

Н. А. Гилева, В. И. Мельникова, Я. Б. Радзиминович, Ц. А. Тубанов // Современная геодинамика Центральной Азии : материалы Всерос. совещания. 2012. Т. 2. С. 22–25.

#### References

1. Budaev R. Ts., Tatkov G. I., Kolomiets V. L. Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN, 2012, vol. 14, № 1 (8), pp. 2036–2039.
2. Zamaraev S. M. et al. Sootnoshenie drevnei i kainozoiskoi struktur v Baikal'skoi riftovoi zone (The ratio

of the ancient and Cenozoic structures in the Baikal rift zone). Novosibirsk, Nauka, 1979. 126 p.

3. Geologicheskaja karta SSSR. List N-49-XXV (Geological map of the USSR. Sheet N-49-XXV). The explanatory note. Compiler V.I. Davydov. M., 1983. 95 p.

4. Gileva N. A., Melnikova V. I., Radziminovich Ja. B., Tubanov Ts. A. Materialy Vserossiiskogo soveshanija «Sovremennaja geodinamika Central'noi Azii...» (Proceedings of All-Russia. Meeting "Modern geodynamics of Central Asia ..."). 2012, vol. 2, pp. 22–25.

© Тубанов Ц. А., Гатьков Г. И., Чимитдоржиев Т. Н., 2013

УДК 537.871.5 530.1:528.871.6

### КОМБИНИРОВАНИЕ МЕТОДОВ СПУТНИКОВОЙ РАДИОЛОКАЦИИ И СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕСНЫХ РЕСУРСОВ РЕСПУБЛИКИ БУРЯТИЯ\*

Т. Н. Чимитдоржиев<sup>1</sup>, А. М. Гармаев<sup>2</sup>, И. И. Кирбижекова<sup>1</sup>,  
К. С. Емельянов<sup>3</sup>, М. А. Гусев<sup>3</sup>, А. В. Базаров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: tchimit@ipms.bsnet.ru

<sup>2</sup>Бурятский филиал ФГУП «Рослесинфорг»  
Россия, 670034, Улан-Удэ, ул. Тобольская, 63. E-mail: kingartur@mail.ru

<sup>3</sup>НЦ ОМЗ ОАО «Российские космические системы»  
Россия, 127490, г. Москва, ул. Декабристов, 51/25. E-mail: gusev\_ma@ntsomz.ru

*На базе двух тестовых лесничеств Республики Бурятия разработана методика комбинирования мультиспектральных и радиолокационных данных высокого разрешения для картографирования лесов.*

*Ключевые слова: дистанционное зондирование, радарная поляриметрия, мультиспектральный анализ, картография лесов.*

### COMBINATION OF METHODS OF SATELLITE RADAR AND SPECTRAL ANALYSIS FOR RESEARCH OF FOREST RESOURCES OF REPUBLIC OF BURYATIA

T. N. Chimitdorzhiev<sup>1</sup>, A. M. Garmaev<sup>2</sup>, I. I. Kirbizhekova<sup>1</sup>,  
K. S. Emelyanov<sup>3</sup>, M. A. Gusev<sup>3</sup>, A. V. Bazarov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Physics Materials Science of Russian academy of Sciences, Siberian Branch  
6 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: tchimit@ipms.bsnet.ru

<sup>2</sup>Buryat Branch of the Federal State Unitary Enterprise "Roslesinform"  
63 Tobolskaya st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: kingartur@mail.ru

<sup>3</sup>Earth Operative Monitoring of JSC "Russian Space Systems"  
51/25 Decabristov st., Moscow, 127490, Russia. E-mail: gusev\_ma@ntsomz.ru

*On the basis of two test forestry of Republic of Buryatia it was developed a technique combining high-resolution multispectral and radar data for forests mapping.*

*Keywords: remote sensing, radar polarimetry, multispectral analysis, forests mapping.*

\* Исследования выполнены при поддержке ОКР «Архив – ИФМ-12» и ОКР «Архив-Рослесинфорг – 2012».

В настоящее время для эффективного решения самого широкого круга задач в сфере лесного хозяйства необходима достоверная информация о распределении, состоянии и динамике лесных ресурсов. Для инвентаризации лесного фонда, планирования развития лесного хозяйства и использования лесных ресурсов необходимы лесные карты [1]. В 2010 г. в России инициирована Государственная программа инвентаризации лесов ГИЛ на основе внедрения современных методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Использование космических снимков позволяет оперативно обновлять картографические материалы различных масштабов и значительно сократить стоимость обновления. В настоящее время в ДЗЗ возрастает роль аэрокосмических информационных технологий, основанных на применении радиоволновых систем [2; 3].

В 2012 ИФМ СО РАН, Бурятский филиал ФГУП «Рослесинфорг» и ИЦ ОМЗ ОАО «Российские космические системы» провели совместные работы по созданию и верификации базовых продуктов ДЗЗ межведомственного использования. В том числе, решалась задача разработки методики комплексирования оптических мультиспектральных и радиолокационных данных дистанционного зондирования в целях картографирования лесов. Верификация данной методики производилась с использованием наземных данных. В данной статье приведены некоторые результаты упомянутых работ.

**Характеристика лесов Республики Бурятия.** Республика Бурятия расположена в центре Азиатского континента. Практически на всей территории преобладают сильно расчлененные горы, равнинные поверхности встречаются лишь в тектонических впадинах и долинах крупных рек. Площадь гор более чем в 4 раза превышает площадь, занимаемую низменностями. Для РБ характерна значительная приподнятость над уровнем моря от 456 до 3 491 м. Площадь земель, на которых расположены леса, по состоянию на 1 января 2012 г. составляет 29 638,11 тыс. га. Общая площадь лесов на землях лесного фонда 27 010,40 тыс. га, в том числе: защитных – 34,4 %, эксплуатационных – 33,9 %, резервных лесов – 31,5 %. Фонд лесовосстановления насчитывает 1,5 % от общей площади. В фонде лесовосстановления наибольшую площадь занимают гари – 64,3 %, вырубки – 23,8 %, пустыри и прогалины – 9,7 %, погибшие древостои – 2,1 %. В организационном плане лесной фонд РБ разделен на 37 лесничеств и 88 участков лесничеств. Расчетная лесосека (ежегодный допустимый объем изъятия древесины) по всем категориям рубок (ликвидная древесина) составляет 10 203,0 тыс. м<sup>3</sup>, фактическое использование – 25,5 %.

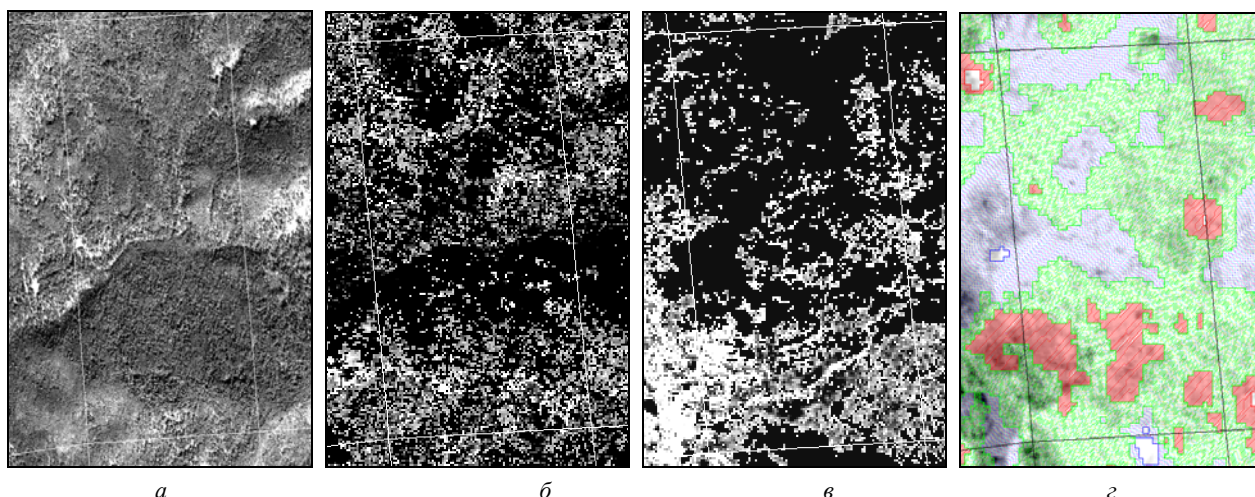
Согласно данным таксации по тестовым лесничествам (Мухоршибирскому и Куналейскому) породный состав отдельных участков леса варьируется от чисто лиственных березово-осиновых (Б-Ос) до хвойных, сосново-лиственничных (С-Лц). В основном на территории РБ произрастают смешанные леса с преобладанием одной из пород: сосны, лиственницы,

березы, осины. Кедр, пихта и др. обычно составляют не более 40 % или отсутствуют. Полнота изменяется от 0,15 до 1. Запасы древесины – от 20 до 330 м<sup>3</sup>/га.

**Распределение лесов по породному составу на основе мультиспектральных данных.** Для классификации лесных массивов Мухоршибирского и Куналейского лесничеств были привлечены мультиспектральные и панхроматические снимки с разрешением 10 и 2,5 м, полученных с французского спутника SPOT5 в сентябре 2011 г. На рисунке представлен фрагмент панхроматического изображения для квартала 151 Мухоршибирского лесничества. Наиболее эффективные методы классификации отбирались по совокупности критериев: сходимость процесса кластеризации, контроль совпадения границ лесных кварталов и выделов с границами полученных кластеров, соответствие данным таксации отдельных лесных кварталов и панхроматическому снимку. При классификации использовались от 2 до 30 итераций. Наиболее эффективным оказалось комбинирование неконтролируемых методов с привлечением элементов спектрального анализа. Первоначально по каждому снимку было выделено 25 кластеров, но затем произведено слияние 2–3-х групп кластеров близких по спектральным характеристикам, так что общее количество уменьшилось до 13–15 для разных территорий.

В дополнение к классификационной карте методом субпиксельного спектрального анализа были составлены карты распределения некоторых пород лесной растительности. Метод линейного смешивания предполагает, что спектральный профиль каждого пикселя мультиспектрального изображения формируется за счет суммирования вкладов нескольких объектов пропорционально своему присутствию на земной поверхности. Метод очень чувствителен к набору эталонных спектров отдельных компонент. Основной критерий при составлении такого комплекса малые значения ошибок rms. Результаты оказались чувствительны к методу трансформации изображений при геопривязке. Меньше всего искажений привносит метод «ближайшего соседа». Каждая порода или вид определялся по нескольким компонентам: древесине, коре, листьям, шишкам, иголкам. распределение сосны и березы-осины по кварталу 151 представлено на рисунке (б, в). Яркость пикселей пропорциональна вкладу каждой породы в общий спектр.

Проверка результатов классификации осуществлена в два этапа – во время обработки снимков посредством сверки с данными таксации и завершающая проверка проведена в полевых условиях совместно представителями Бурятского филиала ФГУП «Рослесинфорг», ИФМ СО РАН, лесничеств и арендаторов в сентябре – октябре 2012 г. В результате проверки установлены две характерные для оптического диапазона ошибки: при многоярусной структуре лесного полога на полученной карте отобразился только верхний ярус, а 4–5-летние гари, поросшие густым молодняком, классифицировались как полноценные участки леса.



Панхроматическое изображение SPOT5 (а); распределение сосны по данным SPOT5 (б); распределение березы/осины (в); биомасса по данным ALOS PALSAR (более плотная штриховка соответствует большей биомассе) (г) для 151-го квартала Мухоршибирского лесничества

#### Оценка биомассы по радиолокационным данным.

Радиоволны сантиметрового и дециметрового диапазона обладают большой проникающей способностью, благодаря которой можно изучать скелетную структуру лесного полога (стволы, крупные ветви и т. п.) [4, 5]. При недостаточно густом лесном покрове (для лесов РБ средняя сомкнутость 0,6) радарный сигнал проникает вплоть до почвенного покрова. Исследование перспектив использования спутниковой радиолокационной информации на примере радарных данных L-диапазона ALOS PALSAR 2006–2010 гг. и C-диапазона Radarsat-2 2012 г. показало, что большинство поляриметрических характеристик могут служить индикаторами лесной и нелесной территорий, но многие из них коррелируют с гористым рельефом местности и зависят от геометрии радиолокации.

В результате качественного анализа выделены поляриметрические характеристики, мало зависящие от топографии, такие как радарный вегетационный индекс, поляризационное отношение, отношение интенсивностей радарного отражения на кросс и согласованной поляризации. Все они в определенной степени зависят от «плотности» рассеивающей среды или биомассы лесной растительности и были применены для предварительной оценки распределения биомассы, запасов древесины и уточнения классификационных карт, полученных на основе оптических данных. На рисунке (г) представлено распределение биомассы лесной растительности, полученное на основе данных ALOS PALSAR. Больше биомассе соответствует более густая штриховка.

Очевидно, что для определения точных количественных биометрических показателей лесной среды необходимы фундаментальные исследования закономерностей процессов отражения и рассеяния радиолокационного сигнала в сложных условиях гористой местности.

На примере Куналейского и Мухоршибирского лесничеств Республики Бурятия разработана, верифицирована и апробирована методика комплексирова-

ния оптических мультиспектральных и радиолокационных данных ДЗЗ высокого разрешения для картирования леса. Отобраны наиболее эффективные для решения поставленных задач методы обработки данных ДЗЗ; определена структура картографической продукции, которую можно получить при использовании радиолокационных и мультиспектральных данных. Для тестовых лесничеств составлены карты топографических особенностей местностей, лесных и нелесных территорий, оценочного распределения запасов древесины и биомассы, классификационные карты кластеров в соответствии со спектральными характеристиками и карты распределения хвойного и лиственного леса.

#### Библиографические ссылки

1. Сухих В. И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве : учебник. Йошкар-Ола : МарГТУ. 2005.
2. О возможностях совместной обработки радиолокационных изображений L-диапазона и спектральных снимков оптического диапазона для классификации лесных массивов / Н. А. Арманд, Т. Н. Чимитдоржиев, В. В. Ефременко [и др.] // Радиотехника и Электроника. 1998. Т. 43, № 9. С. 1070–1075.
3. Бондур В. Г., Чимитдоржиев Т. Н. Дистанционное зондирование растительности оптико-микроволновыми методами // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 6. С. 64–73.
4. Кирбижекова И. И., Батуева Е. В., Дарижапов Д. Д. Поляриметрические свойства природных объектов на радарных изображениях Байкальского региона // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 10. С. 85–94.
5. Чимитдоржиев Т. Н., Архинчиев В. Е., Дмитриев А. В. Поляриметрическая оценка пространственных флуктуаций радарных изображений для восстановления структуры лесного полога // Исследование Земли из космоса. 2007. № 5. С. 80–82.

## References

1. Sukhikh V. I. Aerokosmicheskie metody v lesnom khozystve I landshaftnom stroitelstve (Aerospace methods in forestry and landscape construction). Yoshkar-Ola, MarGTU, 2005, 392 p.
2. Armand N. A., Chimitdorzhiev T. N., Efremenko V. V. [etc.] Radiotekhnika I Elektronika. 1998, vol. 43, no. 9, pp. 1070–1075.
3. Bondur V. G., Chimitdorzhiev T. N. Izvestia visschih uchebnykh zavedeniy. Geodeziya I aerofotos'emka. 2008, no. 6, pp. 64–73.
4. Kirbizhekova I. I., Batueva E. V., Darizhapov D. D. Journal Radioelektroniki. 2010, no. 10, pp. 85–94.
5. Chimitdorzhiev T. N., Arkhincheev V. V., Dmitriev A. V. Isledovaniya zemli iz kosmosa. 2007, no. 5, pp. 80–82.

© Чимитдоржиев Т. Н., Гармаев А. М., Кирбижекова И. И., Емельянов К. С., Гусев М. А., Базаров А. В., 2013

УДК 537.871.5 530.1:528.871.6

## КАРТИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ ЛЕСНЫХ СРЕД НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ РАДАРНЫХ ДАННЫХ ПО БАЙКАЛЬСКОМУ РЕГИОНУ\*

И. И. Кирбижекова, Е. В. Батуева

Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук  
670047, Россия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: kirbizhekova@bk.ru

*Для исследования состояния и мониторинга динамики лесных сред актуально развитие и применение методов радарной поляриметрии. Проведен статистический анализ сезонных изменений объемной компоненты разложения Клода-Поттье по Улан-Удэ и его окрестностям на основе данных ALOS PALSAR 2007–2009 гг. Результаты могут быть использованы для картирования лесных массивов.*

*Ключевые слова: радарная поляриметрия, декомпозиционные методы, лесная среда.*

## MAPPING AND MONITORING OF FOREST ENVIRONMENTS ON THE BASIS OF POLARIMETRIC RADAR DATA ON BAIKAL REGION

I. I. Kirbizhekova, E. V. Batueva

Institute of Physical Materials Science of Russian Academy of Science, Siberian Branch  
6 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: kirbizhekova@bk.ru

*For study and monitoring of the state and changes of forest environment it is actual to develop and apply radar polarimetry. We performed a statistical analysis of seasonal changes in the volume components of the Claude-Pottier decomposition for the city Ulan-Ude and its surroundings on the basis of ALOS PALSAR 2007–2009. Results can be used for forest mapping.*

*Keywords: radar polarimetry, decomposition methods, forest medium.*

Благодаря уникальной проникающей способности электромагнитных волн сантиметрового и дециметрового диапазона радиолокационные методы обладают определенными преимуществами и возможностями исследования физических свойств и состояния объектов исследования [1]. При отражении и рассеянии радиолокационных волн происходит преобразование их поляризации в зависимости от физических свойств среды, таких как диэлектрическая проницаемость, проводимость, температура, влажность и т. п., а также от геометрических свойств рельефа, шероховатости поверхности и др. [2; 3]. Базовые аспекты теории и поляриметрические

методы решения многочисленных прикладных задач хорошо известны. В настоящее время наиболее распространены методы классификации природных и искусственных объектов основанные на поляриметрической декомпозиции разделяющей объекты по типам механизмов рассеяния [4–6]. Декомпозиция методом Клода-Поттье и визуальное сравнение разносезонных изображений ALOS PALSAR по территории дельта реки Селенга выявило значительные изменения процессов рассеяния по исследуемой территории, причем наиболее сильные изменения связаны с зимним периодом с отрицательными температурами [7].

\* Исследования выполнены при частичной поддержке гранта РФФИ 13-08-01132 «Создание системы дистанционного мониторинга состояния и изменений объектов биосферы на основе данных радарной поляриметрической интерферометрии».