

УДК 537.871.5+530.1:528.871.6

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА ПО ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ ALOS PALSAR

Кирбижекова Ирина Ивановна¹,
kirbizheкова@bk.ru

Батуева Елизавета Владимировна¹,
elizavlad@ipms.bsnet.ru

¹ Институт физического материаловедения СО РАН,
Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6.

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания и развития технологии картирования лесной растительности с использованием спутниковых радиолокационных данных.

Цель работы: исследование возможности классификации хвойных и смешанных лесов Байкальского региона на основе поляриметрических радиолокационных данных и сезонных изменений поляриметрических свойств растительности в дециметровом диапазоне.

Методы исследования: преобразование матрицы рассеяния в когерентную и ковариантную матрицы; поляриметрическая декомпозиция методом Клода–Поттье; двух- и трехпараметрическая классификация с учетом зонального распределения параметров декомпозиции Клода–Поттье; поляриметрическая декомпозиция методом Фримана на объемную, поверхностную и двукратную составляющие рассеяния; оценка биомассы и плотности древостоя на основе соотношения весов компонент декомпозиции Фримана; расчет поляриметрических характеристик, таких как радарный вегетационный индекс, степень деполаризации и т. п.; сравнительный анализ разносезонных поляриметрических характеристик.

Результаты. Исследованы сезонные изменения радиолокационных поляриметрических характеристик хвойных и смешанных лесов Байкальского региона на основе данных дециметрового диапазона ALOS PALSAR. Выполнена поляриметрическая декомпозиция методами Клода–Поттье и Фримана и классификация на основе различий в составе и соотношении компонент разложения. Выявлены значительные сезонные вариации процессов рассеяния растительно-почвенных покровов. Установлено ослабление доминирующей роли объемного рассеяния в зимний период и усиление поверхностного рассеяния на радиолокационных изображениях, свидетельствующие о соответствующем изменении биомассы. На тестовом участке соснового леса обнаружено уменьшение объемной и двукратной компонент разложения Фримана в среднем на 3 дБ, что свидетельствует об изменениях свойств проводимости лесной среды при отрицательных температурах.

Ключевые слова:

Радиолокационная поляриметрия, ALOS PALSAR, поляриметрические характеристики, поляриметрическая декомпозиция, классификация, сезонные изменения, лесные ресурсы.

Исследования методами дистанционного зондирования Земли текущего состояния и долговременных изменений окружающей среды, обусловленных факторами естественного и антропогенного происхождения, относятся к числу приоритетных научных направлений [1, 2]. На современном этапе возрастает роль аэрокосмических информационных технологий, основанных на применении радиоволновых систем. Радиолокационные методы дистанционного зондирования Земли находят широкое применение в узкоспециализированных и междисциплинарных научных исследованиях, в частности при изучении почвенных и растительных ресурсов, снежного и ледового покровов, просадок грунтов и оползневых явлений и т. д. [3–6]. Особо следует отметить перспективность применения спутниковой радиолокации для предупреждения, оценки и устранения последствий чрезвычайных ситуаций, связанных с лесными пожарами и наводнениями [7].

В настоящее время радары с синтезированной апертурой (РСА) позволяют получать изображения поверхности Земли с высоким (1–3 м) и сверхвысоким (менее 1 м) пространственным разрешением, аналогично оптическим сканерам. Но в от-

личие от оптической съемки спутниковая радиолокация не ограничена временем суток и погодными условиями [8]. Кроме того, благодаря высокой проникающей способности микроволнового излучения радиолокационные изображения содержат ценную информацию о геометрической структуре и физических свойствах почвенно-растительных покровов и подстилающих сред, что расширяет возможности их использования при решении разнообразных задач прикладного характера, в частности для картографии лесных ресурсов, оценки породного состава, биометрических характеристик и т. п. [9–12].

Взаимодействие поляризованных радиолокационных волн с объектами на земной поверхности в процессе отражения и рассеяния изменяет поляризацию. Характер изменений зависит от диэлектрической проницаемости, проводимости, температуры, влажности, особенностей рельефа, шероховатости поверхности и других характеристик объекта исследования [8]. Теоретические аспекты такого взаимодействия пока изучены не в полной мере. Тем не менее, к настоящему времени разработаны эффективные методы оценки тех или иных характеристик объектов на основе их радиолока-

ционных изображений и для решения прикладных задач в области картографии, экологии, геологии, гидрологии и пр. В частности, существуют отдельные примеры классификации лесной растительности с высокой степенью точности на основе радиолокационных данных, полученных в нескольких диапазонах длин волн, каналах поляризации и в разные моменты времени [3].

В данной работе представлены результаты исследования возможности применения поляризметрических радиолокационных данных дециметрового диапазона для классификации лесных ресурсов на примере Байкальского региона.

В Байкальский регион входят три субъекта Российской Федерации со схожими физико-географическими особенностями, объединенных принадлежностью к бассейну уникального озера Байкал. Для этой малонаселенной территории с общей площадью более 1,5 млн км² характерны преобладание гористого рельефа с мощными горными хребтами, резко континентальный климат с продолжительными холодными зимами и коротким жарким летним периодом. Для комплексного исследования природных объектов Байкальского региона в силу их значительной протяженности и труднодоступности актуально использование спутниковой информации. В частности, структура лесных массивов хорошо отражается на космических снимках благодаря индикационным свойствам – текстуре и цвету однородных контуров лесных ландшафтов. На основе дистанционных данных можно оценить как современное состояние лесных экосистем, так и изменения вследствие антропогенного воздействия, лесных пожаров и т. д., площадь участков здорового и поврежденного леса, провести количественный анализ биометрических характеристик растительности [13–15].

В ИФМ СО РАН по Байкальскому региону спутниковые радиолокационные данные с полной поляризметрической информацией представлены снимками в дециметровом L-диапазоне с длиной волны 24 см, полученными радаром с синтезированной апертурой ALOS PALSAR Японского аэрокосмического агентства JAXA во время миссии 2006–2011 гг. Размеры сцен на снимках – 20×65 км², пространственное разрешение ~25 м. Исследования проведены на двух тестовых участках смешанного (№ 1) и хвойного (№ 2) леса к западу и востоку от реки Селенги, их координаты – 52±05 с. ш., 106±24 в. д. и 52±10 с. ш., 106±50 в. д. соответственно.

Базовые аспекты теории и методы решения многочисленных прикладных задач на основе поляризметрических радиолокационных данных хорошо известны [3, 8]. Основной целью спутниковой поляризационной радиолокации является выявление параметров, которые в достаточной степени характеризуют объект исследования. Это позволяет решать обратную задачу по оценке физического состояния и свойств объекта на основе его поляризметрических характеристик.

Каждому пикселю радарного изображения соответствует матрица рассеяния S второго порядка, описывающая радиолокационный отклик в четырех поляризационных каналах при согласованной (горизонтально-горизонтальной hh или вертикально-вертикальной vv) и поперечной (горизонтально-вертикальной hv или вертикально-горизонтальной vh) ориентациях излучателя и приемника излучения. Элементы матрицы рассеяния S представлены в комплексной форме, использовать их для понимания процесса рассеяния электромагнитной волны на исследуемом объекте достаточно сложно. Поэтому часто прибегают к декомпозиции матрицы рассеяния на составляющие с более простой интерпретацией. Ранее исследования по классификации природных и искусственных объектов на радарных изображениях показали высокую эффективность таких методов декомпозиции, как метод Клода–Поттье и Фримана [16, 17].

Метод Клода–Поттье позволяет дифференцировать объекты в соответствии с типом механизмов рассеяния [18–21]. Для этого на основе собственных чисел λ_i матриц когерентности T или ковариантности C вычисляются три параметра: энтропия H , анизотропия A и параметр α .

Первый параметр, энтропия H , характеризует степень статистического беспорядка. Энтропия H изменяется по мере увеличения шероховатости поверхности от 0 для совершенно гладкой поверхности до 1 при наличии растительности и сложном рельефе. Второй параметр, анизотропия A , характеризует соотношение доминирующего (наибольшего) и минорных (вторичных) собственных чисел матрицы когерентности, т. е. распределение по типам механизмов рассеяния. Анизотропия A изменяется от 0 при равной доле разных типов рассеяния до 1 при доминировании какого-либо из них. Третий параметр α характеризует тип доминирующего механизма рассеяния, выражается в угловой мере и изменяется от 0° до 90°. При низких значениях (близких к 0°) доминирует рассеяние от поверхности относительно ровных участков земли и воды. При средних значениях параметра α (~45°) преобладает дипольный механизм рассеяния, характерный для растительности. При высоких значениях параметра α (близких к 90°) наибольший вклад в отраженный сигнал вносит двукратное и многократное отражение, в основном характерное для городской застройки. Для примера на рис. 1 представлены псевдоцветные изображения параметров для тестового участка (№ 1) смешанного леса и окружающих его земель сельскохозяйственного назначения.

Таким образом, каждому объекту на радарном изображении свойственны вполне определенные значения параметров H , A , α в соответствии с составом, комбинацией и распределением вклада основных и неосновных механизмов рассеяния. В поле параметров H – α все пиксели распределяются по 9 основным зонам.

По вертикали диаграмма $H-\alpha$ разделена на три области в соответствии с тремя типами рассеяния: однократного рассеяния от поверхности, объемного – от растительности и двукратного – от строений. По горизонтали – на области низкой, средней и высокой энтропии. То есть почвенному покрову без растительности соответствуют зоны поверхностного рассеяния средней и низкой энтропии 6 и 9. Лесной растительности соответствуют зоны объемного рассеяния высокой, средней и низкой энтропии 2, 5 и 8. Участкам городской застройки, не представленным на территории исследования, соответствуют зоны двукратного рассеяния высокой, средней и низкой энтропии 1, 4 и 7. Теоретически невозможны значения параметров в зоне 3 (поверхностное рассеяние высокой энтропии).

Больше возможностей для интерпретации предоставляет комбинация параметров. Если классификация на основе двух показателей позволяет выделить до 8 классов, то на основе всех трёх – до 16. На рис. 2 представлен пример распределе-

ния пикселей на двумерной диаграмме $H-\alpha$ (рис. 2, а), а также результаты двумерной $H-\alpha$ (рис. 2, б) и трехмерной $H-A-\alpha$ -классификации (рис. 2, в). Сравнение с наземными данными свидетельствует о достаточно высокой точности трехпараметрической $H-A-\alpha$ -классификации, отражающей морфологические особенности растительно-почвенных покровов мезомасштаба для территории исследования [22].

Результаты классификации радарных изображений также позволяют выявить локальные вариации. Для почвенного покрова они обусловлены главным образом типом почвы и градицией влажности, а для лесных массивов – биометрическими характеристиками и физическими условиями (температура, влажность и др.).

При сравнении результатов декомпозиции методом Клода-Поттье, полученных на основе разносезонных изображений ALOS PALSAR, были выявлены значительные изменения процессов рассеяния в лесных массивах и на участках с редкой ра-

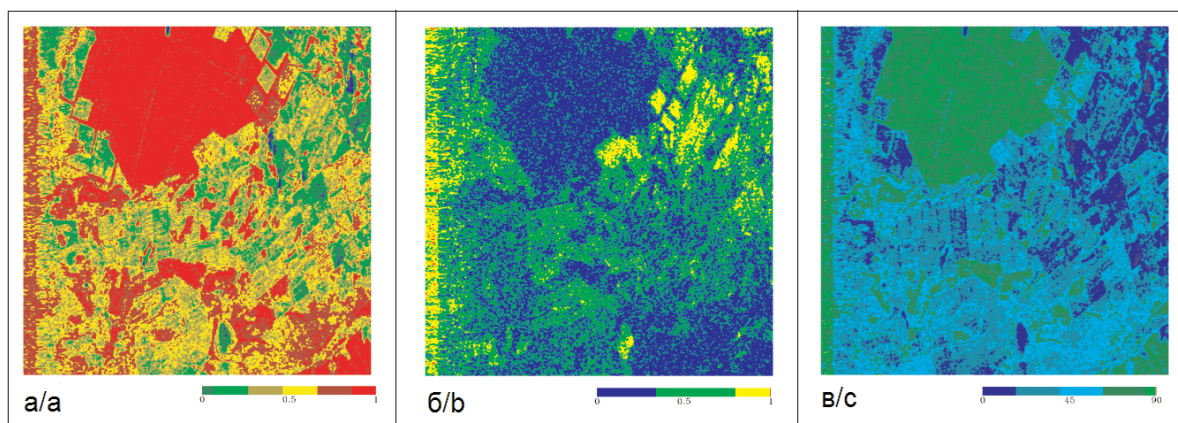


Рис. 1. Параметры декомпозиции Клода-Поттье для тестового участка № 1 по данным ALOS PALSAR от 30 мая 2006 г.: а) энтропия H ; б) анизотропия A ; в) параметр α

Fig. 1. Parameters of Claude-Pottier decomposition for test site № 1 by the ALOS PALSAR data on May 30, 2006: а) entropy H ; б) anisotropy A ; в) parameter α

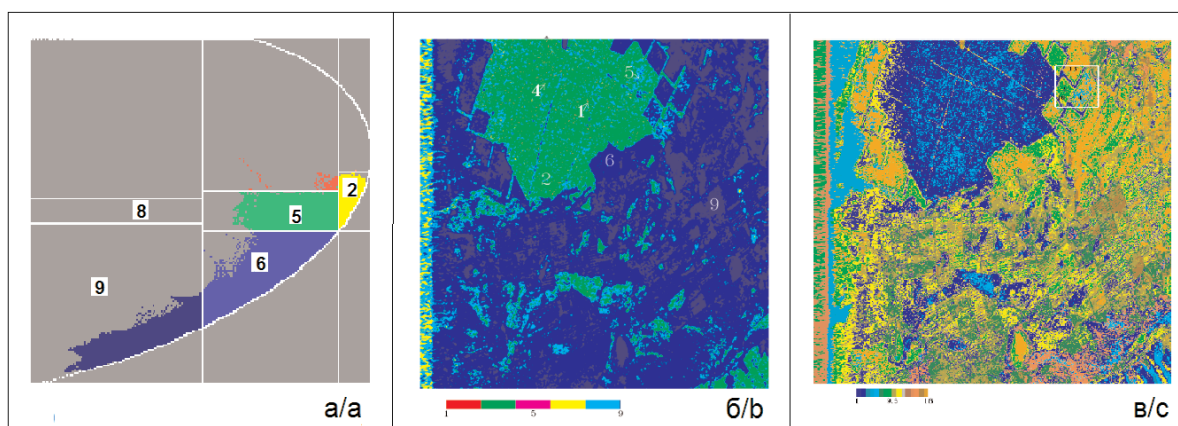


Рис. 2. Результаты $H-A-\alpha$ -классификации для тестового участка № 1: а) распределение пикселей в поле параметров $H-\alpha$; б) результат классификации по двум параметрам $H-\alpha$; в) результат классификации по трем параметрам $H-A-\alpha$

Fig. 2. Results of $H-A-\alpha$ -classification for test site № 1: а) pixels distribution in the field of $H-\alpha$ parameters; б) result of classification by two parameters $H-\alpha$; в) result of classification by three parameters $H-A-\alpha$

стительностью. В частности, при сравнительном анализе поляриметрических данных двух последовательных съемок ALOS PALSAR от 28 сентября и 13 ноября 2006 г. установлено, что в зимний период по территории горного массива Хамар-Дабан и долины реки Селенги происходит существенное снижение доминирующей роли объемного рассеяния высокой и средней энтропии с 39,41 до 21,75 %. Одновременно наблюдается рост доминирующей роли поверхностного рассеяния средней и низкой энтропии с 61,14 до 78,25 %. В целом в зимнее время на 20 % исследуемой территории доминирующая роль перешла от объемной составляющей процесса рассеяния радиолокационного импульса к поверхностной. Частично это обусловлено уменьшением надземной биомассы в зимний период, частично – сезонными изменениями рассеивающих характеристик почвенно-растительных покровов в дециметровом диапазоне, особенно существенными при снижении температуры до отрицательных значений и с установлением снежного покрова.

Для более детального исследования лесной растительности были привлечены такие поляриметрические характеристики, как степень деполаризации, пьедестальная высота, радарный вегетационный индекс и др. На рис. 3, а представлен фрагмент изображения интенсивности радиолокационного отклика территории исследования (те-

стового участка № 2) с лесным массивом Байкало-Кударинского лесничества. Тон изображения изменяется по мере увеличения интенсивности отраженного сигнала от более темных оттенков (незамерзшие участки воды, ровные участки почвы и т. п.) к более светлым (растительность, лед и т. п.).

На рис. 3, б представлены гистограммы распределения радарного вегетационного индекса rvi (аналог вегетационного индекса в оптическом диапазоне), представляющего соотношение радарного отклика на поперечной и согласованной поляризациях. На каждой кривой отчетливо видны три пика, соответствующие водной поверхности, почвенному и растительному покровам. При смене сезонов происходят значительные изменения, как положения пиков, так и их формы. В том числе для растительности в зимний период характерно уменьшение среднего значения rvi (сдвиг пика влево) и разброса значений (более компактная форма пика). При замерзании воды rvi уменьшается почти до 0, в то время как интенсивность отраженного сигнала возрастает.

Для отдельных участков соснового леса Байкало-Кударинского лесничества также была проведена количественная оценка локальных сезонных изменений основных компонент рассеяния. Декомпозиция матрицы рассеяния на составляющие выполнена методом Фримана [23]. На рис. 3, в представлен горизонтальный профиль трех компо-

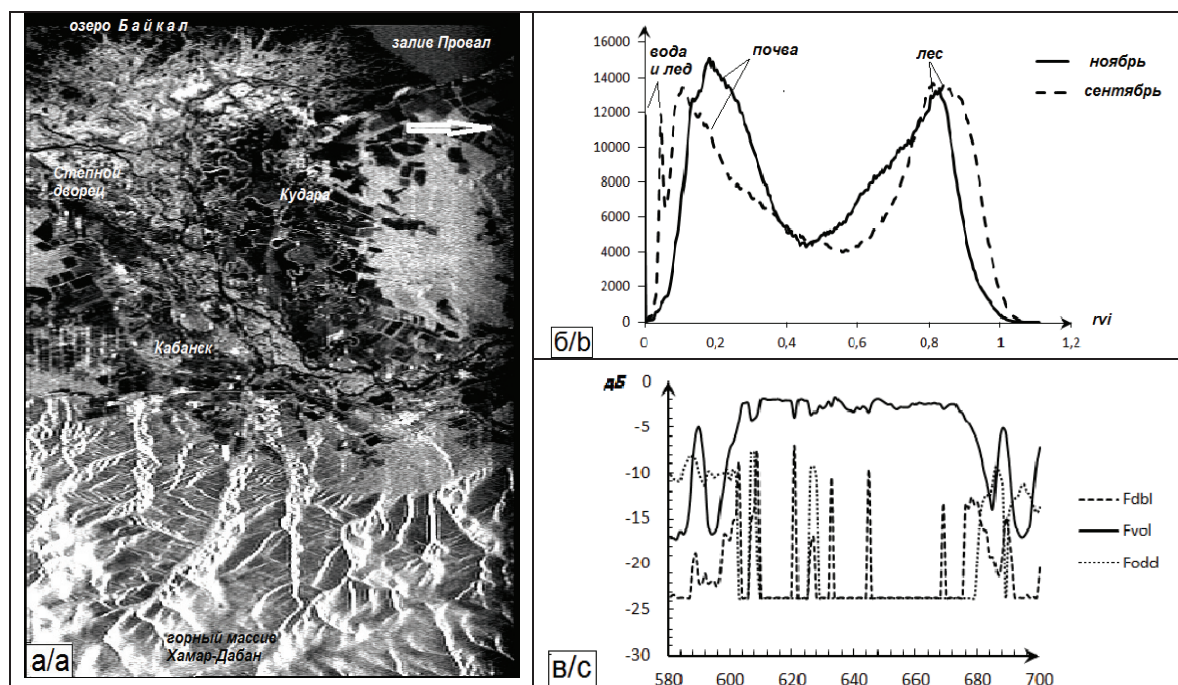


Рис. 3. Радиолокационная поляриметрия тестового участка № 2 по данным ALOS PALSAR от 28 сентября и 13 ноября 2006 г.: а) изображение интенсивности на 28 сентября; б) изменения радарного вегетационного индекса rvi ; в) горизонтальный профиль компонент разложения Фримана F_{dbi} , F_{vol} и F_{odd} на 28 сентября

Fig. 3. Radar polarimetry of test site № 2 by the ALOS PALSAR data on 28 September and 13 November 2006: а) intensity image on 28 September; б) changes of radar vegetation index rvi ; в) horizontal profile of Freeman decomposition components F_{dbi} , F_{vol} and F_{odd} on September 28

нент разложения Фримана, соответствующих объемному F_{vol} , нечетному F_{odd} (преимущественно поверхностному) и четному F_{dbl} (преимущественно двукратному отражению типа почва-ствол или ствол-почва) механизмам рассеяния на участке, отмеченном на рис. 3, *а* белой стрелкой. Для лесного массива свойственно преобладание объемной составляющей F_{vol} (сплошная линия) в центральной части рисунка. При густом плотно сомкнутом лесном пологом две другие составляющие, F_{odd} и F_{dbl} , почти отсутствуют. На участках с редкой растительностью пики поверхностной составляющей F_{odd} встречаются чаще (лесные прогалины и полянки), в то время как объемная компонента F_{vol} немного уменьшается. При больших размерах участков без растительности компонента рассеяния от поверхности начинает преобладать: $F_{odd} > F_{vol}$. Частота и высота пиков двукратной составляющей F_{dbl} зависят от плотности древостоя и толщины стволов деревьев. В среднем по тестовому участку соснового леса осенне-зимнее снижение компонент Фримана составило: $3,48 \pm 0,15$ дБ для F_{vol} ; $3,00 \pm 0,58$ дБ для F_{dbl} ; $0,28 \pm 0,85$ дБ для F_{odd} с доверительной вероятностью 0,95. Таким образом, полагая, что наземная биомасса в сосновом лесу остается неизменной за короткий промежуток времени в 40 суток между съемками, уменьшение в зимний период объемной составляющей F_{vol} в радиолокационном отклике в значительной степени связано с изменениями диэлектрической проницаемости и проводящих свойств лесной среды при снижении температуры до отрицательных значений и установлении снежного покрова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Развитие методологии спутникового мониторинга наземных экосистем: основные результаты последнего десятилетия и перспективные направления исследований / С.А. Барталев, А.С. Исаев, Д.В. Ершов, Е.А. Лупян // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сборник тезисов X Всероссийской открытой конференции. – М., 2012. – С. 3.
2. Паничкин В.Ю., Мирошниченко О.Л. Повышение эффективности гидрогеологических исследований в Казахстане на основе применения новейших информационных технологий // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 1. – С. 118–126.
3. Manual of remote sensing. V. 2. Principles and applications of imaging radar. Editor-in-chief R.A. Ryerson. – USA: John Wiley & Sons Inc., 1998. – 865 p.
4. Захаров А.И., Чимитдоржиев Т.Н. Зондирование земных покровов радаром с синтезированной апертурой // Журнал радиоэлектроники. – 2010. – № 10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct10/4> (дата обращения: 29.10.2015).
5. Кантемиров Ю.И. Обзор современных радарных данных ДЗЗ // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 2. – С. 69–72.
6. Брыксин В.М., Филатов А.В., Евтюшкин А.В. Использование радарных изображений и DINSAR-PSINSAR-технологии для мониторинга Западной Сибири и Арктики // Журнал радио-

Заключение

В результате проведенных исследований на примере тестовых участков хвойного и смешанного лесов Байкальского региона:

1. Показана возможность дифференциации и отождествления до 16 классов, различающихся особенностями процессов рассеяния радиолокационного импульса для почвенно-растительных покровов на основе поляриметрических радиолокационных данных дециметрового диапазона.
2. Выявлены значительные сезонные вариации процессов рассеяния растительно-почвенных покровов на основе сравнительного анализа разновременных поляриметрических характеристик, таких как радарный вегетационный индекс, степень поляризации и т. д., а также на основе различий в составе и соотношении декомпозиционных компонент разложения Клода-Поттье и Фримана.
3. Установлено ослабление доминирующей роли объемного рассеяния в зимний период и усиление поверхностного рассеяния на радиолокационных изображениях, свидетельствующие о соответствующем изменении вегетативной биомассы.
4. Обнаружено уменьшение объемной и двукратной компонент разложения Фримана в среднем на 3 дБ на тестовом участке соснового леса (в отсутствие значительных потерь биомассы), что свидетельствует об изменениях свойств проводимости лесной среды при отрицательных температурах.

Исследования выполнены при частичной поддержке РФФИ (грант 15-47-04386 p_сибирь_a).

электроники. – 2012. – № 6. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/6> (дата обращения: 29.10.2015).

7. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров / С.А. Барталев, Ф.В. Стыченко, В.А. Егоров, Е.А. Лупян // Лесоведение. – 2015. – № 2. – С. 83–94.
8. Козлов А.Л., Логвинов А.И., Сарычев В.А. Радиолокационная поляриметрия. Поляризационная структура радиолокационных сигналов. – М.: Радиотехника, 2007. – 640 с.
9. Захарова Л.Н., Леонов В.М., Синило В.П. Анализ перспективных технологий радиолокационного зондирования Земли из космоса и путей их использования при решении прикладных задач // Космонавтика и ракетостроение. – 2014. – № 5. – Вып. 78. – С. 16–21.
10. Lee J.-S., Pottier E. Polarimetric radar imaging: from basics to applications. – Boca Raton: CRC Press, 2009. – 422 p.
11. Технология создания и применения базовых продуктов спутниковой радиолокации / А.В. Дмитриев, Т.Н. Чимитдоржиев, И.И. Кирбижекова, П.Н. Дагуров, А.В. Базаров, А.М. Гармаев, К.С. Емельянов, М.А. Гусев // Вычислительные технологии. – 2014. – Т. 19. – № 3. – С. 5–13.
12. Родионова Н.В. Классификация поверхности на поляриметрических РЛИ с использованием текстуры и разложения по механизмам рассеяния // Исследование Земли из космоса. – 2007. – № 4. – С. 8–14.
13. Исследование земных покровов Байкальского региона на основе радарных данных / К. Шмуллиус, Д.Д. Дарижапов,

- Б.Ч. Доржиев, И.И. Кирбижекова, Д.Ш. Ширапов, Н.Н. Ширапова // Сибирский экологический журнал. – № 6. – 2003. – С. 763–766.
14. Кирбижекова И.И., Батуева Е.В., Дарижапов Д.Д. Поляризметрические свойства природных объектов на радарных изображениях Байкальского региона // Материалы Российской научной конференции «Зондирование земных покровов радарными с синтезированной апертурой». – Улан-Удэ, 2010. – С. 85–94.
15. Алексеева М.Н., Прейс Ю.И., Дюкарев Е.А. Пространственная структура наземного растительного покрова и типа верхнего слоя торфа северо-восточных отрогов большого Васюганского болота по дистанционным и наземным данным // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 4. – С. 81–90.
16. Синёва А.А. Поляризационная радиолокация для обнаружения и идентификации пленочных загрязнений моря // Труды Московского физико-технического института. – 2014. – Т. 6. – № 3 (23). – С. 129–141.
17. 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.
18. Cloude S.R., Pottier E. An entropy-based classification scheme for land applications of polarimetric SAR // IEEE Trans. GRS. – 1997. – V. 35 (1). – P. 68–78.
19. Cloude S.R., Pottier E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1996. – V. 34. – № 2. – P. 498–518.
20. Van-Zyl J. Unsupervised classification of scattering behavior using radar polarimetry data // IEEE Trans. GRS. – 1989. – V. 27. – № 1. – P. 36–45.
21. Unsupervised classification of polarimetric SAR imagery based on target decomposition and wishart distribution / J.S. Lee, M.R. Grunes, T.L. Ainsworth, L. Du, D.L. Schuler, S.R. Cloude // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1999. – V. 37. – № 5. – P. 2249–2258.
22. Кирбижекова И.И., Батуева Е.В. Н-А- α -классификация данных ALOS по дельте реки Селенга // Известия вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 9/2. – С. 25–26.
23. Freeman A., Durden S.T. A three-component scattering model for polarimetric SAR data // IEEE Trans. GRS. – 1998. – V. 36 (3). – P. 963–973.

Поступила 30.10.2015 г.

Информация об авторах

Кирбижекова И.И., кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник сектора оптико-микроволновой диагностики и обработки космической информации Института физического материаловедения СО РАН.

Батуева Е.В., кандидат физико-математических наук, доцент, ученый секретарь Института физического материаловедения СО РАН.

UDC 537.871.5+530.1:528.871.6

RESEARCH OF SEASONAL CHANGES OF FOREST VEGETATION IN BAIKAL REGION ON POLARIMETRIC ALOS PALSAR DATA

Irina I. Kirbizhekov¹,

kirbizhekov@bk.ru

Elizaveta V. Batueva¹,

elizavlad@ipms.bscnet.ru

¹ Institute of Physical Materials Science of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
6, Sakhyanova Street, Ulan-Ude, 670047, Russia.

Relevance of the work is caused by the necessity to create and to develop the techniques of mapping forest vegetation using satellite radar data.

The main aim of the research is to study the possibility of classifying the coniferous and mixed forests of Baikal region based on polarimetric radar data and seasonal changes of polarimetric properties of vegetation in the decimeter range.

Methods: transformation scattering matrix into a coherent and covariance matrix; polarimetric decomposition by the Claude–Pottier method; two- and three-parameter classification considering zonal distribution of the Claude–Pottier decomposition parameters; Freeman decomposition method to the volumetric, surface and double components of scattering; estimation of a biomass and tree density on the basis of the weights ratio of the components of Freeman decomposition; calculation of polarimetric features such as radar vegetation index, depolarization, etc.; comparative analysis of seasonal polarimetric characteristics.

Results. The authors have studied seasonal changes of the polarimetric radar characteristics of the coniferous and mixed forests in Baikal region based on the autumn–winter data ALOS PALSAR in the decimeter range. Applying the Claude–Pottier and Freeman methods the polarimetric decompositions and classification based on the differences in a composition and a ratio of decomposition components were carried out. The authors revealed the considerable seasonal variations of scattering in vegetable and soil covers. It was ascertained that the dominant role of volume scattering in winter period decreases and surface scattering rises. This fact indicates the corresponding variations of vegetative biomass. On the investigated site of pine forest the authors determined the decrease of the volume and double components of Freeman decomposition on average by 3 dB, which indicates a change in the conductivity properties of the forest medium at the negative temperatures.

Key words:

Radar polarimetry, ALOS PALSAR, polarimetric characteristics, polarimetric decomposition, classification, seasonal change, forest resources.

The research was partially financially supported by the RFBR (Grant 15-47-04386 p_субур_а).

REFERENCES

1. Bartalev S.A., Isaev A.S., Ershov D.V., Lupyan E.A. Razvitie metodologii sputnikovogo monitoringa nazemnykh ekosistem: osnovnye rezultaty poslednego desyatiletiya i perspektivnye napravleniya issledovaniy [Development of methodology for satellite monitoring of terrestrial ecosystems: the main results of the last decade and future directions of research]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. Sbornik tezisev Desyatoy vserossiyskoy otkrytoy konferentsii* [Current issues in remote sensing of the Earth from space. Proc. X Int. Russian Conf.]. Moscow, 2012. p. 3.
2. Panichkin V.Yu., Miroshnichenko O.L. Increase of efficiency of hydrogeological investigations in Kazakhstan based on application of the newest informational technologies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 1, pp. 118–126. In Rus.
3. *Manual of remote sensing. Vol. 2. Principles and applications of imaging radar*. Editor-in-chief R.A. Ryerson. USA, John Wiley & Sons Inc., 1998. 865 p.
4. Zakharov A.I., Chimitdorzhiyev T.N. Zondirovanie zemnykh pokrovov radarami s sintezirovannoy aperturoy [Radar sounding of Earth covers by means of synthetic aperture radar]. *Journal of radio electronics*, 2010, no 10. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/oct10/4/> (accessed 29 October 2015).
5. Kantemirov Yu.I. Overview of modern Earth remote sensing radar data. *Izvestiya vuzov «Geodesy and aerophotography»*, 2013, no. 2, pp. 69–72. In Rus.
6. Bryksin V.M., Filatov A.V., Evtyushkin A.V. Using of Sar data and DINSAR-PSINSAR technique for monitoring of Western Siberia and Arctic. *Journal of radio electronics*, 2012, no. 6. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/6/> (accessed 29 October 2015). In Rus.
7. Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Egorov V.A., Lupyan E.A. Satellite score destruction of Russian forests from fires. *Russian Journal of Forest Science*, 2015, no. 2, pp. 83–94. In Rus.
8. Kozlov A.L., Logvinov A.I., Sarychev V.A. *Radiolokatsionnaya polarimetriya. Polarizatsionnaya struktura radiolokatsionnykh signalov* [Radar polarimetry. Polarization structure of radar signals]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2007. 640 p.
9. Zakharova L.N., Lenov V.M., Sinilo V.P. Analysis of perspective technologies of radar earth sensing from the space and the ways of their use when solving the applied problems. *Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2014, no. 5, vol. 78, pp. 16–21. In Rus.
10. Lee J.-S., Pottier E. *Polarimetric radar imaging: from basics to applications*. Boca Raton, CRC Press, 2009. 422 p.
11. Dmitriev A.V., Chimitdorzhiyev T.N., Kirbizhekov 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, pp. 5–13. In Rus.
12. Rodionova N.V. Classification of surface on polarimetric radar data, using texture and decomposition of scattering mechanisms. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, no. 4, pp. 8–14. In Rus.

13. Shmullius K., Darizhapov D.D., Dorzhiev B.Ch., Kirbizhekova I.I., Shirapov D.Sh., Shirapova N.N. Investigation of terrestrial covers of the Baikal region on the basis of radar data. *Contemporary Problems of Ecology*, 2003, no. 6, pp. 763–766. In Rus.
14. Kirbizhekova I.I., Batueva E.V., Darizhapov D.D. Polyarimetricheskie svoystva prirodnykh obektov na radarnykh izobrazheniyakh Baykalskogo regiona [Polarimetric properties of natural objects on radar images of Baikal region]. *Materialy Rossiyskoy nauchnoy konferentsii. Zondirovanie zemnykh pokrovov radarami s sintezirovannoy apertutoy* [Earth cover sensing by radars with synthesized aperture. Proc. of Russian scientific conference]. Ulan-Ude, 2010. pp. 85–94.
15. Alekseeva M.N., Preys Yu.I., Dyukarev E.A. Spatial structure of vegetation cover and top layer of peat of northeastern spurs of the great vasyugan mire by remote and ground data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 81–90. In Rus.
16. Sineva A.A. Polarimetric radars for detection and identification of marine oil pollution. *Proceedings of MIPT*, 2014, vol. 6, no. 3 (23), pp. 129–141. In Rus.
17. Rodionova N.V. Estimation of soil parameters by radar data using the empirical model and decomposition of scattering mechanisms. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, no. 1, pp. 3–8. In Rus.
18. Cloude S.R., E. Pottier. An entropy-based classification scheme for land applications of polarimetric SAR. *IEEE Trans GRS*, 1997, vol. 35 (1), pp. 68–78.
19. Cloude S.R., Pottier E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, vol. 34, no. 2, pp. 498–518.
20. Van-Zyl J. Unsupervised classification of scattering behavior using radar polarimetry data. *IEEE Trans. GRS*, 1989, vol. 27, no. 1, pp. 36–45.
21. Lee J.S., Grunes M.R., Ainsworth T.L., Du L., Schuler D.L., Cloude S.R. Unsupervised classification of polarimetric SAR imagery based on target decomposition and wishart distribution. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, vol. 37, no. 5, pp. 2249–2258.
22. Kirbizhekova I.I., Batueva E.V. H-A- α -classification of ALOS data on the Selenga delta. *Russian Physics Journal*, 2010, vol. 53, no. 9/2, pp. 25–26. In Rus.
23. Freeman A., Durden S.T. A three-component scattering model for polarimetric SAR data. *IEEE Trans. GRS*, 1998, vol. 36 (3), pp. 963–973.

Received: 30 October 2015.

Information about the authors

Irina I. Kirbizhekova, Cand. Sc., associate professor, senior researcher, Physical Institute of Materials Science.

Elizaveta V. Batueva, Cand. Sc., associate professor, scientific secretary, Institute of Physical Materials Science.