

Комплексный анализ результатов оптических и радиолокационных наблюдений лесных покровов

В.П. Саворский¹, А.И. Захаров¹, Л.Н. Захарова¹, С.М. Маклаков¹,
О.Ю. Панова¹, С.И. Чумаченко²

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
Фрязино, Московская обл., Россия
E-mail: savor@ire.rssi.ru*

² *Московский государственный университет леса
Мытищи, Московская область, Россия
E-mail: chumachenko.s.i@gmail.com*

В работе представлены методические подходы, обеспечивающие проведение полного и корректного анализа наблюдений типовой лесной территории средней полосы Европейской части России совместно радиолокатором L-диапазона с синтезированной апертурой PALSAR и оптической аппаратурой AVNIR-2 с японского природноресурсного ИСЗ ALOS-2. Основной целью работы является выявление и уточнение комплексных зависимостей удельных эффективных площадей рассеяния на HH и HV поляризациях и спектральных яркостей в видимом и ближнем ИК диапазонах от породного состава, возраста и среднего запаса древостоя в летний и зимний периоды, для чего наряду с данными измерений с ИСЗ ALOS-2 в работе привлекались данные лесоинвентаризации. При этом существенное внимание было уделено обеспечению физической однородности базовых объектов анализа – выделов. Разработанные методики были применены к данным спутниковых наблюдений на полигонах опытного лесного хозяйства «Русский лес». Полученные результаты свидетельствуют о существенном потенциале радиолокационных средств космического наблюдения за состоянием лесных покровов, типовых для центра Европейской части России. При этом подтверждена применимость разработанных алгоритмов для картирования индикативных характеристик леса.

Ключевые слова: спутниковое дистанционное зондирование, поляриметрический PCA L-диапазона, запас древостоя, сигнатуры леса, удельная эффективная площадь рассеяния, спектральная яркость.

Введение

В работе (Саворский и др., 2012) была исследована применимость поляризационных радиолокационных измерений L-диапазона для оценок среднего запаса древостоя типовых лесов средней полосы Европейской части России. Было показано, что для однородных выделов таких лесных территорий использование радиолокационных данных L-диапазона для определения запаса древостоя перспективно. Вместе с тем проведенный в работе анализ показал необходимость дальнейшего развития метода с тем, чтобы обеспечить устойчивость и повысить точность оценок запаса древостоя по данным ДЗЗ.

Данная работа посвящена развитию предложенного в (Саворский и др., 2012) подхода. Для этого в работе в качестве дополнительной информации привлечены данные каналов оптического и ближнего ИК диапазонов радиометра AVNIR-2. Таким образом, работа базируется на совместном анализе данных удельных эффективных площадей рассеяния (УЭПР) на HH и HV поляризациях радиолокатора L-диапазона с синтезированной апертурой PALSAR и спектральных яркостей (СЯ) каналов оптического и ближнего ИК-диапазонов радиометра AVNIR-2 ИСЗ ALOS-2, направленном на выявление

зависимостей характеристик данных этих комплексных наблюдений от запаса и вида лесной растительности средней полосы Европейской части России в летний и зимний период.

Данные ДЗЗ

Для тестирования были использованы данные зондирования лесных полигонов Данковского лесничества (Приокско-террасный заповедник) поляризационным радиолокатором L-диапазона PALSAR (PALSAR Reference Guide, 2007; Саворский и др., 2012) с рабочей частотой 1,27 ГГц (длина волны зондирования 23,6 см) и радиометра видимого / ИК-диапазонов AVNIR-2 (ALOS Data Users Handbook, 2008), полученного при наблюдениях с японского ИСЗ ALOS.

Для анализа, как и в (Саворский и др., 2012), были выбраны сеансы измерений в детальном режиме PALSAR на двух поляризациях HH и HV с синтезом, дающим пространственное разрешение на зондируемой поверхности порядка 25 м (при потенциально возможном порядка 10 м). Получаемое после усреднения эффективное разрешение позволяет исследовать большинство однородных выделов на исследуемых нами лесных полигонах, поскольку их типовые характерные размеры превышают 100–150 м.

Для анализа оптических / ИК наблюдений в работе использованы данные AVNIR-2 в каналах $0,42 \div 0,50$, $0,52 \div 0,60$, $0,61 \div 0,69$, $0,76 \div 0,89$ μm , полученные в летнем сезоне 2010 г. при наблюдениях тех же выделов, которые были исследованы радиолокатором PALSAR.

Характеристики исследуемого лесного покрова

Тестирование проводилось по территории опытного лесного хозяйства «Русский лес» (Данковское и Отраденское участковые лесничества), которое расположено в южной части Московской области вдоль левого берега реки Оки на территории двух административных районов – Серпуховского и Ступинского. Территория относится к подзоне хвойно-широколиственных лесов (Грибова и др., 1980). Характерной чертой современных лесов является практически полное отсутствие лесов зонального типа. Это связано с тем, что лесные массивы сформировались в результате сильных антропогенных воздействий (распашки, гари, многократные рубки) на протяжении последнего тысячелетия. В настоящее время в лесном покрове преобладают пионерные виды деревьев – береза (*Betula pendula*, *B. pubescens*), осина (*Populus tremula*) и сосна (*Pinus sylvestris*). Сосновые насаждения представлены в основном культурами разного возраста. Зональным типом растительности являются полидоминантные елово-широколиственные леса, включающие как широколиственные виды деревьев (*Quercus robur*, *Tilia cordata*, *Acer platanoides*, *Ulmus glabra*, *U. laevis*, *Fraxinus excelsior*), так и ель (*Picea abies*) (см. распределение породного и возрастного состава Данковского лесничества на *рис. 1*).

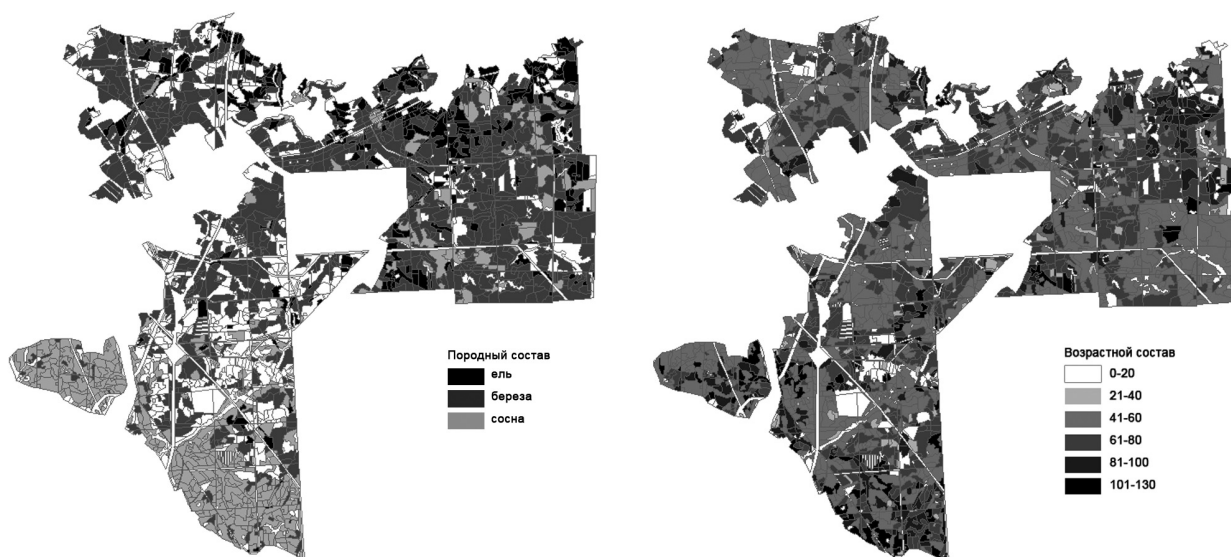


Рис. 1. Распределение породного и возрастного состава Данковского участкового лесничества

Методика выбора однородных выделов

Комплексный анализ радиолокационных и оптических данных проведен для физически однородных выделов. Это сделано для повышения достоверности оценок при использовании однородных участков в качестве обучающей выборки. На *рис. 2* сопоставлены типовые однородные и неоднородные по возрасту и породному составу участки исследуемой лесной территории.

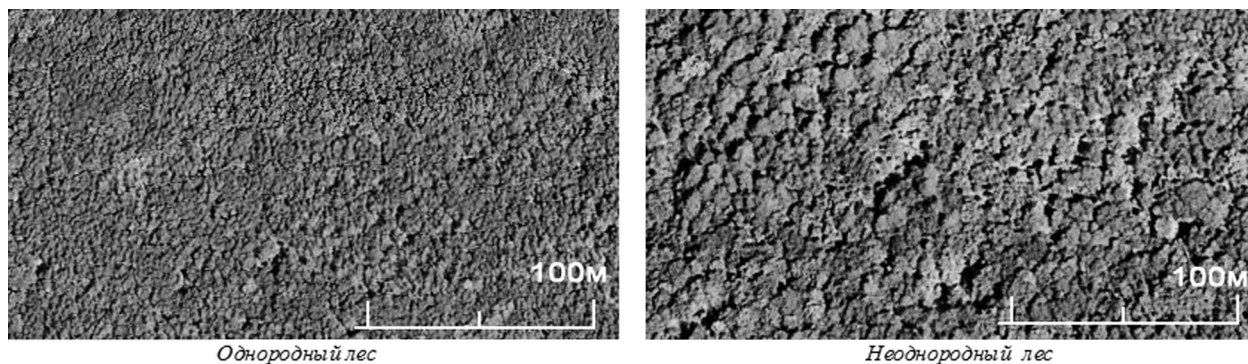
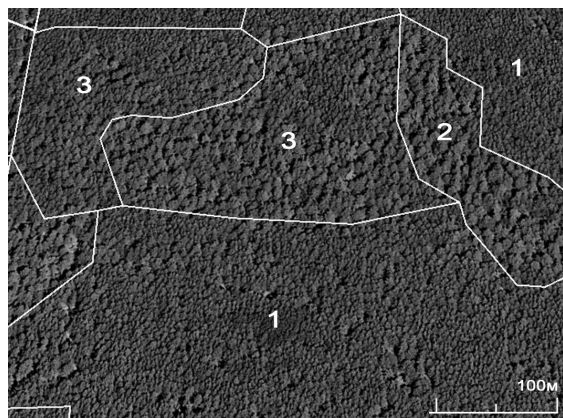


Рис. 2. Однородный и неоднородный участок Данковского лесничества

При выборе данных для анализа были учтены следующие критерии, которым должны соответствовать однородные участки.

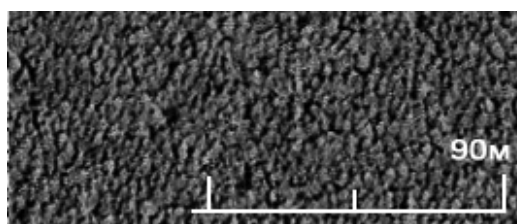
1. *Критерий однородности* породного и возрастного состава выделов по лесотаксационным показателям, подтверждаемым финишным визуальным контролем (*рис. 3*), включающий следующую совокупность условий:
 - анализируемые породы (береза, сосна, ель) должны иметь достаточные для статистического анализа размеры выделов и достаточный для достоверных выводов объем выборки;

- доля преобладающей породы в насаждении должна быть не менее 80%, что соответствует чистым и условно-чистым насаждениям;
- полнота древостоя, степень плотности стояния деревьев в древостое, характеризующая долю использования ими занимаемого пространства, должна составлять не менее 0,8;
- для анализа выбраны две возрастные категории древостоя: первая категория – 30–60 лет, вторая категория – 60–100 лет (рис. 3, 4).

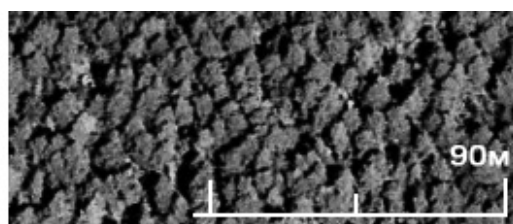


1 – однородный лес, сосна до 40 лет
2 – однородный лес, сосна более 60 лет
3 – неоднородный лес

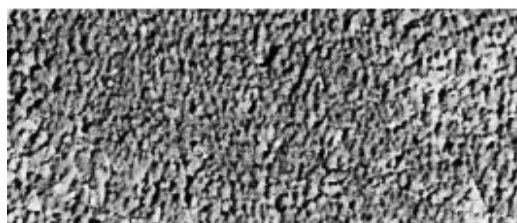
Рис. 3. Реальные выделы с однородными и неоднородными участками леса



Сосна до 60 лет (на рис. 40 лет)



Сосна более 60 лет (на рис. 70 лет)



Ель до 60 лет (на рис. 40 лет)



Ель более 60 лет (на рис. 70 лет)



Береза до 60 лет (на рис. 45 лет)



Береза более 60 лет (на рис. 85 лет)

Рис. 4. Образцы породного и возрастного состава на однородных участках

2. Критерий чистоты выборки – исключение из анализа граничных пикселей с разными лесотаксационными характеристиками, когда относительная площадь внутриконтурной части граничного пиксела не превышает 66% (рис. 5).

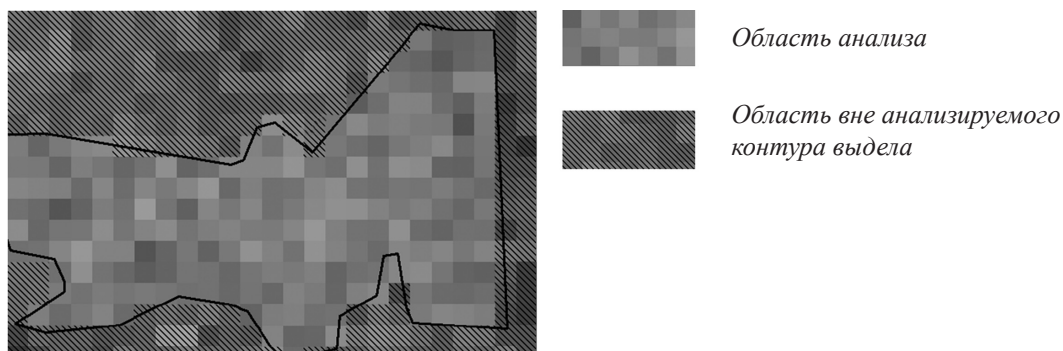


Рис. 5. Устранение пикселей, имеющих менее $\frac{2}{3}$ площади внутри контура выдела

3. Критерий обеспеченности размера выборки наличием достаточного объема выборки в данном выделе (> 70 независимых отсчетов), обеспечивающем достоверность и устойчивость статистических оценок.

В результате для статистического анализа были выбраны участки (выделы), представленные на рис. 6.



Рис. 6. Выбранные для анализа однородные выделы

Сигнатуры основных пород Данковского лесничества

Сигнатуры (в координатах УЭПР – СЯ каналов AVNIR-2) основных пород Данковского лесничества в летний период (по данным за июль 2010 г.) представлены на рис. 7 в виде усредненных по выбранным таксономическим признакам (порода + возраст) значениям СЯ и УЭПР. Несмотря на то, что данные представлены в относительных единицах, важно отметить существенное различие сигнатур синего и ближнего ИК каналов для березы по сравнению

с сигнатурами сосны и ели. Так, для синего канала существенно хуже различимы участки березы и сосны по сравнению с участками березы и ели. Для ближнего ИК канала имеем обратную зависимость. При совместном использовании оптических и радиолокационных данных различимость пород в обоих случаях удовлетворительная. Следует отметить, что данный подход применим ограниченно только в пределах одной природно-территориальной зоны в сходных сезонных условиях. При этом важно отметить, что при наличии в данной природно-территориальной зоне однородных участков с известной таксономией, т.е. при наличии, фактически, обучающей выборки, для определения породного состава могут быть использованы и некалиброванные данные. Следует отметить также значительное улучшение различения участков березового леса по двум возрастам при совместном использовании оптических (синий канал) и радиолокационных данных (по сравнению со случаем, когда использован только радиолокационный канал).

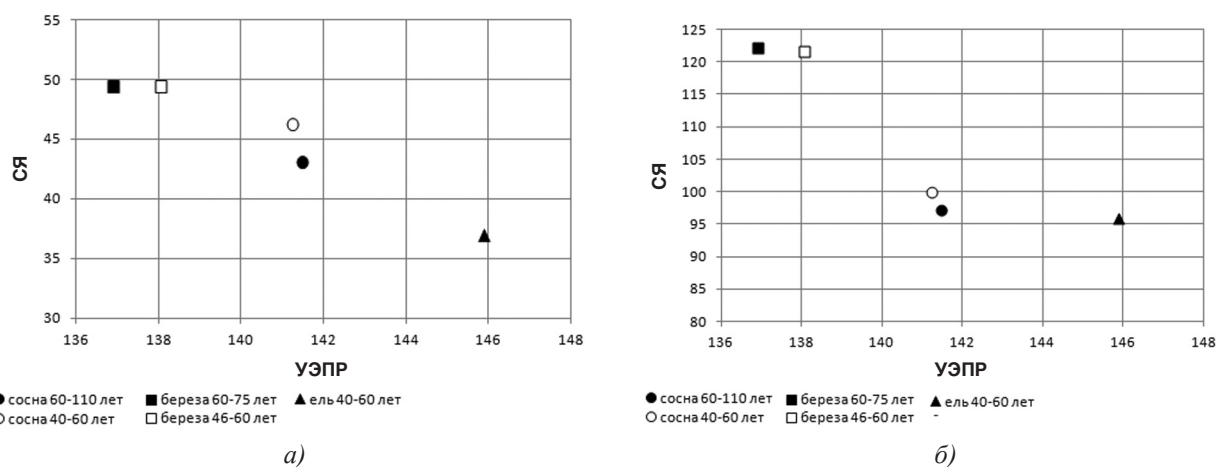


Рис. 7. Сигнатуры СЯ в зависимости от УЭПР (в относительных единицах) основных пород Данковского лесничества: а) 1-й канал: $0,42 \div 0,50$, б) 4-й канал: $0,76 \div 0,89$

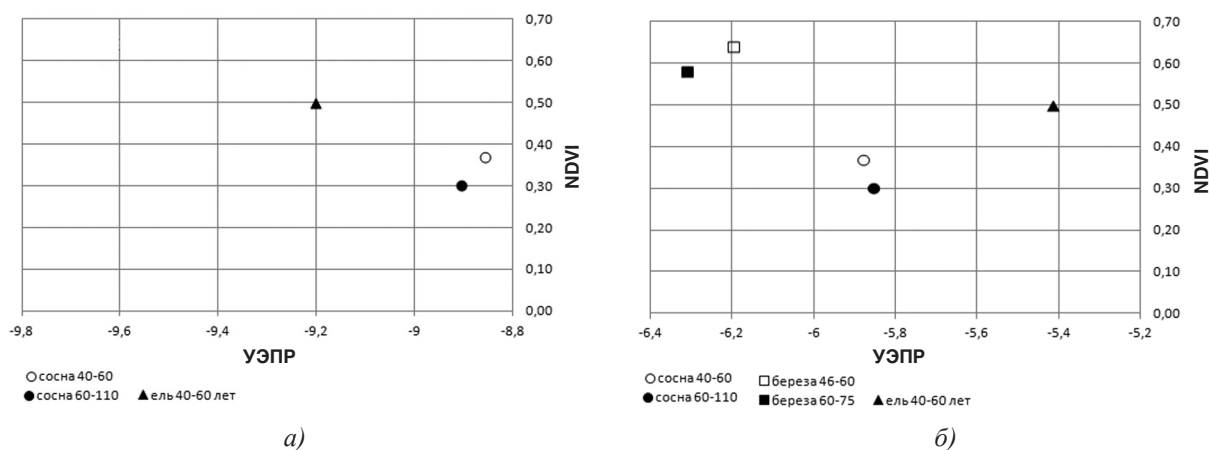


Рис. 8. Сигнатуры NDVI в зависимости от УЭПР. NDVI по данным летней съемки (10.08.2012), УЭПР: (а) зимняя (28.02.2010), (б) летняя съемка (10.07.2008)

Более надежное различение выбранных лесных территорий по таксономическим признакам «порода + возраст» дает использование сигнатур в координатах NDVI – УЭПР. При этом возможно, как видно из рис. 8, устойчивое различение пород вне зависимости от сезона как по совместным данным, так и по показателям УЭПР или NDVI. Выделение участков по возрасту имеет значительно меньшую (рис. 8) надежность.

Зависимости УЭПР и NDVI от запаса древесины

Рассчитанные по данным PALSAR показатели средних значений УЭПР L-диапазона в зависимости от средних запасов древесины приведены на *рис. 9*. *Рис. 9а* и *9б* показывают, что УЭПР на HH поляризации L-диапазона возрастает примерно на 0,75 dB в зимний период и на 1 dB в летний период при возрастании среднего запаса древесины от 0 до 400 м³. УЭПР на HV L-диапазона поляризации возрастает примерно на 1,5 dB в летний период при возрастании среднего запаса древесины от 0 до 400 м³. Важно отметить также резкое падение УЭПР на HV поляризации в диапазоне средних запасов ниже 50 м³.

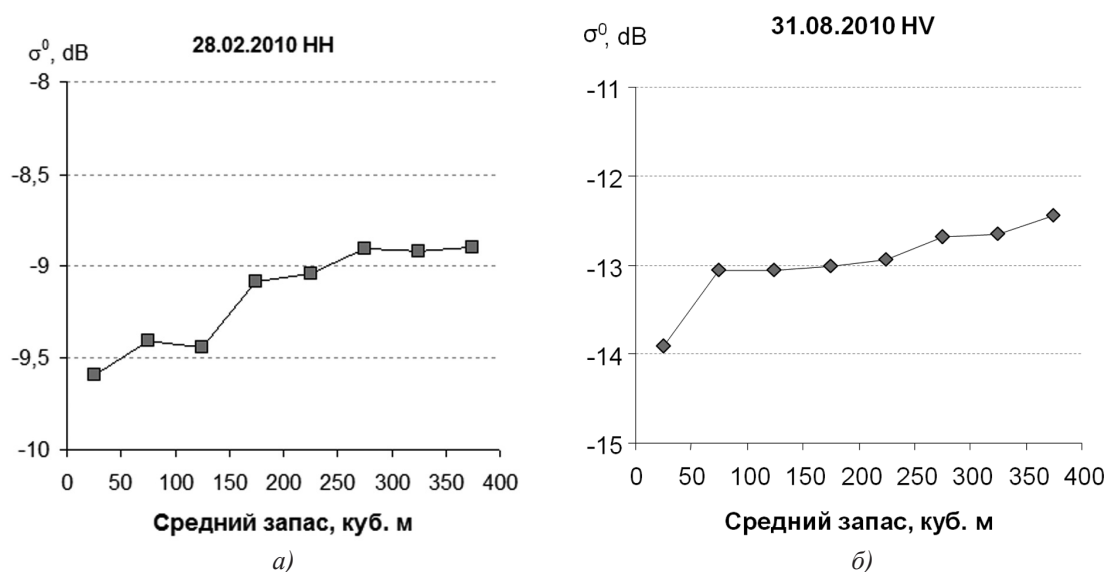


Рис. 9. Зависимость средних значений УЭПР на L-диапазона от средних запасов древесины: а) зимний период, HH поляризация; б) летний период, HV поляризация

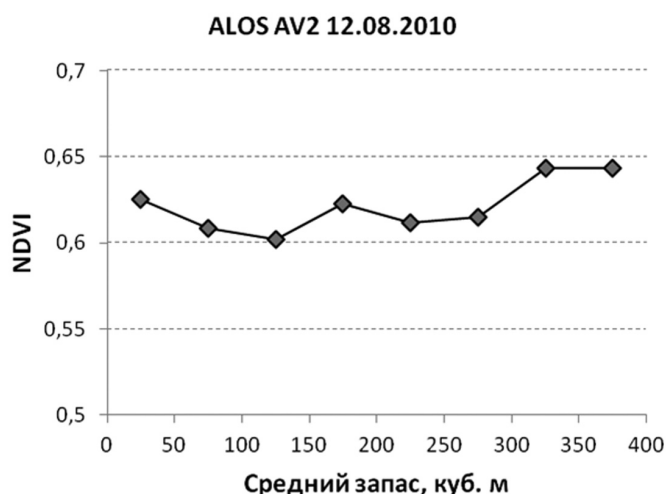


Рис. 10. Зависимость NDVI от средних запасов древесины в летний период (без выделения породного состава)

Рассчитанные по данным AVNIR-2 показатели NDVI в зависимости от среднего запаса древесины по выделу вне зависимости от породного состава даны на *рис. 10*. Видно, что NDVI в летний период практически не зависит от запасов для лесных территорий, сходных по своим

природно-климатическим и лесотаксационным характеристикам с территорией Данковского лесничества. На *рис. 11* рассчитанные по данным AVNIR-2 значения NDVI от среднего запаса древостоя по выделу даны для березы (а) и сосны (б).

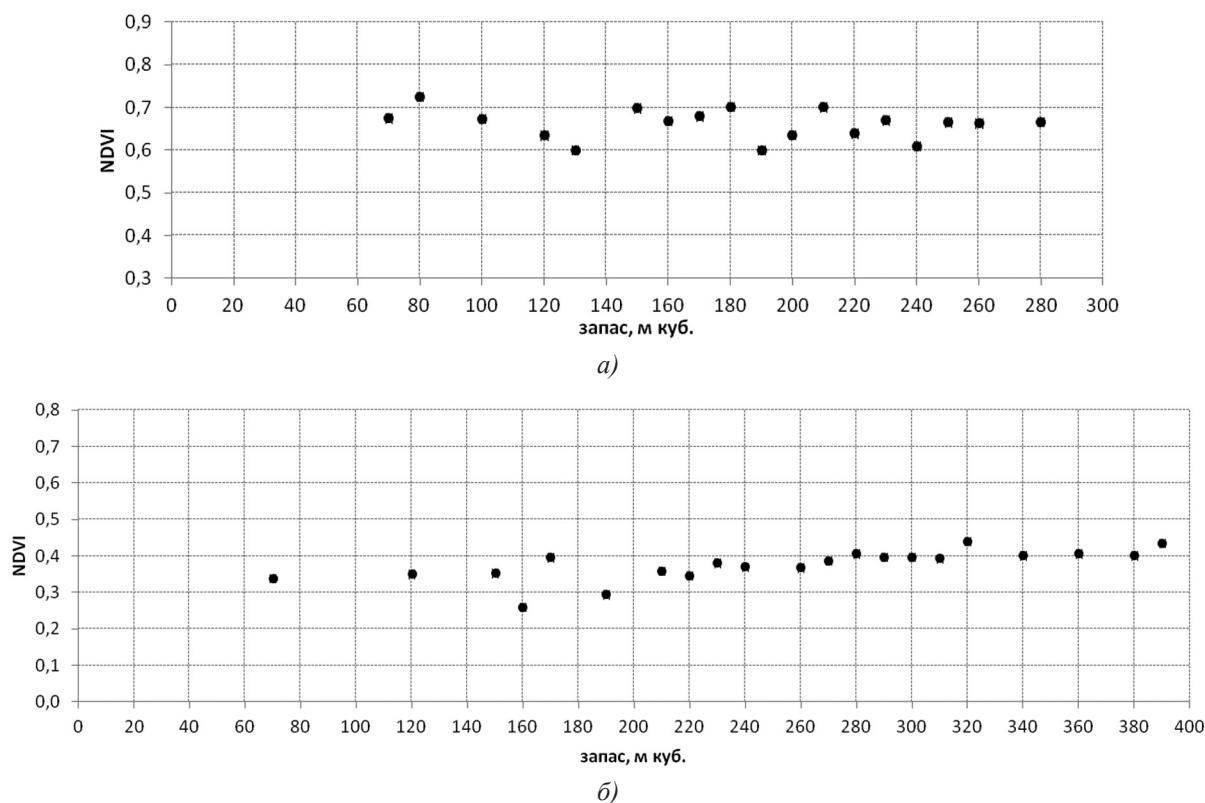


Рис. 11. Зависимость NDVI от средних запасов древостоя в летний период для березы (а) и сосны (б)

Восстановление линии почвы

Важным элементом тестирования является оценка среднего контраста при наблюдении контролируемого / целевого объекта по отношению к результатам наблюдения в его отсутствие. В нашем случае это наблюдения лесных участков по отношению к безлесым участкам. В качестве безлесых (а точнее участков с малыми значениями среднего запаса) мы выбрали участки со средними запасами менее 5 м³. Результаты такого анализа (*рис. 12*) показывают наличие значимого контраста между открытыми и облесенными участками на уровне приблизительно 5 dB на обеих поляризациях L-диапазона как в зимний, так и в летний периоды. Это свидетельствует о существенном потенциале радиолокационных средств космического наблюдения за состоянием лесных покровов, типовых для центра Европейской части России. Значительные контрасты между облесенными и открытыми участками наблюдаются и в оптическом диапазоне. При этом разность значений NDVI таких участков – превышает 0,4 (*рис. 12в*).

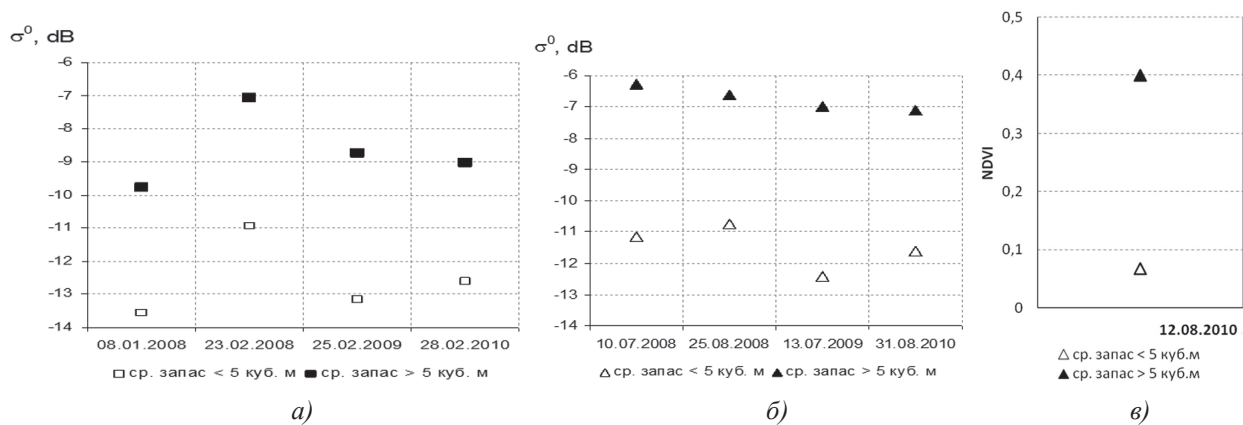


Рис. 12. Средние значения УЭПР на НН поляризации в зимний (а) и летний (б) сезоны выделов с малыми (< 5 м³) и значимыми (> 5 м³) средними запасами древостоя. (в) Значения NDVI в летний период

Зависимость NDVI от УЭПР

Зависимость показателей NDVI (AVNIR-2) от УЭПР (PALSAR) в летний период для выделов с преобладанием сосны Данковского лесничества показана на рис. 13.

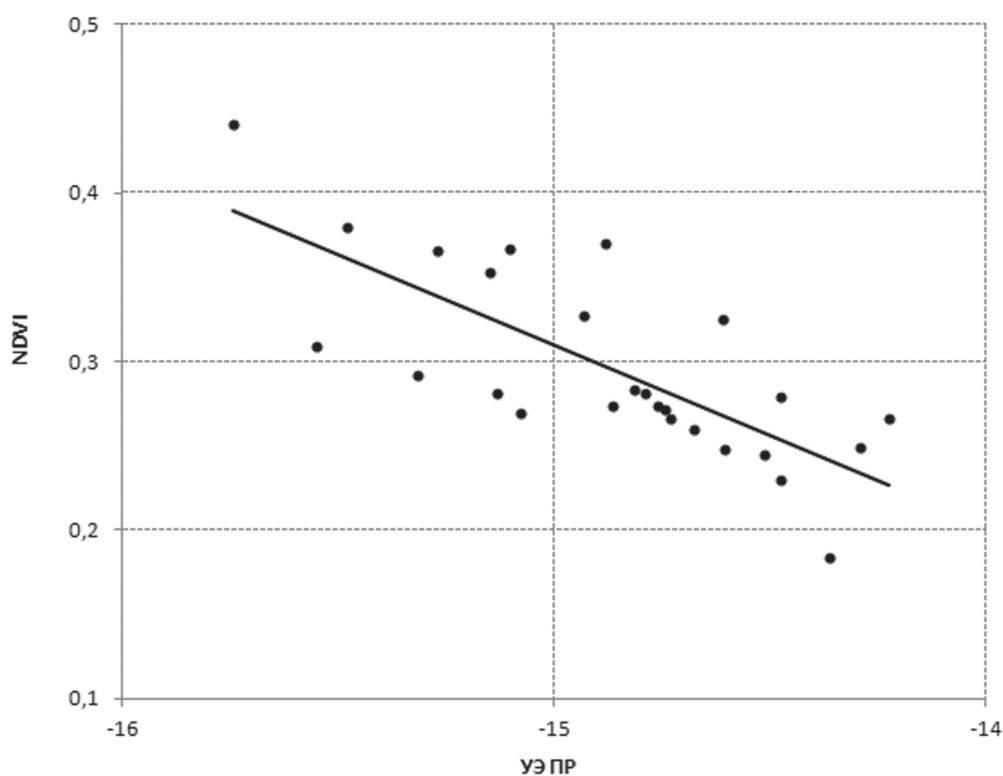


Рис. 13. Зависимость NDVI от УЭПР для участков сосны в летний период

Видна частичная линейная зависимость между этими параметрами с $R^2 = 0,5646$:

$$NDVI = -0,1074\sigma - 1,3009,$$

где σ – УЭПР в L-диапазоне. Это указывает на наличие как общего, так и частных факторов между оптическими и радиолокационными характеристиками выделов сосны Данковского

лесничества. Для получения достоверных статистических характеристик этих факторов необходимо увеличение объема анализируемой выборки, т.е. помимо данных Данковского лесничества включать в анализ и данные по примыкающим к нему или однотипным по природно-климатическим условиям лесничествам.

Выводы

Показано, что по данным поляриметрической радиолокационной съемки Земли в L-диапазоне возможно надежное разделение облесенных и безлесых участков лесной территории. Также возможно разделение лесов по преобладающим породам деревьев на хвойные или лиственные леса и выделение редколесья, заросшего кустарником. Для классификации типов лесов перспективным представляется одновременное использование данных L-диапазона на согласованной и ортогональной поляризациях.

Для определения запаса древостоя необходимо использовать как данные на HH, так и данные на HV поляризации. Методы определения параметров лесных экосистем (вид растительного покрова, запас древостоя, возрастной состав и др.) по уровню УЭПР, как показали результаты тестирования на опытном полигоне, могут успешно применяться для картирования индикативных характеристик леса.

Данные оптических каналов позволяют разделять участки леса по породному составу; вместе с тем, не обнаружено сколь-нибудь значимой зависимости регистрируемых яркостей от запаса древостоя. Поэтому оптические данные могут быть использованы для определения запаса древостоя только в качестве дополнительной информации к данным радиолокационных съемок L-диапазона.

Литература

1. Грибова С.А., Исаченко Т.И., Лавренко Е.М. Растительность Европейской части СССР // Л.: Наука, 1980. 236 с.
2. Саворский В.П., Захаров А.И., Захарова Л.Н., Каевицер В.И., Маклаков С.М., Панова О.Ю., Чумаченко С.И., Чухланцев А.А. Вариации УЭПР L-диапазона, отражающие изменчивость лесотаксационных характеристик лесных территорий // Пятая Всероссийская научная конференция. Муром, 26–28 июня 2012 г. Муром: Полиграфический центр МИ ВлГУ, 2012. С. 242–246.
3. ALOS Data Users Handbook. Earth Observation Research and Application Center Japan Aerospace Exploration Agency, March 2008.
4. PALSAR Reference Guide. 3rd Edition. Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC), March 2006.

Complex analysis of results of optical/radar forest observations

V.P. Savorskiy¹, A.I. Zaharov¹, L.N. Zaharova¹, S.M. Maklakov¹,
O.Yu. Panova¹, S.I. Chumachenko²

¹ *Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Department
Fryazino, Moscow Region, Russia*

E-mail: savor@ire.rssi.ru

² *Moscow State Forest University*

Mytishi, Moscow Region, Russia

E-mail: chumachenko.s.i@gmail.com

Methodical approaches enabling full and correct analysis of results registered above typical forest territory in midland of the European part of Russia by simultaneous observations of L-band SAR PALSAR and visible/IR radiometer AVNIR-2 from board of Japanese satellite of ALOS-2 are presented. Main purpose of work is to retrieve and to precise complex dependences of specific radar cross section (SRCS) on HH and HV polarization and spectral brightness (SB) in visible and Near Infrared bands from species, age and an average standing forest stock during summer and winter seasons. To this end the forest census data are engaged in work along with EO data for observed forest plots. Essential attention was paid to ensuring physical homogeneity of basic objects of analysis – forest plots. The developed techniques were applied to EO data for sites of experimental forestry “Russian wood”. Received results give evidence on the essential potential of SAR for EO of forest state retrieval in conditions typical for midland of the European part of Russia. In addition applicability of developed algorithms for mapping of indicative characteristics of Russian woods is confirmed.

Keywords: satellite remote sensing, polarimetric L-band SAR, wood stock, wood signature, specific radar cross section, spectral brightness.