

Технология создания и применения базовых продуктов спутниковой радиолокации*

А. В. ДМИТРИЕВ¹, Т. Н. ЧИМИТДОРЖИЕВ¹, И. И. КИРБИЖЕКОВА¹,
П. Н. ДАГУРОВ¹, А. В. БАЗАРОВ¹, А. М. ГАРМАЕВ²,
К. С. ЕМЕЛЬЯНОВ³, М. А. ГУСЕВ³

¹Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Россия

²Бурятский филиал ФГУП “Рослесинфорг”, Улан-Удэ, Россия

³Научный центр оперативного мониторинга Земли

ОАО “Российские космические системы”, Москва, Россия

e-mail: ¹scidir@ipms.bscnet.ru, ²kingartur@mail.ru, ³gusev_ma@ntsomz.ru

Дмитриев А.В., Чимитдоржиев Т.Н., Кирбижекова И.И., Дагуров П.Н., Базаров А.В., Гармаев А.М., Емельянов К.С., Гусев М.А. Технология создания и применения базовых продуктов спутниковой радиолокации // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19, № 3. С. 5–13.

Анализируются технологии обработки данных зондирования земной поверхности радиолокаторами с синтезированной апертурой. Показана необходимость создания базовых продуктов радиолокации межведомственного использования. Представлены результаты использования композитных радиолокационных изображений для целей лесного хозяйства.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, базовые продукты радиолокации, автоматизированная система.

Dmitriev A.V., Chimitdorzhiev T.N., Kirbizhekova I.I., Dagurov P.N., Bazarov A.V., Garmaev A.M., Emelyanov K.S., Gusev M.A. Technologies for design and application of the spaceborne imaging radar basic products // Computational Technologies. 2014. Vol. 19, No. 3. P. 5–13.

Earth sensing by synthetic aperture radar (SAR) currently has made significant progress in addressing both scientific and applied problems in various sectors of the national economy. However, widespread deployment and use of radar techniques by departmental experts is hampered due to a lack of necessary skills for processing and interpretation of radar images. To solve this problem, we developed a technology for automated processing, formation and maintenance of the basic products for remote sensing that can be used by various agencies. The implementation was carried out in the framework of the Russian Federal Space Program for 2006–2015. Some aspects of automated design and verification technology for radar basic products (RBP) are presented in the article. Analysis of foreign and domestic publications showed that the most important way to determine the current state for land coverage and their monitoring relies on technologies, which use multi-temporal, multi-frequency and polarimetric composite images. In particular, classification of RBP primary images into seven classes was made based on the experience of using radar data. The basic steps needed to create a RBP are described and specialized software written on C++ programming

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 13-08-01132 А).

language are implemented. The results of RBP investigation and verification based on the data from ALOS PALSAR, Radarsat-2, Cosmo-SkyMed SAR (L-, C- and X-bands respectively) for three test forest territories in the Republic of Buryatia are presented. The implemented specialized software does not have such a rich palette of tools for georeferencing as in ENVI software or polarimetric processing as in PolSARPro software, but it enables automated processing of radar data with incomplete polarization which is useful for RBP consumers in streaming mode. Easy visual interpretation of RBP allows to make application area wider for the various ministries and departments, as well as for scientific and educational purposes.

Keywords: remote sensing, radar basic products, the automated system.

Введение

В настоящее время всё больший интерес вызывает микроволновое зондирование земной поверхности с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) [1–4]. Это обусловлено возможностью получения информации об объектах независимо от условий освещённости и наличия облачного покрова. Однако обработка и интерпретация радиолокационных изображений, полученных РСА, представляют собой достаточно сложный процесс, осуществляемый специалистами с соответствующей подготовкой, что значительно затрудняет использование данных радиолокационного зондирования земли ведомственными специалистами, например, работниками сельского и лесного хозяйства. Для преодоления сложившейся ситуации в рамках реализации Федеральной космической программы на период 2006–2015 гг. проводится разработка технологий формирования и ведения банка базовых продуктов (Банка БП) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) межведомственного использования [5]. Основная задача нового сервиса — обеспечение российских потребителей информационными продуктами ДЗЗ — решается путём автоматизированного потокового создания, хранения и распространения базовых продуктов. Базовые продукты предназначены для решения тематических задач природно-ресурсного и экологического мониторинга в ведомственных и региональных информационно-аналитических центрах. В качестве исходной информации для создания БП используются данные оптического диапазона и радиолокационного зондирования.

В настоящей работе рассматриваются некоторые аспекты технологии автоматизированного создания и верификации БП на основе радиолокационной информации.

1. Базовые продукты радиолокации

Базовые продукты радиолокации (БПР) дистанционного зондирования Земли межведомственного использования представляют собой результат потоковой обработки первичной космической информации, являющейся общей основой для многоцелевой тематической интерпретации в интересах решения задач ведомственных и региональных потребителей. Базовые продукты занимают промежуточное место в цепочке между первичными данными ДЗЗ и тематическим продуктом обработки, проводимой экспертами предметной области применения космической информации. Номенклатура БПР на сегодня отвечает следующим направлениям целевого применения — сельское и лесное хозяйство, морская среда, чрезвычайные ситуации, экология. Отработка технологий

проводится с использованием данных следующих зарубежных радиолокационных систем ДЗЗ: ENVISAT, RADASAT-1/2, ALOS PALSAR, COSMO-SkyMed [2].

Так как значительная часть процедуры анализа и дешифрирования космических снимков, в том числе и радиолокационных, выполняется потребителями визуально, то основные БПП представляются в виде комбинированных (композитных) псевдоцветовых RGB-изображений (RGB: красный+зелёный+синий), которые формируются по аналогии с общеизвестными программными продуктами, например такими, как ENVI-SARscape, PolSARpro, Erdas Imagine RADAR, PHOTOMOD Radar и др. [1, 6].

На данный момент с учётом накопленного опыта обработки данных космических радаров реализованы следующие типы базовых продуктов:

1. *Композиты, характеризующие состояние подстилающей поверхности*, формируются на основе данных одного и того же РСА, но с разной поляризацией регистрируемого сигнала [7–9]. Состав каналов таких изображений может принимать значения:

- a) R — изображение, полученное на согласованной HH -поляризации;
G — изображение, полученное на HV -поляризации;
B — синтезированное изображение $\arctg(HV/HH)$;
- b) R — синтезированное изображение $(HH - HV)/(HH + HV)$;
G — изображение, полученное на HV -поляризации;
B — изображение, полученное на согласованной HH -поляризации;
- c) R — изображение, полученное на согласованной HH -поляризации;
G — изображение, полученное на HV -поляризации;
B — синтезированное изображение $(HH - HV)$.

2. *Композиты, характеризующие произошедшие изменения подстилающей поверхности* [10–14] в составе

- a) R — изображение за последнюю дату;
G — квадрат отношения амплитуды изображения за предпоследнюю дату к амплитуде изображения за последнюю дату;
B — изображение за предпоследнюю дату.
- b) R — изображение за первую дату;
G — изображение за вторую дату;
B — изображение за третью дату.

3. *Композитные изображения сликсов (плёночных загрязнений) на водной поверхности* представляются в следующих видах: RGB-изображения с выделенными контрастным цветом сликсами на водной поверхности или бинарное изображение-маска, в которой сликсам соответствуют максимальные, а окружающему фону — минимальные значения яркости пикселей [1, 3, 7].

4. *Композитные RGB-изображения подтоплений* [1, 7] в составе:

- R, G — изображения за последнюю дату,
B — изображение за предпоследнюю дату.

5. *Оценочное распределение биомассы в виде композитных индексированных изображений* формируется путём расчёта поляриметрической когерентности между двумя изображениями, полученными одним и тем же РСА, но с разной поляризацией регистрируемого сигнала [15, 16].

6. *Композитные индексированные изображения шероховатости земной поверхности и сомкнутости лесного полога* формируются путём расчёта энтропии методом Клода — Потье для двух изображений, полученных одним и тем же РСА, но с разной поляризацией регистрируемого сигнала [17–20]. Метод декомпозиции Клода — Потье ос-

нован на статистиках второго порядка, что освобождает его от необходимости априорного предположения о характере и параметрах распределения объектов рассеяния, отражения и поглощения. Предполагается, что для каждой ячейки существует доминирующий усреднённый механизм рассеяния, который может быть описан тремя параметрами: 1) средний угловой параметр α , который соответствует физическому механизму рассеяния — поверхностному (α близко к 0°), объёмному (α близко к 45°) и двукратному (α близко к 90°); 2) энтропия H — мера упорядоченности и шероховатости поверхности, часто интерпретируемая совместно с третьим параметром — анизотропией; 3) анизотропия A — характеристика соотношения и распределения недоминирующих механизмов рассеяния.

7. Композитные индексированные изображения типов подстилающей поверхности на основе доминирующего механизма рассеяния формируются путём расчёта параметра α для двух изображений, полученных одним и тем же РСА, но с разной поляризацией регистрируемого сигнала [1, 3, 4, 7].

2. Описание автоматизированной системы создания базового продукта радиолокации

Базовые продукты радиолокации создаются в автоматизированном потоковом режиме с помощью специализированного программного обеспечения (СПО). Специализированное программное обеспечение автоматизированного создания БПР (СПО АС БПР) представляет собой набор программных модулей, каждый из которых выполняет свою конкретную задачу. Модули спроектированы и реализованы как автономные консольные приложения для операционных систем семейства Microsoft Windows. Основными этапами, необходимыми для создания БПР, являются:

- импорт исходных радиолокационных изображений;
- фильтрация для устранения спекл-шумов;
- создание конкретного продукта;
- геокодирование;
- экспорт в стандартный вид.

Специализированное программное обеспечение реализовано на языке программирования C++ [21] и к данному моменту содержит более 20 тыс. строк исходного кода. При разработке использованы свободно распространяемые библиотеки обработки спутниковых изображений Orfeo-Toolbox [22] (создаваемые под эгидой Французского космического агентства) и набор также свободно распространяемых библиотек обработки геопространственных данных OSGEO4W [23].

Модуль импорта радиолокационных данных во внутренний формат СПО поддерживает форматы данных следующих радаров с синтезированной апертурой (РСА):

- ASAR/Envisat — ASA_IMS_1P (ASAR Image Single-look Complex (high-resolution)), ASA_APS_1P (ASAR Alternating Polarisation Mode complex image);
- Radarsat-1 — SAR CEOS;
- Radarsat-2 — SLC (все режимы), SGF, SGX;
- PALSAR/ALOS — FBS (одна поляризация), FBD (согласованная и кросс-поляризация), PLR (полностью поляриметрический режим);
- Cosmo-SkyMed уровня обработки SCS (Single-look Complex Slant).

Создание базовых продуктов в СПО АС БПР и программных средах ENVI и PolSARpro

Продукты и процедуры	СПО АС БПР	ENVI	PolSARpro
Автоматизация процесса в потоковом режиме	+	—	—
Интенсивность радарного эхо-сигнала	+	+	+
Расчёт энтропии H	+	—	+
Расчёт параметра α	+	—	+
Расчёт когерентности	+	+	+
Создание RGB-композиций	+	+	+
Геопривязка изображений	+	+	—
Коррекция геопривязки	—	+	—
Коррекция с учётом рельефа	—	+	—
Создание мозаик	—	+	—

Для сравнения возможностей СПО с существующими программными продуктами в каждом из них были сформированы несколько видов БПР. Результаты сравнения представлены в таблице.

Наиболее богатый набор инструментов работы со спутниковыми поляриметрическими данными даёт PolSARpro, но в этой программной среде отсутствуют модули по географической привязке. В среде ENVI наиболее полно представлены инструменты по географической привязке, геометрической коррекции, составлению мозаик, но отсутствует возможность работы с радиолокационными данными с неполной поляризацией. СПО АС БПР позволяет создавать географически привязанные базовые продукты радиолокации в автоматизированном режиме.

3. Верификация БПР на примере тестовых лесничеств Республики Бурятия

В 2012–2013 гг. для анализа возможностей использования базовых продуктов радиолокации была выполнена их верификация. В качестве пилотного региона выбрана Республика Бурятия. Для трёх тестовых лесничеств — Куналейского, Мухоршибирского и Иволгинского районов — были подобраны следующие спутниковые радиолокационные и мультиспектральные данные среднего и высокого разрешения:

- мультиспектральные оптические данные SPOT5 с разрешением 10 м и панхроматическое изображение (595 нм) с разрешением 2.5 м, полученные 2 сентября 2011 г.;
- радарные полнополяриметрические (HH , HV , VH , VV) данные ALOS PALSAR в L -диапазоне с разрешением 30 м, полученные 25 мая 2006 г.;
- радарные данные Radarsat-2 двойной поляризации (HH , HV) в C -диапазоне с разрешением 10 м, полученные в сентябре 2012 и в августе 2013 г.;
- радиолокационные данные Cosmo-SkyMed в X -диапазоне на кросс-поляризации с разрешением 5 м, полученные в августе 2013 г.

На основе спутниковой информации создан картографический материал и проведена проверка применимости и эффективности БПР для классификации и картирования леса по породному составу, плотности древостоя и другим параметрам [24, 25].

Радиоволны дециметрового L -диапазона обладают большой проникающей способностью, благодаря которой можно изучать скелетную структуру лесного полога (стволы,

крупные ветви и т.п.). При этом радарный сигнал проникает вплоть до почвенного покрова. С уменьшением длины волны (C - и X -диапазоны) проникающая способность радиоволн снижается. При средней сомкнутости 0.6 для лесов Республики Бурятия сигнал может достигать нижней границы лесного полога, но для плотных сомкнутых лесных массивов (Иволгинский район) глубина проникновения не превышает 5 м (в C -диапазоне). Таким образом, радиолокационные изображения сантиметрового диапазона для неплотных лесных массивов могут характеризовать общую биомассу растительности, главным образом мелкие структурные элементы (ветви второго порядка, крону, мелкие ветви, веточки, листву, иглы, шишки и т.п.), но для густых лесных массивов наблюдается эффект “насыщения”.

Исследование перспектив использования радарных данных ALOS PALSAR, Radarsat-2, Cosmo-SkyMed показало, что значительная часть поляриметрических и текстурных характеристик может быть маркерами лесной и безлесной среды, однако в L -диапазоне большинство из них сильно коррелирует с гористым рельефом местности и зависят от геометрии съёмки. В силу меньшей проникающей способности радиоволн сантиметрового диапазона в C - и X -диапазонах отражённый сигнал менее зависит от рельефа и корреляция слабее. Наиболее перспективным для оценки распределения биомассы является использование отношения интенсивностей на согласованной и кросс-поляризациях или когерентности кросс- и согласованного каналов поляризации и их пространственного распределения (текстуры соответствующих изображений).

На эффективность применения БПР в C - и X -диапазонах большое влияние оказывает время проведения съёмки. В отличие от оптического диапазона спутниковая радиолокация в сантиметровом диапазоне более эффективна в зимние малоснежные сезоны, поскольку в летнее время пик вегетативной деятельности вызывает высокий фоновый “шум” на радиолокационных изображениях, что затрудняет отождествление и классификацию лесных массивов.

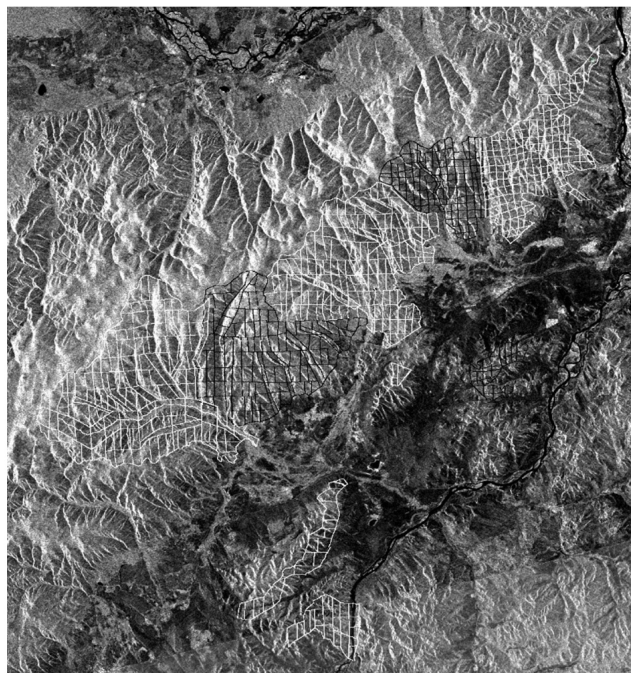


Рис. 1. Интенсивность в канале HH , 29 августа 2013 г. Иволгинский район Республики Бурятия

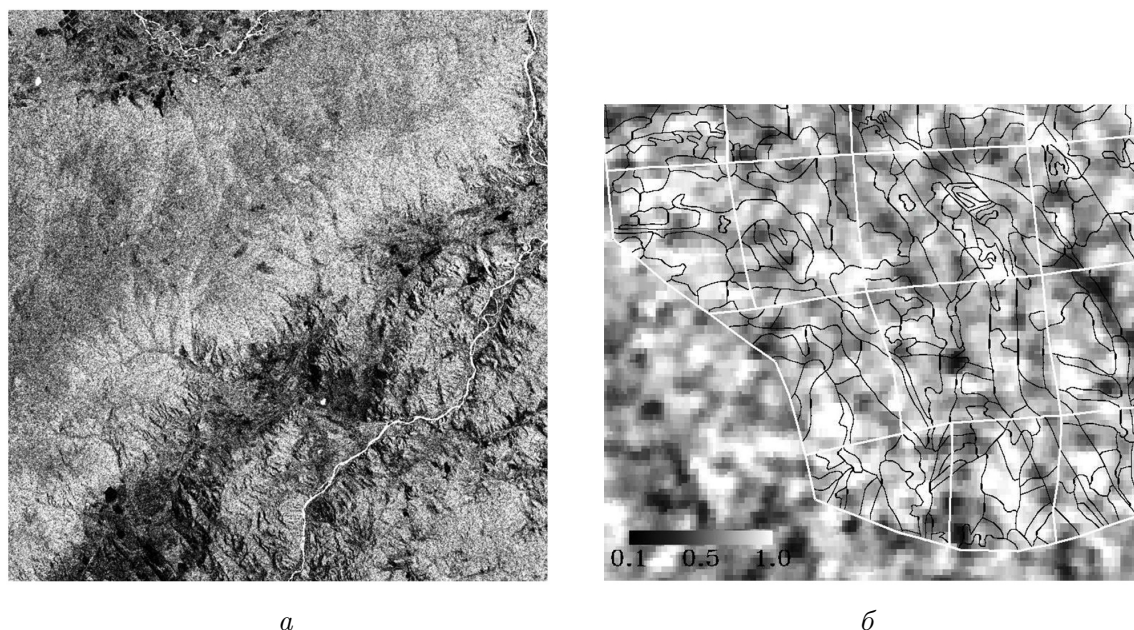


Рис. 2. Примеры БПР по Иволгинскому лесничеству Республики Бурятия: *a* — параметр α , *б* — фрагмент изображения энтропии с сеткой лесных кварталов и выделов на основе радиолокационных данных Radarsat-2 29 сентября 2013 г.

На рис. 1 приведено исходное изображение интенсивности радиолокационного эхосигнала PCA Radarsat-2 с поляризацией HH , полученное 29 августа 2013 г. Видно, что лесные массивы имеют более высокую яркость по сравнению с таковой ровных участков. Неровность/шероховатость отдельных участков почвы или присутствие плотного травяного покрова и кустарников, свойственных концу августа, вызвали радиолокационный отклик, сравнимый по интенсивности с отражением от лесной среды, и создали повышенный фоновый “шум”, затрудняющий идентификацию лесных массивов. RGB-композиции, использующие интенсивность каналов HH , HV , а также их комбинации в виде суммы, разности и отношения, позволяют уверенно классифицировать по цветовым отличиям такие объекты, как водная поверхность, сельскохозяйственные поля и угодья, лесные массивы, населённые пункты.

На рис. 2 представлены примеры БПР, полученные на основе расчёта параметров α и H , которые демонстрируют сезонное отсутствие корреляции с рельефом местности и в некоторой степени представляют распределение и плотность вегетации по исследуемой территории.

Заключение

Разработанное специализированное программное обеспечение АС БПР позволяет в потоковом режиме создавать информационные продукты, отражающие текущее состояние и динамику изменения земных покровов. Показано, что наиболее перспективными являются технологии обработки радиолокационного изображения, использующие разновременные, многочастотные и поляриметрические композиты. На основе последних предложены конкретные типы базовых радиолокационных продуктов, представляющих собой композитные псевдоцветовые, индексированные или заданные в другой форме

изображения, характеризующие относительное изменение состояния природных объектов и процессов в пространстве и времени. Получены следующие виды БПР: композиты, отражающие состояние подстилающей поверхности и её изменение во времени, и композиты, отражающие состояние водной поверхности. Данные базовые продукты спутниковой радиолокации и технология визуальной трактовки предназначены для потребителей, не знакомых со специальными методами и технологиями радиолокационного землеобзора. Можно полагать, что простота визуальной интерпретации базовых продуктов позволит найти им применение как в мониторинге земных покровов в интересах различных министерств и ведомств, так и в научных и образовательных целях.

Список литературы

- [1] АРМАНД Н.А., ЗАХАРОВ А.И., ЗАХАРОВА Л.Н. Космические радары с синтезированной апертурой в дистанционном зондировании Земли — современные системы и перспективные проекты // Исследование Земли из космоса. 2010. № 2. С. 3–13.
- [2] РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ системы космического базирования / Под ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 676 с.
- [3] НЕРОНСКИЙ Л.Б. Перспективы развития методов и систем радиолокационного наблюдения космического базирования // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 11.
<http://jre.cplire.ru/jre/nov11/14/text.pdf>
- [4] ЗАХАРОВА Л.Н., ЗАХАРОВ А.И., СОРОЧИНСКИЙ М.В. и др. Совместный анализ данных оптических и радиолокационных сенсоров: Возможности, ограничения и перспективы // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56, № 1. С. 5–19.
- [5] ГУСЕВ М.А., ДЕНИСОВ П.В., КИРБИЖЕКОВА И.И., ДМИТРИЕВ А.В. Базовые продукты ДЗЗ на основе радиолокационных данных // Вестник СибГАУ. 2013. № 5(51). С. 82–85.
- [6] ПРОГРАММНЫЙ комплекс ENVI. Уч. пособие. М.: Совозонд, 2013. 315 с.
- [7] RICHARDS J.A. Remote Sensing with Imaging Radar. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 361 p.
- [8] MASSONNET D., SOUYRIS J.-C. Imaging with Synthetic Aperture Radar. EPFL Press, 2008. 277 p.
- [9] CLOUDE S.R., PAPATHANASSIOU K.P. Polarimetric SAR interferometry // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1998. Vol. 36, No. 5. P. 1551–1565.
- [10] BOMBRUN L., GAY M., TROUVE E. ET AL. DEM error retrieval by analyzing time series of differential interferograms // IEEE Geoscience and Remote Sensing Lett. 2009. Vol. 6, No. 4. P. 830–834.
- [11] FERRETTI A., SAVIO G., BARZAGHI R. ET AL. Sub-millimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2007. Vol. 45, No. 5. P. 1142–1153.
- [12] SANDWELL D.T., MYER D., MELLORS R. ET AL. Accuracy and resolution of ALOS interferometry: Vector deformation maps of the father's day intrusion at Kilauea // Ibid. 2008. Vol. 46, No. 11. P. 3524–3534.
- [13] ЧИМИТДОРЖИЕВ Т.Н., ДАГУРОВ П.Н., ЗАХАРОВ А.И. и др. Оценка сезонных деформаций болотистых почв методами радарной интерферометрии и геодезического нивелирования // Криосфера Земли. 2013. Т. 17, № 1. С. 80–87.

- [14] SHORTA N., BRISCO B., COUTURE N. A comparison of TerraSAR-X, RADARSAT-2 and ALOS-PALSAR interferometry for monitoring permafrost environments, case study from Herschel Island, Canada // *Remote Sensing of Environment*. 2011. Vol. 115, No. 12. P. 3491–3506.
- [15] КИРБИЖЕКОВА И.И., ЧИМИТДОРЖИЕВ Т.Н., ГАРМАЕВ А.М., ГУСЕВ М.А. Применение радиолокационных данных для картографии биомассы лесной растительности в условиях сложного рельефа // *Изв. вузов. Физика*. 2013. Т. 56, № 8/2. С. 201–203.
- [16] GARESTIER F., LE TOAN T. Forest modelling for height inversion using single baseline InSAR/Pol-InSAR Data // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*. 2010. Vol. 48, No. 3, pt 2. P. 1528–1539.
- [17] HOOPER A., SEGALL P., ZEBKER H. Persistent scatterer InSAR for crustal deformation analysis, with application to Volcan Alcedo, Galapagos // *J. of Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. B07407.
- [18] ROSEN P.A., HENSLEY S., JOUGHIN I.R. ET. AL. Synthetic aperture radar interferometry // *Proc. of the IEEE*. 2000. Vol. 88, No. 3. P. 333–382.
- [19] МИХАЙЛОВ В.О., НАЗАРЯН А.Н., СМИРНОВ В.Б. и др. Совместная интерпретация данных дифференциальной спутниковой интерферометрии и GPS на примере Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 г. // *Физика Земли*. 2010. № 2. С. 3–16.
- [20] ЭПОВ М.И., МИРОНОВ В.Л., ЧИМИТДОРЖИЕВ Т.Н. и др. Наблюдение просадок поверхности земли в районе подземных угольных выработок Кузбасса по данным радиолокационной интерферометрии ALOS PALSAR // *Исследование Земли из космоса*. 2012. № 4. С. 26–29.
- [21] СТРАУСТРУП Б. Язык программирования C++. М.: Бином, 2011. 1136 с.
- [22] ИНТЕРНЕТ-ресурс: <http://orfeo-toolbox.org/otb/>
- [23] ИНТЕРНЕТ-ресурс: <http://trac.osgeo.org/osgeo4w/>
- [24] ЧИМИТДОРЖИЕВ Т.Н., КИРБИЖЕКОВА И.И., ГАРМАЕВ А.М. и др. Использование БП ДЗЗ для решения задач лесоустройства на примере Республики Бурятия // *Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: Докл. V Всероссийской конф., посвященной памяти выдающихся учёных-лесоводов В.И. Сухих и Г.Н. Коровина*. М.: ЦЭПЛ РАН, 2013. С. 228–232.
- [25] КИРБИЖЕКОВА И.И., ЧИМИТДОРЖИЕВ Т.Н., ГАРМАЕВ А.М., ГУСЕВ М.А. Картография лесных ресурсов Республики Бурятия на основе поляриметрических данных ALOS PALSAR и мультиспектральных данных SPOT5 // *ИНТЕРЭСКПО ГЕО-Сибирь*. 2013. Т. 4, № 1. С. 129–133.

Поступила в редакцию 21 марта 2014 г.