – P. 567–572.

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України, Київ

Надійшло до редакції 05.10.2006