

Исследование возможностей комплексного использования радиолокационной интерферометрии и поляриметрии TanDEM-X и субпиксельного анализа изображений Landsat-8 для оценки лесных ресурсов

И. И. КИРБИЖЕКОВА^{1,*}, Т. Н. ЧИМИТДОРЖИЕВ¹, Б. Б. ЛАВАРОВ², М. Е. БЫКОВ¹,
А. К. БАЛТУХАЕВ¹

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

²Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова, Улан-Удэ, Россия

*Контактный e-mail: kirbizhekova@bk.ru

Приведены результаты сравнительной оценки полевых геодезических измерений и дистанционных радарных интерферометрических расчетов средней высоты лесного полога по материалам съемки, выполненной с радиолокационного спутника TanDEM-X. Исследованы возможности поляриметрической декомпозиции данных TanDEM-X с двойной поляризацией в моно- и бистатическом вариантах радиолокации. Приведены результаты определения породного состава леса методами субпиксельного анализа на основе данных Landsat-8.

Ключевые слова: спутниковая радиолокация, дифференциальная интерферометрия, поляриметрическая декомпозиция, субпиксельный анализ, лесная картография, GPS-измерения.

Введение

В последние годы отмечается устойчивая тенденция по увеличению количества спутников, оборудованных радиолокационной аппаратурой, а также мульти- и гиперспектральными сенсорами оптического диапазона. Существующие методы обработки космической информации для исследования лесов предусматривают, как правило, независимый анализ изображений, полученных в разных диапазонах спектра. При этом практически не изучены вопросы комплексного использования многоспектральных оптических и микроволновых данных для контроля лесных ресурсов. В частности, для получения информации о лесной растительности в оптическом диапазоне созданы и совершенствуются эффективные методы классификации леса по различным таксационным параметрам [1–4]. Основой при этом служат различия отражательных свойств лесной среды в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра, совокупность прямых и косвенных дешифровочных признаков. Технологии классификации используют статистические методы, методы машинного зрения и распознавания образов, компьютерную графику и т. п. [5, 6]. Тем не менее остаются проблемы спектральной

неопределенности изображения леса, связанные с сезонными изменениями и локальными особенностями. Кроме того, спектр каждого пикселя изображения суммируется за счет вклада совокупности разнородных элементов на соответствующем участке земной поверхности.

Для решения данных проблем используется метод субпиксельного спектрального анализа [7, 8], а за рубежом есть примеры его практического применения для определения породного состава лесов на основе гиперспектральных данных. Для исследования объемной структуры лесной среды, в частности высоты и полноты древостоя, перспективны радиолокационные методы [9–11]. Так как проникающая способность радиоволн напрямую зависит от длины волны, для изучения структурных элементов леса разного размера лучше использовать волны определенных диапазонов. Для исследования крупных стволов и ветвей первого порядка наиболее эффективен Р-диапазон (длина волны порядка 80 см), для средних стволов и ветвей второго порядка — L-диапазон (25 см), для тонких ветвей — С-диапазон (5 см), для мелких веточек, шишек и пр. — Х-диапазон (3 см) [12]. В настоящее время радары с синтезированной апертурой (РСА) по точности уже не уступают оптическим системам и позволяют получать информацию с пространственным разрешением менее 1 м.

В данной статье на примере тестового участка леса Республики Бурятия обсуждаются возможности радиолокационной интерферометрии и поляриметрии Х-диапазона и методов субпиксельного анализа мультиспектральных оптических данных для оценки и классификации лесной растительности.

1. Описание территории исследования и спутниковых данных

Исследования проведены на территории тестового участка Байкало-Кударинского лесничества Кабанского района Республики Бурятия с координатами $52^{\circ}10'$ с.ш., $106^{\circ}48'$ в.д. Лесной массив расположен с восточной стороны от реки Селенга, на террасе речной долины с плавными формами рельефа, без резких и значительных перепадов высоты. В среднем вариации рельефа по исследуемой территории не превышают 20 м, локальные вариации высоты по лесным выделам составляют менее 5 м. Лесная растительность представлена преимущественно хвойными породами (сосной, елью, кедром), в меньшей степени лиственными (березой, осиной и др.). Для изучения возможностей картографирования лесной растительности радиолокационными интерферометрическими и поляриметрическими методами, а также методами субпиксельного анализа были использованы следующие данные:

- три интерферометрических пары данных TanDEM-X на горизонтальной согласованной поляризации (HH) за 18 февраля 2012 г., 25 и 29 мая 2013 г. с пространственным разрешением 5 м;
- три интерферометрических пары данных TanDEM-X на вертикальной согласованной и кроссполяризации (VV и VH) за 10, 11 декабря 2012 г. и 01 января 2013 г. с пространственным разрешением 15 м;
- мультиспектральные данные Landsat-8 за 31 августа 2013 г. с пространственным разрешением 15 м для панхроматического канала (0.50–0.68 мкм), 30 м для семи каналов видимого и инфракрасного диапазонов (от 0.433 до 2.300 мкм) и 100 м для двух каналов теплового диапазона (от 10.3 до 12.5 мкм).

2. Методы исследования

Основной целью исследований является анализ возможностей комплексного использования спутниковой радиолокационной и оптической информации для оценки таксационных параметров леса и обновления картографического материала. Для этого с 2012 г. совместными усилиями сотрудников ИФМ СО РАН, Бурятского филиала “Рослесинфорга” и НЦ ОМЗ ОАО “Российские космические системы” проводятся исследования по использованию оптико-микроволновой спутниковой информации для оценки таксационных параметров лесных ресурсов [13–16] в следующих направлениях:

- определение высоты древостоя, запасов древесины и наземной биомассы методами дифференциальной радарной интерферометрии;
- определение породного состава, сомкнутости, общей био- и фитомассы на основе поляриметрической декомпозиции, поляриметрических характеристик и их сезонных изменений;
- определение границ лесных выделов и кварталов, гарей, вырубок, распределения по породному составу методами текстурного, спектрального и субпиксельного анализа мультиспектральных изображений.

2.1. Радарная интерферометрическая оценка средней высоты лесного полога

Высота лесного полога может быть рассчитана как разница цифровой модели местности (ЦММ), включая лесную растительность, и цифровой модели рельефа (ЦМР). Первая строится по интерферометрическим данным TanDEM-X, указанным выше, а построение цифровой модели рельефа выполняется по интерферометрическим данным ALOS PALSAR. Технология радарной интерферометрии широко известна [17], а для данного случая подробно описана в работе [18]. При наличии лесной растительности вследствие низкой проникающей способности радиоволн X-диапазона отражение происходит от верхней границы лесной среды, в то время как для безлесных участков ЦММ не отличается от ЦМР. Это позволяет использовать рельеф безлесных участков в качестве основы для интерполяции и моделирования ЦМР участков лесной растительности. Точность построения зависит от количества, плотности и равномерности распределения опорных точек. Поскольку лесные массивы Байкальского региона не очень густые (средняя сомкнутость порядка 0.5–0.6), на соответствующих радиолокационных изображениях с высоким разрешением заметны даже небольшие по площади безлесные участки, что позволяет получить достаточное количество опорных точек для построения ЦМР с высокой степенью точности.

2.2. Поляриметрическая $H-A-\alpha$ -декомпозиция

При поляриметрическом режиме съемки основным источником информации являются данные изменения состояния поляризации радиолокационного сигнала [19]. Эти изменения связаны с физическими и геометрическими свойствами объектов исследования и описываются посредством комплексной матрицы рассеяния S второго порядка (матрицы Стокса). Амплитудные и фазовые компоненты элементов матрицы S характеризуют процесс рассеяния электромагнитной волны на исследуемых объектах и, следовательно, сами объекты. Интерпретация элементов матрицы рассеяния — достаточно сложный процесс, поэтому часто прибегают к различным методам декомпозиции или разложению матрицы на сумму взвешенных составляющих. При полной поляризации каждая из них характеризует отклик простого канонического объекта.

Таким образом, декомпозиционные методы позволяют упростить исследование сложного процесса рассеяния радарного сигнала до изучения более простых и физически интерпретируемых составляющих в соответствии с их “весом” в общем сигнале [20, 21].

Для протяженных источников каждый пиксель радиолокационного изображения РСА помимо основной информации содержит также шум, что проявляется на радарных изображениях как спекл (крапчатость). Процесс рассеяния сигнала для некогерентных источников описывается при помощи матриц когерентности $\langle T \rangle$ или их обобщения — матриц ковариантности $\langle C \rangle$, а методы декомпозиции базируются на собственных значениях и векторах этих матриц, а также параметрах, рассчитываемых на их основе. Наиболее распространенным из них является метод декомпозиции Клода — Поттье, позволяющий на основе трех параметров — энтропии H , анизотропии A и параметра α — дифференцировать поверхности рассеяния на 16 классов в соответствии с распределением основных составляющих процесса рассеяния.

Большинство РСА в настоящее время создается без возможности получения полной матрицы рассеяния, что обусловлено экономическими причинами, скоростью передачи данных и пр. В этом случае линейный передатчик радара излучает только с одной горизонтальной H или вертикальной V поляризацией и регистрирует две ортогональных компоненты отраженного сигнала ($HH+HV$ или $VH+VV$). Для данных с частичной поляризацией метод поляриметрической H - A - α -декомпозиции принимает формализованный характер, сохраняя общность подходов и методологии обработки. На основе данных TanDEM-X с двойной поляризацией в отличие от других поляриметрических РСА можно сгенерировать три варианта матриц когерентности: два моностатичных — для активного спутника TerraSAR и пассивного TanDEM и один бистатичный — по совокупности данных обоих спутников. Это увеличивает возможности поляриметрической декомпозиции для дифференциации объектов.

2.3. Субпиксельный анализ мультиспектральных данных

На основе метода линейного спектрального смешивания разработана методика территориального распределения леса по породному составу с оценкой процентного содержания на основе мультиспектральных данных. Метод спектрального смешивания — это технология, применяемая в отношении смешанных пикселей. При этом каждый пиксель охватывает больше одного типа поверхности, которые вносят свой вклад в общее значение коэффициента спектрального отражения. Если общая площадь поверхности может быть разделена пропорционально между различными материалами в пределах пикселя, то отраженное излучение будет передавать характеристики в той же пропорции [22, 23]. При большом числе слагаемых смешивание происходит линейным способом.

Линейная модель смешивания основана на предположении об отсутствии взаимодействия между материалами. И хотя при множественном рассеивании нескольких материалов их спектры смешиваются нелинейным способом (каскадное умножение), нелинейные методы в большинстве случаев приближенно могут быть заменены линейными [24–26].

Таким образом, метод спектрального смешивания теоретически позволяет определить долю каждого компонента в каждом пикселе изображения. На практике довольно часто наблюдаемые значения смешанных кривых спектрального отражения не соответствуют их теоретическим значениям. Подтверждение достоверности соответствия данных смешанных значений спектральной кривой ее теоретическому значению вы-

полняется методом наименьших квадратов, путем фиксации минимального значения разницы в сумме квадратов отклонения. В качестве теоретических спектров могут быть привлечены эталонные спектры “чистых” материалов из спектральных библиотек или спектры тестовых участков леса [27, 28].

3. Результаты исследования и их обсуждение

3.1. Результаты спутниковых и GPS-измерений высоты лесного полога

По тандемным парам радиолокационных изображений TerraSAR-X/TanDEM-X методами дифференциальной интерферометрии построены ЦММ с пространственным разрешением 15 м и рассчитаны высоты леса тестового участка. Точность ЦММ на основе тандемных данных составляет порядка 3 м по вертикали и 10 м по горизонтали. На рис. 1 приведен фрагмент карты ЦММ, являющейся основой для построения карты высоты леса.

Для контроля и оценки точности спутниковых измерений с 2013 г. на тестовых участках леса проводятся наземные GPS-измерения высоты деревьев и их положения. В 2013–2014 гг. измерения высоты деревьев производились лазерным электронным высотомером Нес-Naglof, а соответствующие позиционные измерения — навигатором Garmin-78. Точность определения высоты для них составляет ± 0.1 –1 и ± 3 м соответственно, точность по горизонтали для навигатора ± 10 м (до 100 м). Анализ совокупности наземных измерений по тестовым участкам смешанного леса показал расхождение

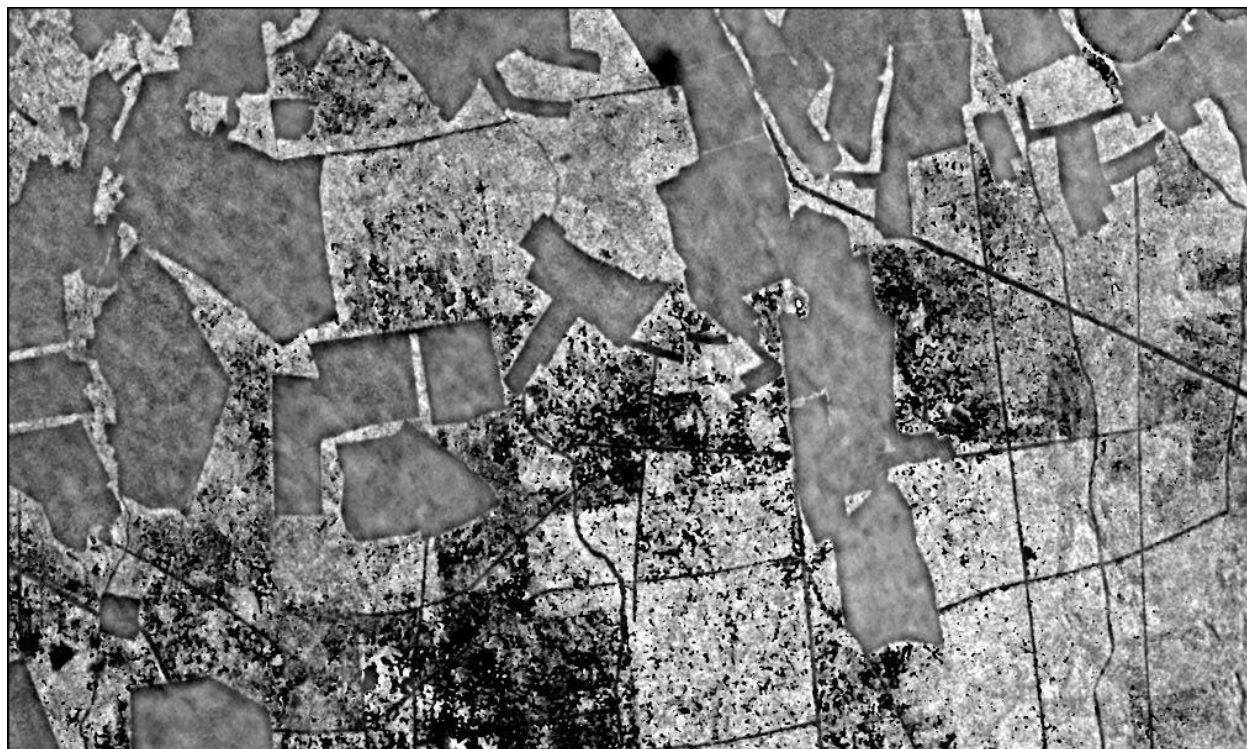


Рис. 1. Фрагмент ЦММ до фильтрации по данным TerraSAR-X/TanDEM-X от 25 мая 2013 г. Черным цветом отмечены неоднородные участки с низкой когерентностью и сильным “шумом” (спеклом)

спутниковых и наземных точечных измерений в среднем до 3–5 м. Наилучшая точность (1–3 м) соответствовала измерениям, полученным на кромке леса. А по мере продвижения вглубь смешанного леса точность подспутниковых измерений значительно снижается, вероятно, из-за флуктуаций радиоволн L-диапазона, используемых в GPS-приемниках, что привело к отбраковке до 90 % материала. Также возможной причиной указанных расхождений являются локальные вариации рельефа до 5 м для данного тестового участка.

В 2015 г. был выбран тестовый участок без существенных изменений рельефа, где с помощью электронного тахеометра и дифференциальных GPS-приемников выполнены геодезические и радарные интерферометрические измерения средней высоты хвойного леса. Точность определения — порядка нескольких сантиметров (1–2 см).

Результаты GPS-измерений средней высоты хвойного леса показали занижение высоты лесного полога по данным TanDEM-X на 1–2 м. При сравнении спутниковых и геодезических GPS-измерений положения и высоты деревьев в контрольных точках установлено, что даже с учетом стандартного прироста за двухлетний промежуток времени взрослых деревьев сосны и молодняка на 30 см и 1 м соответственно [29] ошибка не превышает 3 м. Можно предположить, что причиной расхождения спутниковых радиолокационных и наземных измерений высоты леса является различие методов измерений. Сомкнутость исследуемого леса достигает в среднем 0.6, что приводит к сильно изрезанной верхней границе с “провалами” вплоть до почвенного покрова. Спутниковые радиолокационные измерения дают информацию об “усредненной” высоте лесной среды по территории площадью в десятки и сотни квадратных метров, в то время как наземные измерения проводятся точно, для отдельных деревьев, возвышающихся над “усредненной” границей. Таким образом, для оценки высоты леса в обычном смысле необходимо дополнительно учитывать плотность древостоя, форму кроны деревьев, сезонность и другие факторы.

3.2. Результаты поляриметрической декомпозиции

На основе радиолокационных данных с двойной поляризацией проведена поляриметрическая декомпозиция и классификация методом Клода — Поттье в двух моностатических (для активного и пассивного спутников) и бистатическом (совокупность двух матриц рассеяния) вариантах. Для указанных вариантов выявлены различия распределения декомпозиционных параметров на двумерных диаграммах $H-A$, $H-\alpha$ и $A-\alpha$. В частности, в моностатическом случае параметры H и A оказались связанными функциональной зависимостью, в то время как различия между диаграммами для активного и пассивного спутников незначительны.

Классификация на основе классического формального зонирования поля параметров на области с высокой, средней и низкой энтропией, поверхностного, объемного и двукратного отражений в случае данных X-диапазона с двойной поляризацией не дала определенных результатов. Более эффективной оказалась классификация с учетом распределения Вишарда. В последнем случае на начальном этапе деление на зоны в поле параметров соответствует классическому варианту, а затем в ходе итерации границы смещаются к фактическим границам кластеров. При этом количество кластеров уменьшилось, сами кластеры соответствовали земным покровам разного типа, таких как лед, снег, поля, леса и др. На рис. 2 приведены результаты двумерной $H-\alpha$ и трехмерной $H-\alpha-A$ классификаций с учетом распределения Вишарда. Для лесного массива

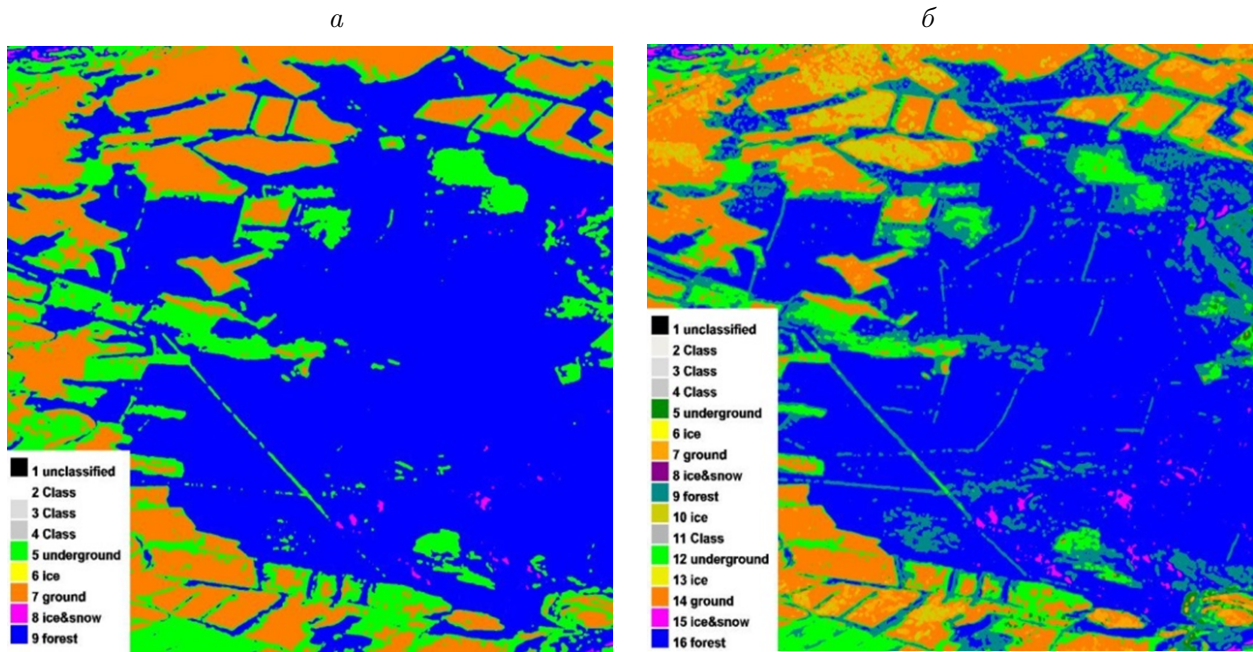


Рис. 2. Двумерная $H-\alpha$ (а) и трехмерная $H-\alpha-A$ (б) классификации с учетом распределения Вишарда по поляриметрическим данным пассивного спутника TanDEM-X от 10 декабря 2012 г. Серым цветом обозначены “пустые” классы с нулевым количеством пикселей. Размер окна обработки $w = 3 \times 3$

распределение по кластерам вызвано в основном различиями в плотности древостоя, возрасте и форме кроны соснового леса, а также локальными особенностями рельефа местности. Возможности данного метода для более детальной классификации лесных массивов представляются ограниченными, по крайней мере, на основе данных зимнего периода.

3.3. Результаты субпиксельного анализа

Основы методики оценки породного состава лесной растительности с помощью метода линейного спектрального смешивания были разработаны авторами ранее при обработке мультиспектральных снимков с высоким разрешением [15, 27]. Для тестового участка апробация методики территориального распределения лесной растительности по породному составу выполнена на основе мультиспектральных данных Landsat-8, полученных 31 августа 2013 г. с пространственным разрешением 30 м. В программе ENVI подобраны эталонные спектры различных пород, встречающихся на территории исследования, а также компонентов растительности с неотрицательным весом в спектре (суммарно не менее 3%). Сформирована библиотека спектров 43 компонентов для данного снимка и даты съемки, в частности, для сосны использованы 10 составляющих (спектры коры, древесины, шишек и т. д.). Проведена процедура спектрального “расслоения”. Созданы маски для отсеивания пикселей с недостоверными величинами весов и большими значениями ошибок. На рис. 3 проиллюстрированы основные этапы построения карты распределения отдельного спектрального компонента на примере коричневых сосновых шишек.

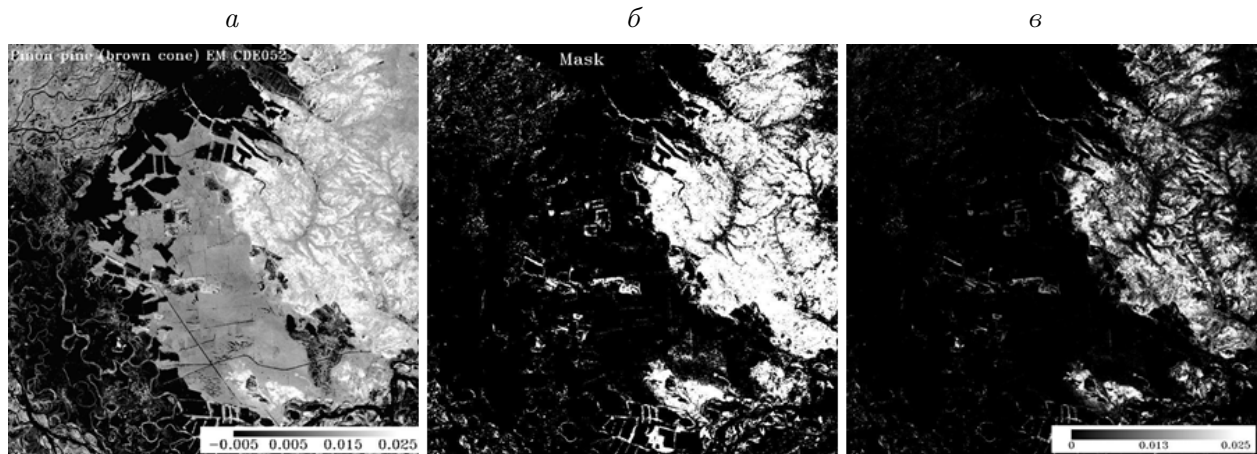


Рис. 3. Этапы создания карты распределения отдельного компонента спектрального разложения на примере коричневых сосновых шишек: *а* — распределение веса компонента после спектрального разложения; *б* — маска для отсеечения недостоверных весов; *в* — карта распределения веса спектрального компонента

Для исследуемой территории все компоненты спектрального разложения группируются в четыре класса: сосна, лиственница, мелколиственные (кустарники и дикоросы) и лиственные (береза, осина и пр.). Процентное содержание каждого класса рассчитано путем суммирования долей соответствующих компонентов: древесины, коры, листьев, шишек, иголок и т. п. Количество “ошибочных” пикселей на снимках Landsat-8 возросло по сравнению с аналогичными построениями, выполненными на основе данных с более высоким разрешением. Метод в определенной степени дает представление о соотношении основных пород, но для практического применения нуждается в калибровке и изучении зависимости от различных факторов, времени года и др.

Таким образом, исследованы возможности совместного использования материалов радиолокационных съемок, а также и мультиспектральных данных для картографирования лесных ресурсов с применением интерферометрических и поляриметрических данных X-диапазона TerraSAR-X/TanDEM-X, а также субпиксельного анализа мультиспектральных данных Landsat-8. Показана принципиальная возможность спутниковых измерений высоты леса с точностью до 1–2 м на основе радарной интерферометрии TanDEM-X. Установлены ограничения применения методов H - α - A -декомпозиции для детальной классификации лесов по зимним снимкам X-диапазона с двойной поляризацией. Апробирована методика спектрального разложения для картографирования породного состава леса на основе мультиспектральных данных среднего разрешения Landsat-8.

Благодарности. Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-47-04386). Интерферометрические и поляриметрические данные TanDEM-X получены по гранту Германского аэрокосмического центра DLR XTI HYDR0485 “The study of cryogenic processes in Siberia by interferometry TanDEM-X”.

Список литературы / References

- [1] **Сухих В.И.** Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве: учебник. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 392 с.
Sukhih, V.I. Aerospace methods in forestry and landscape construction: Uchebnik. Yoshkar-Ola: MarGTU, 2005. 392 p. (In Russ.)
- [2] **Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В.** Аэрокосмические методы географических исследований: учебник. М.: Изд. центр “Академия”, 2004. 336 с.
Knizhnikov, Y.F., Kravtsov, V.I., Tutubalina, O.V. Aerospace methods of geographical research: Uchebnik. Moscow: Publ. Centre “Academy”, 2004. 336 p. (In Russ.)
- [3] **Gandomi, A.J., Binley, A.** A Bayesian trans-dimensional approach for the fusion of multiple geophysical datasets // *Journal of Applied Geophysics*. 2013. Vol. 96. P. 38–54.
- [4] **McRoberts, R.E., Tomppo, E.O.** Remote sensing support for national forest inventories // *Remote Sensing of Environment*. 2007. Vol. 110, iss. 4. P. 412–419.
- [5] **Кашкин В.Б., Сухинин А.И.** Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: учеб. пособие. М.: Логос, 2001. 264 с.
Kashkin, V.B., Sukhinin, A.I. Remote sensing from space. Digital Imaging: Ucheb. posobie. Moscow: Logos, 2001. 264 p. (In Russ.)
- [6] **Шовенгердт Р.А.** Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
Shovengerdt, R.A. Remote sensing. Models and methods of image processing. Moscow: Tekhnosfera, 2010. 560 p. (In Russ.)
- [7] **Adams, J.B., Smith, M.O., Johnson, P.E.** Spectral mixture modeling: A new analysis of road and soil types at the Viking Lander site // *Journal of Geophysical Research*. 1986. Vol. 91. P. 8098–8112.
- [8] **Weng, Q.** Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends // *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 117. P. 34–49.
- [9] **Leckie, D.G., Ranson, K.J.** Forestry applications using imaging radar / Eds F.M. Henderson and A.J. Lewis. Principles and applications of imaging radar: Manual of remote sensing. Vol. 2. Third Edition. New York: John Wiley and Sons, 1998. P. 435–509.
- [10] **Верба В.С., Неронский Л.Б., Поливанов С.С.** Тенденции развития систем радиолокационного наблюдения космического базирования // *Наукоемкие технологии*. 2009. Т. 10, № 8. С. 3–9.
Verba, V.S., Neronsky, L.B., Polivanov, S.S. Development trends of spaceborne radar systems // *Naukoemkie Tekhnologii*. 2009. No. 8. P. 3–9. (In Russ.)
- [11] **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 // *Вычисл. технологии*. 2014. Т. 19, № 3. С. 5–13.
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. (In Russ.)
- [12] **Le Toan, T., Beaudoin, A., Riou, J., Guyon, D.** Relating forest biomass to SAR data // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1992. Vol. 30, No. 2. P. 403–411.
- [13] **Захарова Л.Н., Захаров А.И., Сорочинский М.В., Рябоконт Г.П., Леонов В.М.** Совместный анализ данных оптических и радиолокационных сенсоров: возможности, ограничения и перспективы // *Радиотехника и электроника*. 2011. Т. 56, № 1. С. 5–19.

- Zakharova, L.N., Zakharov, A.I., Sorochinskii, M.V., Ryabokon', G.P., Leonov, V.M.** Joint analysis of the data of optical and radar sensors: Potentialities, limitations, and prospects // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2011. Vol. 56, No. 1. P. 1–13. (In Russ.)
- [14] **Леонов В.М., Рябоконт Г.П., Федотов А.П., Захаров А.И.** Возможности получения и использования комплексной информации радиолокационного и оптического диапазонов спектра при решении задач высокоточного картографирования земной поверхности и построения цифровых моделей ее рельефа // *Космонавтика и ракетостроение*. 2011. № 2(63). С. 106–110.
Leonov, V.M., Ryabokon', G.P., Fedotov, A.P., Zakharov, A.I. Opportunities for obtaining and using complex radar and optical spectrum information in solving high-precision mapping problems of the Earth's surface and the designing of digital terrain models // *Kosmonavtika i Raketostroenie*. 2011. No. 2(63). P. 106–110. (In Russ.)
- [15] **Чимитдоржиев Т.Н., Гармаев А.М., Кирбижекова И.И., Емельянов К.С., Гусев М.А., Базаров А.В.** Комбинирование методов спутниковой радиолокации и спектрального анализа для исследования лесных ресурсов Республики Бурятия // *Вест. СибГАУ*. 2013. № 5(51). С. 70–73.
Chimitdorzhiev, T.N., Garmaev, A.M., Kirbizhekova, I.I., Emelyanov, K.S., Gusev, M.A., Bazarov, A.V. Combination of methods of satellite radar and spectral analysis for research of forest resources of Republic of Buryatia // *Vestnik SibSAU*. 2013. No. 5(51). P. 70–73. (In Russ.)
- [16] **Саворский В.П., Захаров А.И., Захарова Л.Н., Маклаков С.М., Панова О.Ю., Чумаченко С.И.** Комплексный анализ результатов оптических и радиолокационных наблюдений лесных покровов // *Совр. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10, № 4. С. 213–223.
Savorskiy, V.P., Zakharov, A.I., Zakharova, L.N., Maklakov, S.M., Panova, O.Yu., Chumachenko, S.I. Complex analysis of results of optical/radar forest observations // *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2013. Vol. 10, No. 4. P. 213–223. (In Russ.)
- [17] **Кантемиров Ю.И.** Космический радарный мониторинг смещений и деформаций земной поверхности и сооружений. Опыт компании “СОВЗОНД” // *Вест. СибГАУ*. 2013. № 5(51). С. 52–54.
Cantemirov, Yu.I. Satellite synthetic aperture radar monitoring of ground and constructions displacements and deformations. “SOVZOND” company experience // *Vestnik SibSAU*. 2013. No. 5(51). P. 52–54. (In Russ.)
- [18] **Чимитдоржиев Т.Н., Быков М.Е., Кантемиров Ю.И., Холец Ф., Барбиери М.** Технология количественной оценки высоты леса по данным космических радарных тандемных интерферометрических съемок со спутников TerraSAR-X/TanDEM-X // *Геоматика*. 2014. № 1. С. 72–79.
Chimitdorzhiev, T.N., Bykov, M.E., Kantemirov, Yu.I., Holets, F., Barbieri, M. Technology of quantitative estimation for the forest height using space radar interferometric tandem surveys data collected by satellites TerraSAR-X/TanDEM-X // *Geomatics*. 2014. No. 1. P. 72–79. (In Russ.)
- [19] **Козлов А.Л., Логвинов А.И., Сарычев В.А.** Радиолокационная поляриметрия. Поляризационная структура радиолокационных сигналов. М.: Радиотехника. 2007. 640 с.
Kozlov, A.L., Logvinov, A.I., Sarychev, V.A. Radar polarimetry. Polarization structure of radar signals. Moscow: Radiotekhnika, 2007. 640 p. (In Russ.)

- [20] **Синева А.А.** Поляризационная радиолокация для обнаружения и идентификации пленочных загрязнений моря // Тр. Моск. физ.-техн. ин-та. 2014. Т. 6, № 3(23). С. 129–141.
Sineva, A.A. Polarization radar for detection and identification of sea oil slicks // Trudy Moskovskogo Fiziko-Tekhnicheskogo Instituta. 2014. Vol. 6, No. 3. P. 129–141. (In Russ.)
- [21] **Родионова Н.В.** Оценка параметров почвы по радарным данным с использованием эмпирической модели и декомпозиции по механизмам рассеяния // Исследование Земли из космоса. 2009. № 1. С. 3–8.
Rodionova, N.V. Estimation for soil parameters using radar data with the help of empirical model and the decomposition of scattering mechanisms // Issledovanie Zemli iz Kosmosa. 2009. No. 1. P. 3–8. (In Russ.)
- [22] **Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., Chipman, J.W.** Remote sensing and image interpretation. 5th edition. New York: John Wiley and Sons, 2004.
- [23] **McCord, T.B., Singer, R.B., Clark, R.N.** Mars surface composition from reflectance spectroscopy—A summary: National Aeronautical Space Administration Conference Publication 2072. 1979. P. 56–57.
- [24] **Petrou, M., Foschi, P.G.** Condense in linear spectral unmixing of single pixels // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1999. Vol. 37, iss. 1. P. 624–626.
- [25] **Кухаренко Б.Г.** Алгоритмы анализа компонент гиперспектральных изображений // Информационные технологии. Приложение. 2013. № 6. С. 1–32.
Kukharenko, B.G. Analysis of algorithms for hyperspectral imaging component // Information Technologies. Application. 2013. No. 6. P. 1–32. (In Russ.)
- [26] **Потатуркин О.И., Борзов С.М., Потатуркин А.О., Узилов С.Б.** Методы и технологии обработки мульти- и гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли высокого разрешения // Вычисл. технологии. 2013. Т. 18. С. 60–67.
Potaturkin, O.I., Borzov, S.M., Potaturkin, A.O., Uzilov, S.B. Methods and technologies for processing multi- and hyperspectral data for high resolution Earth remote sensing // Computational Technologies. 2013. Vol. 18. Special issue. P. 60–67. (In Russ.)
- [27] **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 // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. Т. 4, № 1. С. 129–133.
Kirbizhekova, I.I., Chimitdorzhiev, T.N., Garmaev, A.M., Gusev, M.A. Mapping forest resources of the Republic of Buryatia, based on ALOS PALSAR polarimetric data and multispectral data SPOT5 // InterEXPO Geo-Siberia. 2013. Vol. 4, No. 1. P. 129–133. (In Russ.)
- [28] **Кирбижекова И.И., Лабаров Б.Б., Чимитдоржиев Т.Н.** Оценка породного состава лесных массивов Республики Бурятия на основе метода спектрального смешивания: труды МНПК “Фундаментальные и прикладные научные исследования”. Уфа, 2015. 168 с.
Kirbizhekova, I.I., Labarov, B.B., Chimitdorzhiev, T.N. Evaluation of species composition for forests of the Republic of Buryatia on the basis of spectral mixing: Trudy MNPК “Fundamental’nye i prikladnye nauchnye issledovaniya”. Ufa, 2015. 168 p. (In Russ.)
- [29] Леса бассейна Байкала (состояние, использование и охрана) / Под ред. А.А. Онучина. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2008. 245 с.
The forests of the Baikal Basin (the state, usage and protection) / Ed. A.A. Onuchin. Krasnoyarsk: Institute of Forest. V.N. Sukachev SB RAS, 2008. 245 p. (In Russ.)

*Поступила в редакцию 16 ноября 2015 г.,
с доработки — 21 января 2016 г.*

Study of features of the complex use of radar interferometry and polarimetry using TanDEM-x and the sub-pixel analysis of images Landsat-8 for the forest resource assessment

KIRBIZHEKOVA, IRINA I.^{1,*}, CHIMITDORZHIEV, TUMEN N.¹, LABAROV, BALCHIN B.², BIKOV, MICHAEL E.¹, BALTUHAEV, ARKADY K.¹

¹Physical Institute of Materials Science of SB RAS, Ulan-Ude, 670047, Russia

²Buryat State Agricultural Academy V.R. Filippova, Ulan-Ude, 670047, Russia

*Corresponding author: Kirbizhekova, Irina I., e-mail: kirbizhekova@bk.ru

In this article, we discuss the aspects and opportunities of applying InSAR and PolSAR methods applied TanDEM-X data on example of the Baikal-Kudarinsk Forestry of Buryatia. In order to monitor and add the results we use multispectral Landsat-8 data. Investigation was conducted in three directions: 1) determination of the trees height by DInSAR; 2) determination of the forest species by PolSAR decomposition methods; 3) distribution of the forest species by sub-pixel analysis methods of multispectral images.

Verification of interferometric measurements methodology for the forest height estimations is carried by a sub-satellite geodetic GPS-measurements. It is confirmed that the InSAR-measurements of the pine forest canopy height is lower by 1–2 meters compared to the individual trees heights. That accounts annual trees growth and the height InSAR measurements error is assessed to be less than 3 meters.

The studies of PolSAR data potential application with dual polarization (VV, VH) for forest mapping have been conducted. We generated three versions of the coherence matrix: two monostatic for active TerraSAR and passive TanDEM and one bistatic for a set of both satellites data. The results of Wishart $H-A-\alpha$ classification have turned out to be not quite satisfactory, possibly due to winter time of surveys.

The article also discusses the method for determination of the forests species composition based on the linear spectral mixing method. We conducted a spectral decomposition of the multispectral Landsat-8 data and obtained an estimation for the evaluation of the main spectral components “weight”. As a result, maps of the spatial distribution of forest species at the test sites were obtained.

Keywords: satellite radar, differential interferometry, polarimetric decomposition, sub-pixel analysis, forest mapping, GPS-measurement.

Acknowledgments. This research was partly supported by RFBR (grant No. 15-47-04386) and for interferometric and polarimetric TanDEM-X data by the grant from German Aerospace Center DLR XTI HYDR0485 “The study of cryogenic processes in Siberia by interferometry TanDEM-X”.

Received 16 November 2015

Received in revised form 21 January 2016