

с последующей релаксацией напряжений. Выполненные GPS наблюдения подтверждают сделанные ранее выводы о преимущественно термальном механизме инициации деформирования ледового покрова Байкала. Для полевых измерений использовались спутниковые геодезические приемники HiPer Topcon и Trimble R3.

В целом, оценки перемещений – дрейфа ледового покрова, интерферометрическими методами хорошо согласуются с данными подспутниковых GPS измерений. Сравнение наземных наблюдений со спутниковыми данными показало, что активные деформационные процессы происходят не только на границах крупных блокоразделов ледового покрова оз. Байкал, но и во всем его объеме, вследствие внутривблоковой фрагментации ледовых пластин, находящихся в сложном напряженном состоянии.

#### Библиографические ссылки

1. Ледовый покров озера Байкал как модельная среда для изучения тектонических процессов в земной коре / Н. Л. Добрецов, С. Г. Псахье, В. В. Ружич [и др.] // ДАН. 2007. Т. 412, № 5. С. 656–660.
2. Деформации и сейсмические явления в ледяном покрове озера Байкал / В. В. Ружич, С. Г. Псахье, Е. Н. Черных [и др.] // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 3. С. 289–299.
3. Результаты исследований динамики ледового покрова озера Байкал методами спутниковой радиолокации ALOS PALSAR и GPS-навигации / И. И. Кир-

бижекова, Т. Н. Чимитдоржиев, Ц. А. Тубанов [и др.] // Вестник БНЦ СО РАН. 2012. № 1 (5). С. 42–59.

4. Использование данных PALSAR при выполнении геодинимического мониторинга нефтегазовых месторождений / А. В. Евтюшкин, А. В. Филатов, Ю. В. Васильев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 2. С. 122–128.

5. Использование данных радиолокационной интерферометрии ALOS PALSAR и георадарного зондирования для исследования криогенных деформаций грунтов / Т. Н. Чимитдоржиев, В. Б. Хаптанов, А. И. Захаров [и др.] // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 4. С. 172–181.

#### References

1. Dobretsov N. L., Psakhie S. G., Rugich V. V. [etc.] DAN, 2007, Vol. 412, no. 5, pp. 656–660.
2. Rugich V. V., Psakhie S. G., Shernikh E. N. [etc.] Geologiya i geophysika. 2009, Vol. 50, no. 3, pp. 289–299.
3. Kirbizhekova I. I., Chimitdorzhiev T. N., Tubanov T. A. [etc.]. Vestnik BNS SO RAN, 2012, no. 1 (5), pp. 42–59.
4. Evtuchkin A. V., Philatov A. V., Vasilev U. V. [etc.] Sovremennye problemi distanzhinnogo zondirovania Zemli iz kosmosa. 2010, Vol. 7, no. 2, pp. 122–128.
5. Chimitdorzhiev T. N., Naptanov V. B., Zakharov A. I. [etc.] Gurnal radioelectroniki. 2010, no. 4, pp. 172–181.

© Чимитдоржиев Т. Н., Гатьков Г. И., Тубанов Ц. А., Дагуров П. Н., Захаров А. И., Кирбижекова И. И., Дмитриев А. В., Быков М. Е., 2013

УДК 528.85

### МОНИТОРИНГ АГРАРНЫХ РЕСУРСОВ ПО РАЗНОВРЕМЕННЫМ ДАННЫМ ERS-2\SAR\*

А. В. Евтюшкин<sup>1</sup>, В. М. Брыксин<sup>1</sup>, Н. В. Рычкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Балтийский федеральный университет имени И. Канта  
Россия, 236041, Калининград, ул. А. Невского, 14. E-mail: AYEvtuyushkin@kantiana.ru

<sup>2</sup>Барнаульский юридический институт  
Россия, 656038, Барнаул, ул. Чкалова, 49. E-mail: polkovnik@buiimvd.ru

*Показаны особенности распознавания видового состава зерновых культур при анализе многовременных радарных изображений ERS-2. Архитектура растений и проективное покрытие почвы существенно отличаются для различных культур, как в период активного роста, так и во время увядания листьев, что повышает возможность разделения культур на радарных снимках. Для устранения погрешностей динамического моделирования продуктивности культур предлагается выполнять коррекцию листового индекса по спутниковым данным.*

*Ключевые слова: ERS-2, SAR, радар, MODIS, посевы культур, LAI, EPIC.*

\* Работа выполняется при частичной финансовой поддержке РФФИ по гранту 13-07-00419.

## MONITORING OF AGRICULTURAL RESOURCES ON MULTITEMPORAL ERS-2/SAR

A. V. Yevtyushkin<sup>1</sup>, V. M. Bryksin<sup>1</sup>, N. V. Rychkova<sup>2</sup><sup>1</sup>Baltic Federal University named after I. Kant  
14 Nevskiy st., Kaliningrad, 236041, Russia. E-mail: AYEvytyushkin@kantiana.ru<sup>2</sup>Barnaul Institute of Law  
49 Chkalov st., Barnaul, 656038, Russia. E-mail: polkovnik@buimvd.ru

*The features of the recognition of the species composition of crops in the analysis of multi-temporal radar images ERS-2. Architecture of plants and projective covering of the soil significantly differ for various crops, both during active growth, and during withering of leaves that raises possibility of division of types of crops on radar images. To correct the errors of the dynamic modeling crop productivity it is offered to undertake correction of leaf area index according to satellite data.*

*Keywords: ERS-2, SAR, radar, MODIS, crop, LAI, EPIC.*

Разработка методов применения оптических и радарных данных ДЗЗ для мониторинга состояния аграрных ресурсов в период вегетации, использования этих данных для коррекции имитационной модели биопроductивности является актуальной проблемой [1–5]. Необходимо разработать высокоточную методику оценки по радарным изображениям листового индекса (LAI) пропашных культур, самовосстанавливающихся степных агроценозов и мелколесий на заброшенных землях. Достаточно изучена связь листового индекса с коэффициентом обратного рассеяния радаров для лесных территорий [6]. Однако, для полей с зерновыми культурами с небольшим проективным покрытием значительный вклад в обратное радарное рассеяние вносит неоднородность механического состава, влажности и диэлектрической проницаемости верхнего слоя почвы [4; 7].

Оценка по всепогодным радарным изображениям листового индекса LAI в границах пропашных полей также позволит выполнять прогнозирование урожайности зерновых культур на основе модели биопроductивности EPIC [5]. Листовой индекс, оцененный по спутниковым данным, необходим для корректировки расчетов листового индекса по математической модели, накапливающей погрешности вследствие недостоверных данных по агрофизическим свойствам почвы и ежедневным метеоданным. Для растительных покровов диапазон LAI, может изменяться от менее 1 для пустынь, до 8 для дождевых тропических лесов.

В модели EPIC потенциальное ежедневное изменение в сухой биомассе зависит от листового индекса (LAI) и солнечной радиации (RA):

$$dB_p = 0,0005 \cdot BE \cdot RA \cdot (1 - e^{-0,65 \cdot LAI}),$$

где BE – коэффициент преобразования энергии к биомассе.

Ежедневное приращение листового индекса (dLAI) ограничивается коэффициентом стресса (Reg), который определяется как минимальная величина из водного, температурного или азотного стресса:

$$dLAI = dLAI_T(LAImx, LAI, HU) \cdot Reg,$$

где dLAI<sub>T</sub> – теоретическая функция приращения исходя из максимально возможного листового индекса

(LAI<sub>max</sub>), текущего индекса (LAI) и накопленной суммы температур за период роста (HU).

Листовой индекс LAI рассчитывается как функция суммы эффективных температур, стрессов и стадий развития культуры. От появления до начала увядания листьев, LAI оценивается по формуле

$$LAI_j = LAI_{j-1} + dLAI,$$

где j – день прогноза; j–1 – предыдущий день.

Урожайность зерна (YLD) рассчитывается пропорционально итоговой биомассе наземной части:

$$YLD = HI \cdot \max(BIOM),$$

где HI – индекс урожайности, определяемый экспериментально.

Возможно наземное подспутниковое инструментальное измерение и спутниковая оценка индекса LAI [5]. Наиболее достоверным считается алгоритм MOD15 для обработки данных радиометра MODIS. В нем предлагается кусочно-линейная зависимость LAI от NDVI. Индекс NDVI рассчитывается по алгоритму MOD13.

При прогнозировании урожайности выполняются ежедневные расчеты биопроductивности зерновых культур по модифицированной методике EPIC с корректировкой расчетных значений листового индекса на основе спутниковой оценки вегетационного и листового индексов [5]. Периодичность коррекции должна составлять не менее двух раз с учетом разреженной облачности на период до начала спада листового индекса связанного с естественным увяданием листового покрова зерновых культур. На основании расчетов по модели прогнозируются биологическая урожайность культур и оптимальные сроки начала уборки в разрезе районов или субъекта федерации.

В 2005–2007 гг. в период с мая по октябрь Европейским космическим агентством (ESA) планировалась витки ERS-2 для съемки сельскохозяйственной зоны Западной Сибири для обеспечения проекта Cat-1 ID-3158. В 2008 и 2010 гг. ESA проводило миссии по кросс-интерферометрической тандемной съемке Земли на основе ERS-2\ SAR и ENVISAT\ ASAR. При тандемной съемке спутники сканируют одну и ту же территорию земной поверхности с интервалом в 30 мин, что позволяет исключить временную декорреляцию

и строить точные ЦМР. Во время этой миссии увеличивалось число повторных пролетов ERS-2 на зерносеющие регионы Западной Сибири и юга европейской части России. За 2005–11 гг. накоплен архив из 76 тыс. кадров ERS-2/SAR на территорию России с числом повторных съемок на отдельные территории 40–50. Данные ERS-2/SAR и MODIS принимались Центре ДЗЗ ЮНИИИТ на антенные комплексы ОПТЭКС и ТНА-9 на всю зону радиовидимости. Переобработка накопленных архивных данных ERS-2/SAR и MODIS за 2005–2010 гг. позволит разработать методику оценки LAI зерновых культур по калиброванным радарным данным аналогично модели STEP [7].

Многовременной мониторинг развития посевов зерновых культур требует разработку методов проведения синхронных подспутниковых измерений биометрических параметров в течение быстропротекающих фенологических периодов развития посевов с учетом разрешающей способности спутниковых сенсоров, наземных спектрофотометров, измерителей листового индекса, метеоусловий на момент съемки. В связи с разнообразием агроклиматического потенциала зерносеющих регионов и обширностью сельскохозяйственных угодий становится актуальной задача разработки методов мониторинга и прогнозирования урожайности зерновых культур с использованием данных метеорологических и радарных спутников с учетом агрофизических особенностей почв и развития растений.

Полевые наблюдения зерновых культур для дешифрирования данных ERS-2 с точной геопривязкой проводились в 2006–2010 гг. на полях Кулундинской опытной станции и опытных полях АНИИСХ СО РАСХН [8]. Цветовой RGB синтез из амплитудных кадров ERS-2/SAR, выполненных в июне, июле и августе на одну и ту же территорию позволяет визуально разделять следующие культуры: подсолнечник, пшеница, кукуруза, просо. Не разделяются пшеница и овес, что связано с совпадением фенофаз развития культур. При включении в цветовой синтез снимков за май и сентябрь, достоверно выделяются паровые поля, стерня и естественная нераспаханная степь, используемая под пастбище. Снимки за октябрь позволяют контролировать осеннюю вспашку почвы и ход уборки подсолнечника, убираемого по агротехнике возделывания культуры в Западной Сибири при наступлении заморозков с целью повышения масличности. Локально выпавшие на сухую почву осадки при сильном ветре вносят искажение в снимки ERS-2 в виде светлых полос. Сильнее этот эффект проявляется на засоленных почвах и наблюдался на убранных полях с минимальным проективным покрытием и однородной структурой шероховатостей на всей площади полей в 2005–2008 гг. на осенних снимках ERS-2 в регионах Восточного Зауралья, Северного Казахстана и Степного Алтая

Цветосинтезированные изображения MODIS с разрешением 250 м и ERS-2/SAR за разные даты съемки отображают многообразие фенофаз развития зерновых культур в различных агроклиматических зонах

юга Западной Сибири. Различия связаны с различными сроками сева, неравномерностью выпадения осадков по территории в летние месяцы, плодородием почвы, соблюдения агротехники и севооборотов, засоренностью полей. Достоверно выделяются группы полей засеянных одной культурой и паровые поля. Разновременные данные всепогодного космического радара ERS-2/SAR среднего разрешения позволяют определить видовой состав культур с точностью до поля в дождливые годы с большим числом облачных дней. Для различных агроклиматических зон требуется привлечение информации с тестовых полей и экспертных оценок по размещению возделываемых культур.

Применение модифицированной динамической модели биологической продуктивности растений EPIC в сочетании с космическими снимками позволяют достоверно оценивать урожайность основных зерновых культур на региональном уровне. Технология предполагает использование архивных оптических и радарных космоснимков за предыдущие годы для определения в различных агроклиматических зонах региона тестовых полей достаточной площади и конфигурации для расчета на период вегетации зерновых культур в текущий год вегетационного и листового индексов. Перспективно развитие данной технологии с использованием радаров SENTINEL-1A/B, с периодичностью обзора 12 сут для одного спутника и 6 суток при двух спутниках.

Данные ERS-2 получены по проекту ESA Cat-1 ID 3158 «Agricultural applications of remote sensing in West Siberia».

#### Библиографические ссылки

1. Bouman B. A. M., Uenk D. Crop classification possibilities with radar in ERS-1 and JERS-1 configuration // *Remote Sensing of Environment*. 1992. Vol. 40, iss. 1. P. 1–13.
2. Blaes X., Vanhalle L., Defourny P. Efficiency of crop identification based on optical and SAR image time series // *Remote Sensing of Environment*. 2005ю Vol. 96. Issue 3–4, pp. 352–365.
3. Ulaby F., Allen C., Eger G., Kanemasu E. Relating the microwave backscattering coefficient to leaf area index // *Remote Sensing of Environment*. 1984, V.14, iss. 1–3. P. 113–133.
4. An Agroecological Modeling Approach to Explain ERS SAR Radar Backscatter of Agricultural Crops / B. A. M. Bouman, D. W. G. van Kraalingen, W. Stol, H. J. C. van Leeuwen // *Remote Sensing of Environment*. 1999. Vol. 67, iss. 2. P. 137–146.
5. Брыксин В. М., Евтюшкин А. В., Рычкова Н. В. Прогнозирование урожайности зерновых культур на основе данных дистанционного зондирования и моделирования биопродуктивности // *Известия Алтай. гос. ун-та*. 2010. № 1/2 (65). С. 89–93.
6. Boreal forest LAI retrieval using both optical and microwave data of ENVISAT / T. Manninen, P. Stenberg, M. Rautiainen // *Proc. of the IGARSS'05 Symp*. 2005. Vol. 7. P. 5033–5036.

7. Evolutionary bi-objective optimization of a semi-arid vegetation dynamics model with NDVI and  $\sigma^0$  satellite data / S. Mangiarotti, P. Mazzega, L. Jarlan // Remote Sensing of Environment. 2008. Vol. 112, iss. 4. P. 1365–1380.

8. Мониторинг зерновых культур на юге Западной Сибири по данным MODIS и ERS-2 / В. М. Брыксин, А. В. Евтюшкин, Г. А. Кочергин, Н. В. Рычкова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4, № 2. С. 183–188.

### References

1. Bouman B. A. M., Uenk D. Crop classification possibilities with radar in ERS-1 and JERS-1 configuration. Remote Sensing of Environment. 1992, vol. 40, Issue 1, pp. 1–13.

2. Blaes X., Vanhalle L., Defourny P. Efficiency of crop identification based on optical and SAR image time series. Remote Sensing of Environment. 2005, vol. 96, Issue 3–4, pp. 352–365.

3. Ulaby F., Allen C., Eger G., Kanemasu E. Relating the microwave backscattering coefficient to leaf area in-

dex. Remote Sensing of Environment. 1984, vol. 14, Issue 1–3, pp. 113–133.

4. B. A. M. Bouman, D. W. G. van Kraalingen, W. Stol and H. J. C. van Leeuwen. An Agroecological Modeling Approach to Explain ERS SAR Radar Backscatter of Agricultural Crops. Remote Sensing of Environment. 1999, Vol. 67, Issue 2, pp. 137–146.

5. Bryksin V. M., Yevtyushkin A. V., Rychkova N. V. Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta. 2010, no. 1/2(65), pp. 89–93.

6. Manninen T., Stenberg P., Rautiainen M., Smolander H., Voipio P., Ahola H. Boreal forest LAI retrieval using both optical and microwave data of ENVISAT. Proceedings IGARSS'05 Symposium. Florence, Italy. 2005, Vol. 7, pp. 5033–5036.

7. Mangiarotti S., Mazzega P., Jarlan L., Mougin E., Baup F., Demarty J. Evolutionary bi-objective optimization of a semi-arid vegetation dynamics model with NDVI and  $\sigma^0$  satellite data. Remote Sensing of Environment. 2008, V.112. Issue 4, pp.1365–1380.

8. Bryksin V. M., Yevtyushkin A. V., Kochergin G. A., Rychkova N. V. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2007, Vol. 4, no. 2, pp. 183–188.

© Евтюшкин А. В., Брыксин В. М., Рычкова Н. В., 2013

УДК 004

## БАЗОВЫЕ ПРОДУКТЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

М. А. Гусев<sup>1</sup>, П. В. Денисов<sup>1</sup>, И. И. Кирбижекова<sup>2</sup>, А. В. Дмитриев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научный центр оперативного мониторинга Земли ОАО «Российские космические системы»  
Россия, 127490, Москва, ул. Декабристов, 51/25. E-mail: gusev\_ma@ntsomz.ru

<sup>2</sup>Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8. E-mail: kirbizhekova@bk.ru

*Представлены результаты работ по созданию в НЦ ОМЗ ОАО «Российские космические системы» Банка базовых продуктов ДЗЗ в части радиолокационной информации. Приведены примеры продуктов, технологический цикл создания которых реализован в 2012 г. Представлены планы по дальнейшему развитию технологий.*

*Ключевые слова: банк базовых продуктов, дистанционное зондирование, потоковая обработка данных, РСА.*

## EARTH OBSERVATION ON SAR-DATA BASIC PRODUCTS

M. A. Gusev<sup>1</sup>, P. V. Denisov<sup>1</sup>, I. I. Kirbizhekova<sup>2</sup>, A. V. Dmitriev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research Center for Earth Operative Monitoring of JSC “Russian Space Systems”  
51/25 Dekabristov st., Moscow, 127490, Russia. E-mail: gusev\_ma@ntsomz.ru

<sup>2</sup>Institute of Physical Material Science of Russian academy of Science, Siberian Branch  
8 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: kirbizhekova@bk.ru

*This article presents the results of work on the creation of the data bank of basic products on SAR-data in Research Center for Earth Operative Monitoring of JSC “Russian Space Systems”. The article contains examples of products with technological cycle of production implemented in 2012, and plans for the further development of technologies.*

*Keywords: Basic products, data bank, remote sensing, stream processing, SAR.*