Дистанционные оптико-микроволновые измерения параметров леса: современное состояние исследований и экспериментальная оценка возможностей

Т. Н. Чимитдоржиев, А. В. Дмитриев, И. И. Кирбижекова, А. А. Шерхоева, А. К. Балтухаев, П. Н. Дагуров

Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, 670047, Россия E-mail: tchimit@ipms.bscnet.ru

Представлен обзор современных направлений дистанционного зондирования (ДЗ) леса при совместном использовании оптической мультиспектральной съёмки, данных радиолокационной интерферометрии и частично поляриметрии. На основе анализа публикаций последних лет показано, что рассматриваемый комплексный подход позволяет расширить возможности ДЗ по оценке таксационных параметров леса по сравнению с технологиями, предполагающими анализ характеристик только радиолокационными или оптическими мультиспектральными методами. В экспериментальной части кратко описаны алгоритмы обработки оптических и радиолокационных поляриметрических данных для определения преобладающей породы, сомкнутости лесного полога, объёма надземной биомассы. Для одного из ключевых таксационных параметров леса — средней высоты — методика расчёта описана более подробно и проведён детальный анализ точности радиолокационных интерферометрических измерений, основанный на результатах, полученных авторами. Установлено систематическое занижение действительной высоты леса: расхождение результатов радарной интерферометрии и подспутниковых измерений достигает 5,5 м при значениях полноты древостоя 0,5; 0,9 и 1, а при полноте от 0,6 до 0,8 изменяется в диапазоне от 2 до 4 м. Сделан вывод о необходимости корректировки результатов радарной интерферометрии путём добавки соответствующих величин, полученных для различных значений полноты леса. Результаты дистанционных оптико-микроволновых измерений параметров леса размещены в интернете в соответствии с современными тенденциями свободного распространения научных данных.

Ключевые слова: радиолокационная интерферометрия, радиолокационная поляриметрия, спектральный анализ, текстура изображений, комбинирование данных, таксация леса

Одобрена к печати: 10.07.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-9-24

Введение

В последнее время на околоземную орбиту, наряду с новыми оптическими мульти- и гиперспектральными сенсорами высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, выведены несколько радиолокационных систем с синтезированной апертурой (PCA), которые позволяют получать новые знания на основе технологий дистанционного зондирования. Например, интерферометр TerraSAR-X/TanDEM-X (далее — TanDEM-X) позволил выполнить построение глобальной цифровой модели рельефа и местности с пространственным разрешением на местности 12 м для всей земной поверхности. Следует отметить и PCA ALOS-2 PALSAR-2 — единственную в настоящее время работающую в дециметровом диапазоне длин волн (L-диапазон). Радиолокация в дециметровом диапазоне длин волн (в данном случае 23,5 см), вследствие большей проникающей способности по сравнению с коротковолновыми диапазонами, в определённой мере позволяет выполнять более детальную оценку биофизических параметров леса и оценивать особенности рельефа местности под лесным пологом со средними значениями запаса древостоя.

Признанными лидерами в России в области дистанционного зондирования лесов по данным оптических спутниковых систем являются Институт космических исследований РАН и Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, которые выполняют исследования по тематическому картографированию и оценке характеристик бореальных лесов. Ими реализована система мониторинга ИСДМ-Рослесхоз (https://nffc.aviales.ru/main pages/index. shtml) и сервис ВЕГА-Science (http://sci-vega.ru/). Создание подобных информационных технологий — мировая тенденция (Миллер, 2010). Современные требования потребителей к оперативности получения конечных информационных продуктов обуславливают необходимость скорейшего внедрения потоковых (непрерывных), максимально автоматизированных технологий обработки спутниковых данных ДЗЗ (Бондур, 2014; Дмитриев и др., 2014а; Лупян, Саворский, 2012; Лупян и др., 2011, 2012). Такие продукты необходимы для решения разнообразных задач, например контроля пожароопасной обстановки и паводковой ситуации, вырубки леса и др. (Барталев и др., 2016). Значительные результаты в области создания автоматизированных систем потоковой обработки данных дистанционного зондирования леса на основе снимков оптического диапазона получены в НИИ «Аэрокосмос», Институте леса им. В. Н. Сукачева СО РАН и ряде других НИИ. Исследования различных типов земных покровов в микроволновом диапазоне, проведённые российскими учёными, достаточно полно описаны в работе (Дмитриев и др., 2014а), поэтому здесь не приводятся.

За рубежом, помимо указанных методов дистанционного зондирования леса в оптическом диапазоне, используют спутниковую радиолокацию в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн и разрабатывают алгоритмы совместного использования оптических и микроволновых радарных данных. Комплексирование оптических и радиолокационных изображений, а также снимков только оптического или микроволнового диапазонов, но полученных различными спутниковыми сенсорами, осуществляется для различных целей и разными способами. Так, в последние несколько лет на крупнейшем мировом научном симпозиуме International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) исследования по данной тематике регулярно выделяются в несколько отдельных направлений (секций для заседаний), традиционно уже именуемых Image and Data Fusion или Image and Data Fusion Тесhniques. При этом образовалось отдельное направление, связанное с растительностью, что подтверждает востребованность данных исследований в мире.

Актуальность исследований и, в некоторой степени, тенденции в развитии новых направлений достаточно эффективно можно отследить на научных веб-порталах типа www. researchgate.net. Так, в конце апреля 2017 г. была создана веб-страница (https://www. researchgate.net/project/LCX-SAR-Multi-Frequency-SAR-Data-Fusion-in-Support-of-Global-Climate-Monitoring), где анонсировано новое исследование LCX-SAR: Multi-Frequency SAR Data Fusion in Support of Global Climate Monitoring. Основная его цель — мониторинг климатических изменений с использованием радиолокационных систем диапазонов L, C, X. В качестве индикаторов климатических изменений планируется использовать биофизические параметры тропических лесов Республики Конго и динамику ледников в Антарктике и Гренландии, которые будут получены на основе временных рядов спутниковых многочастотных радиолокационных измерений.

Одна из задач данной работы заключается в том, чтобы наряду с описанием современных тенденций в рассматриваемой области показать на реальном примере возможности совместного использования оптических мультиспектральных снимков и данных радарной интерферометрии (РИ) и, в некоторой степени, поляриметрии для более полного картографического представления результатов дистанционных измерений биофизических (таксационных) параметров леса. В отечественной литературе мало изучены возможности радарной интерферометрии средней высоты леса. В настоящем исследовании сделана попытка восполнить этот пробел и более подробно рассмотреть данную составляющую оптико-микроволновых дистанционных измерений. Напротив, методы и технологии оценки других рассматриваемых здесь параметров достаточно хорошо изучены, а результаты опубликованы, поэтому этой части исследований будет уделено меньшее внимание.

Результаты работы в виде картографического материала представлены в интернете, что даёт возможность заинтересованным специалистам использовать эти данные в качестве тестового участка для дальнейших исследований.

Современные тенденции комплексного использования оптических и радиолокационных изображений

В микроволновом диапазоне электромагнитного спектра, как уже отмечено, проникающая способность радиолокационного эхо-сигнала в какую-либо среду зависит от длины волны. Действующие на данный момент космические радиолокационные системы функционируют в диапазонах X, C, L, a соответствующие длины волн составляют 3,1 см (TanDEM-X, Cosmo-SkyMed 1-4); 5,6 см (RADARSAT-2, Sentinel-1A, 1B); 23,5 см (ALOS-2 PALSAR-2). В ряде работ (Remote..., 2003) считается, что в X-диапазоне обратное радарное рассеяние происходит от верхнего полога, а волна с длиной 24 см преимущественно проникает через всю толщу леса и отражается от подстилающей поверхности (*puc. 1*). Волны промежуточного C-диапазона рассеиваются неоднородностями в виде ветвей верхней части сплошного лесного полога. В оптическом диапазоне солнечное излучение отражается от листвы и хвои, позволяя на основе мультиспектрального анализа данных классифицировать лес по породному составу и оценить степень угнетённости растительного покрова (Ефременко и др., 1997). Также в последнее время получен ряд новых результатов, позволяющих оценить биомассу леса по зимним снимкам (Жарко и др., 2017).

Рассмотрим основные способы и методы комплексирования, конечной целью которых является получение более точной оценки биофизических параметров леса или улучшение визуальной интерпретации пространственных особенностей земных покровов. Здесь мы сознательно сужаем обзор современного состояния исследований, поскольку к понятию комплексирование или data fusion относится множество направлений совместного использования данных дистанционного зондирования. Остановимся на задачах, актуальных для лесного хозяйства, которые могут быть решены при помощи данных ДЗЗ: определение породного состава и особенности рельефа под лесным пологом, оценка средней высоты и запаса (надземной биомассы) древостоя, выявление пространственно-временных изменений (прореживание или зарастание).

Задача определения породного состава традиционна и решаема на основе использования мультиспектральных изображений (Гаврилюк, Ершов, 2013; Beaudoin et al., 2014; Colgan et al., 2012; Engler et al., 2013; Jaaskelainen et al., 1994; Le Maire et al., 2008; Schepaschenko et al., 2011; Soudani et al., 2006; Wilson et al., 2012). Глобальные карты рельефа SRTM (с разрешением 90 м) и относительно новые TanDEM-X (достаточно точные для безлесных участков) позволяют в какой-то мере оценить особенности рельефа на редколесье и под лесным пологом, однако необходим более точный картографический материал для участков, покрытых густым лесом с высокими значениями надземной биомассы (древостоя).

В работе (Deutscher et al., 2017) показано, что при выявлении степени изменений тестовых участков леса площадью более 0,5 га наилучший результат по точности классификации — 98 % — был получен на основе данных С-диапазона радара Sentinel-1; для ALOS PALSAR (L-диапазон) этот показатель составил 76 %, для TerraSAR-X (X-диапазон) — 96 %. Там же указывается, что метод оценки изменений леса, основанный на расчёте коэффици-

ента вариаций, может быть адаптирован к оперативной обработке многочастотных данных и к комплексированию с оптическими снимками. Одна из последних работ в данной области знаний (Reiche et al., 2018) посвящена комбинированию изображений радаров Sentinel-1 и ALOS-2 PALSAR-2 с мультиспектральными данными Landsat.

Рис. 1. Иллюстрация рассеяния электромагнитных волн разных диапазонов лесным пологом (Remote..., 2003)



При помощи такого комбинирования авторам удалось добиться более частого временного ряда, что позволило улучшить временную составляющую мониторинга деградации тропических лесов.

Традиционным методом комплексирования спутниковых изображений, полученных разными сенсорами, является ложноцветовое представление для визуального распознавания различных типов земной поверхности. Например, в работе (Haack, Mahabir, 2017) показано, что наилучшей для псевдоцветового представления является следующая комбинация: снимок ASTER в красном диапазоне спектра, изображение вариаций текстуры Radarsat-2 в С-диапазоне на кроссполяризации и изображение интенсивности обратного радарного рассеяния ALOS PALSAR в L-диапазоне спектра на кроссполяризации. Данный результат, по нашему мнению, демонстрирует наметившуюся тенденцию, которая предполагает увеличение доли радиолокационной информации в общем объёме данных ДЗЗ, используемых для целей мониторинга.

С увеличением количества аэрокосмических сенсоров возникла необходимость оценки возможности их использования для построения цифровых моделей средней высоты леса (Tian et al., 2017). В данной работе представлены результаты исследования по четырём тестовым площадкам леса. Наилучшие показатели демонстрируют цифровые стереокамеры, лидар самолётного базирования и WorldView-2, далее — TanDEM-X и Cartosat, наихудшая цифровая модель получена ALOS/PRISM и Rapid-Eye. В настоящее время значительная часть исследований в области спутниковой радиолокации леса посвящена уточнению результатов и погрешности измерений при определении средней высоты леса по интерферометрическим измерениям TanDEM-X, при этом в качестве эталонных измерений используются данные лазерной локации и полевых измерений. В целом полагается, что необходима калибровка данных интерферометрии для различных типов леса (Goodenough et al., 2016; Puliti et al., 2017). Например, в исследовании (Sadeghi et al., 2015) установлено, что для лиственных лесов существенно наличие листвы при оценке интерферометрической высоты деревьев: с листвой ошибка составила 1,9 м, без листвы — 2,4 м. В работе (Feng et al., 2016) сделаны попытки оценить вертикальную структуру леса. Вместе с тем получены результаты по определению высоты отдельных деревьев (Schmitt et al., 2016).

Статистика публикаций по тематике совместного использования оптических и радиолокационных данных, приведённая в (Joshi et al., 2016), показывает, что за период с 1996 по 2015 г. из 112 публикаций, индексируемых в базе Web of Science (WoS), в 32 отмечается синергетический эффект увеличения информации при комплексировании. При этом 75 статей описывали результаты по классификации земных покровов, 24 публикации были посвящены оценке параметров леса и т.д. Наибольшее количество исследований связано с комплексированием оптических данных Landsat и радарных ALOS PALSAR. В значительной части публикаций по комплексированию использовались спектральные коэффициенты отражения и соответствующие спектральные кривые, на основе которых рассчитывалось проективное покрытие растительностью (leaf area index), различные вегетационные индексы и комбинации каналов. Радиолокация была задействована в виде величин ЭПР (эффективная поверхность рассеяния) на различных поляризациях, и лишь в одной работе использовались поляриметрические декомпозиции.

В значительной части исследований в области совместного использования оптических и радарных изображений (индексируемых в WoS до 2016 г.) комплексировали данные перед последующей классификацией или моделированием; в 16 работах, наоборот, сначала выполняли моделирование или классификацию, а потом совмещали результаты. В трёх исследованиях выполнялось несколько разных видов обработки. Следует отметить, что на момент подготовки обзора (Joshi et al., 2016) по данной тематике в WoS не индексировалось ни одной публикации из России.

Вышеуказанные обзорные статьи выявили, что большинство исследований было проведено на небольших нерепрезентативных участках, без сравнения используемых подходов и результатов между этими полигонами. До 2005 г. исследования в данной области проводились на основе спутниковых радарных изображений С-диапазона Radarsat-1 и ERS-1,2, а также авиационных данных. После запуска ALOS PALSAR возросло количество исследований с использованием данных L-диапазона. При этом данные ALOS PALSAR были использованы для исследований леса в Бразилии, Канаде, США и т.д. В ближайшей перспективе с учётом недавно запущенных космических радаров Sentinel-1A, 1B, ALOS-2 PALSAR-2, а также планируемых к запуску радаров P-диапазона BIOMASS (длина волны 75 см), L-диапазона SAOCOM, TanDEM-L и NISAR комплексирование радарных и оптических данных станет основным трендом в дистанционном зондировании лесных ресурсов, поскольку на порядок увеличится временное и пространственное покрытие наряду с политикой онлайн-доступа.

Таким образом, исходя из представленной статистики, следует отметить, что комплексирование оптических и радарных данных улучшает классификацию земных покровов, а запуск новых радарных спутников предполагает многократное увеличение количества исследований в данной отрасли знаний. Отсутствие аналогичных исследований в России, возможно, связано с несоответствием пространственного и временного покрытия радарными и оптическими данными и в целом с трудностью получения данных X- и L-диапазонов с достаточным покрытием для крупномасштабных исследований.

Практическое применение и онлайн-результаты

Выше было представлено описание современных методов и технологий комплексного дистанционного зондирования леса в оптическом и микроволновом диапазонах длин волн. Рассмотрим основные возможности комплексного подхода, а именно для определения преобладающей породы и сомкнутости леса, объёма надземной биомассы или запаса древостоя, средней высоты деревьев и особенностей рельефа под сплошным лесным пологом. Результаты работы, описание используемых данных ДЗЗ и месторасположение тестового полигона размещены в интернете (http://ipms.nextgis.com/resource/1/display).

Для оценки преобладающей породы и сомкнутости леса были использованы панхроматические и мультиспектральные данные оптико-электронного комплекса ГЕОТОН-Л1, установленного на российском спутнике «Ресурс-П» (пространственное разрешение 0,7 и 1,8 м соответственно). Относительная калибровка между спектральными каналами не соответствовала традиционным спектральным образам, поэтому для классификации лесной растительности был использован многоэтапный метод определения преобладающей породы. Обработка данных комплекса ГЕОТОН-Л1, полученных 20 мая 2017 г., проводилась в программном комплексе ENVI и была выполнена по следующему алгоритму: 1) предварительная обработка и формирование 4-слойного метафайла; 2) формирование и применение маски облачности; 3) атмосферная коррекция; 4) формирование маски лесной растительности на основе индекса NDVI с эмпирически подобранным пороговым значением 0,2; 5) классификация методом ISODATA (с количеством классов 10) с предварительной медианной фильтрацией снимков (размер окна обработки 5×5 пикселов при пространственном разрешении 1,8 м); 6) коррекция результатов кластерного анализа путём присоединения малочисленных классов к многочисленным со сходными спектральными характеристиками. В итоге получены три класса: сосна; лиственный лес (осина, берёза); смешанный лес (сосна, осина, берёза). Соответствие полученных спектральных классов/кластеров конкретным преобладающим породам определялось согласно таксационным данным и результатам наземного обследования, которое показало их полное соответствие. Результат представлен растровым слоем «Преобладающая порода» на веб-странице «Дистанционные оптико-микроволновые измерения параметров леса» http://ipms.nextgis.com/resource/1/display.

Для валидации и верификации результатов радиолокационных измерений была определена сомкнутость крон (проективное покрытие лесной растительностью). Для этого по изображению NDVI (см. выше п. 4 алгоритма обработки данных ГЕОТОН-Л1) с разрешением на местности 1,8 м было построено бинарное изображение «лес – не лес». По этому бинарному изображению рассчитывалась доля пикселей, занятых сплошным лесным пологом в скользящем окне размером 5×5 пикселей.



Рис. 2. Результат определения локальной сомкнутости лесного полога, размещённый в интернете

Результаты представлены на *puc. 2* и растровым слоем «Сомкнутость крон (плотность древостоя)» на веб-странице http://ipms.nextgis.com/resource/1/display. Легенду соответствия цветов в растре и сомкнутости можно увидеть в описании слоя. Для этого в дереве слоёв нужно выбрать выпадающее меню выделенного слоя и выбрать пункт «Описание» (см. *puc. 2*).

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием методов и подходов, описанных в научной литературе, апробированных и хорошо себя зарекомендовавших при проведении исследований (Гаврилюк, Ершов, 2013; Beaudoin et al., 2014; Colgan et al., 2012; Engler et al., 2013; Jaaskelainen et al., 1994; Le Maire et al., 2008; Schepaschenko et al., 2011; Soudani et al., 2006; Wilson et al., 2012).

Оценка объёма надземной биомассы может выполняться на основе величины коэффициента обратного рассеяния (Dobson et al., 1992; Englhart et al., 2011; Santoro et al., 2015; Zhang et al., 2017), значений интерферометрической или поляриметрической когерентности (Askne et al., 1997; Fransson et al., 2001; Gama et al., 2010; Li et al., 2015; Pulliainen et al., 2003), поляриметрических декомпозиций (Gonçalves et al., 2011; Sauer et al., 2010; Neumann et al., 2010) (для случая полностью поляриметрических изображений) и т.д. В данном конкретном примере ввиду отсутствия полностью поляриметрических радиолокационных изображений за 2016–2018 гг. классификация проводилась по данным радара ALOS-2 PALSAR-2 с двойной поляризацией (дата съёмки 28 августа 2017 г.): согласованной горизонтальной HH и кросс-поляризацией HV. Попытка классификации по величине обратного радарного рассеяния и по величинам интерферометрической и поляриметрической когерентности ещё раз подтвердила известный факт о пороге «насыщения» (в данном случае при объёме более $200 \text{ м}^3/\text{га}$), после которого классификация по объёму биомассы на основе данных физических величин затруднительна (Imhoff, 1995).

Для оценки величины биомассы были использованы ложноцветовые композиты, которые в некоторых случаях используются в качестве «базовых продуктов» радиолокации (Дмитриев и др., 2014б). Так, на основе фильтрованных (медианный фильтр с окном 5×5 пикселов) и исходных нефильтрованных амплитудных изображений строился RGB-композит в виде: R — фильтрованное изображение на HH-поляризации; G — фильтрованное изображение на HV-поляризации; B — нефильтрованное изображение на HV-поляризации (слой «Объём биомассы (ложноцветовой композит)»). Дальнейшая классификация леса по величине биомассы выполнялась на основе кластерного анализа с обучением методом максимального правдоподобия. При обучении классификатора были выбраны визуально однородные участки с преобладающими жёлтыми, зелёными и красными оттенками на ложноцветовом композите (*рис. 3*). Простой визуальный анализ показывает, что эти цветовые оттенки являются доминирующими для леса. Результаты классификации усреднялись (выбирался наиболее часто встречающийся класс) по выделам, которые соответствуют таксационному описанию.

В итоге были определены три класса с высоким, средним и низким объёмом биомассы, которые представлены векторным слоем «Объём биомассы, м³/га» (http://ipms.nextgis.com/resource/1/display). Полевые исследования на тестовых выделах позволили соотнести полученные классы с конкретным запасом древостоя, т.е. после разделения на классы по качественным характеристикам они были описаны количественно. Следует отметить, что указанная экспресс-оценка леса на наличие областей с различными запасами биомассы не претендует на точность и может быть выполнена при помощи различных «базовых продуктов радиолокации» (Дмитриев и др., 2014б).

Ранее в работах (Чимитдоржиев, 2014, 2016; Perko et al., 2011) была показана возможность РИ средней высоты деревьев по нескольким однородным тестовым участкам леса с полнотой древостоя 0,7 и средним диаметром стволов порядка 23 см. Там же достаточно подробно изложен процесс интерферометрической обработки радиолокационных данных, поэтому опустим это описание. Кратко отметим лишь, что при определении высоты деревьев по данным TanDEM-X выполняется расчёт цифровой модели местности (ЦММ), которая отображает относительные изменения высот с учётом сплошного покрытия кронами деревьев (*puc. 4*, см. с. 16). По данным дециметрового диапазона ALOS PALSAR строится цифровая модель рельефа (ЦМР) под лесным пологом в предположении, что радарный эхо-сигнал проходит всю толщу леса и отражается от подстилающей поверхности. Разность этих двух цифровых моделей является искомой средней высотой деревьев, как это показано на *puc. 4* (Perko et al., 2011).

Цифровая модель местности с пространственным разрешением 10 м рассчитана по данным TerraSAR-X/TanDEM-X за 4 сентября 2016 г. (бистатический режим). Размер интерферометрической базы составил 813,6 м, неоднозначность по высоте, соответствующая изменению интерферометрической фазы на один цикл 2π , — 6,7 м. Цифровая модель рельефа также с пространственным разрешением 10 м построена по интерферометрической паре изображений ALOS PALSAR за 11 января 2008 г. и 16 января 2010 г.



Рис. 3. Результат классификации по величине надземной биомассы, размещённый в интернете

Размер интерферометрической базы составил 1300,2 м, неоднозначность по высоте — 49,7 м. В дальнейшем данная ЦМР может быть использована для описания различных особенностей рельефа под лесным пологом, например величины уклонов рельефа (см. растровый слой «Уклоны рельефа» на веб-странице http://ipms.nextgis.com/resource/1/display).

Рассмотрим результаты РИ средней высоты деревьев применительно к сосновому лесу с полнотой 0,5 и выше, средним диаметром стволов по результатам подспутниковых измерений — более 20 см (*puc. 5*). Дополнительно для наглядности на *puc. 5* представлено расхождение ΔH натурных H_T и радиолокационных интерферометрических H_μ измерений высоты деревьев в среднем по выделу. Для ΔH указаны доверительные интервалы при вероятности 0,95. По оси абсцисс — полнота древостоя, по оси ординат — средняя высота и величина расхождения в среднем по выделу в метрах. Всего было рассмотрено 237 лесных выделов с полным таксационным описанием. На десяти выделах (см. слой «Результаты полевых измерений» на веб-ресурсе http://ipms.nextgis.com/resource/1/display) была проведена полевая проверка таксационных материалов, которая показала, что данные по преобладающей породе, средней высоте лесного полога, полноте древостоя и биомассе соответствуют описанию и могут быть использованы в качестве эталона для сравнения.



Рис. 4. Определение высоты леса по разности между цифровой моделью местности (ЦММ) и цифровой моделью рельефа (ЦМР)



Рис. 5. Результаты измерений средней высоты леса и величина расхождения измерений: $H_{\rm T}$ — высота по таксационным данным и полевые измерения, $H_{\rm u}$ — интерферометрическая высота, $\Delta H = H_{\rm T} - H_{\rm u}$



Рис. 6. Схематичное представление высот фазовых центров обратного радарного рассеяния: H_X — для Х-диапазона, H_L — для L-диапазона

Наименьшее расхождение, равное 2 м, отмечается при полноте 0,6: это относительно редкий лес — 15–20 деревьев на 100 м². Результат повторяет ранее полученные измерения (Чимитдоржиев, 2014, 2016), т.е. фазовые центры рассеяния радарного эхо-сигнала диапазона 3 см расположены на некой виртуальной площадке ниже верхушек деревьев на 2 м (см. H_x на *рис. 6*). Волна диапазона 24 см радара ALOS PALSAR, используемая для построения рельефа местности, пронизывает всю толщу лесного полога указанной полноты и рассеивается обратно земной поверхностью, т.е. в данном случае $H_L = 0$ (см. *рис. 6*).

Занижение интерферометрической средней высоты деревьев H_{μ} до 5 м при полноте леса 0,5, вероятно, связано с частичным рассеянием сигнала Х-диапазона от безлесного пространства между деревьями. Вследствие этого при усреднении интерферограммы TanDEM-X уменьшается средняя высота цифровой модели местности (лесного полога), т. е. фактически при построении ЦММ определённый вклад вносит ЦМР на безлесных участках (см. *puc. 4*). Построение цифровой модели рельефа по данным ALOS PALSAR выполняется корректно ($H_L = 0$, см. *puc. 6*). Данное предположение о суммарном вкладе в результирующую ЦММ рельефа на безлесных участках наряду с лесным пологом косвенно подтверждается максимальными расхождениями радарных интерферометрических и полевых измерений средней высоты леса от 1,1 до 8,7 м при средней величине расхождений порядка 5 м.

При значениях полноты 0,6–0,9 расхождение между действительной и интерферометрической высотой леса увеличивается от 2 до 5,5 м при достаточно стабильных значениях доверительного интервала $\pm 1,4$ м. Возможной причиной является недостаточная проникающая способность 24-сантиметровой волны ALOS PALSAR (H_L на *рис.* 6), приводящая к тому, что при полноте 0,7 фазовые центры рассеяния лесным пологом расположены в среднем на 1 м выше от поверхности; при полноте 0,8 — на 1,6–1,7 м выше уровня поверхности; при полноте 0,9 — на 3,5 м.

Для полноты 1,0 высота фазовых центров рассеяния радарного эхо-сигнала H_L смещается в пределах ±2,6 м при средней величине 3,5 м от уровня земной поверхности.

Заключение

Анализ исследований, представленных в обзорной части статьи, показал, что комплексирование данных различных спутниковых сенсоров (data fusion) существенно расширяет возможности дистанционных измерений биофизических параметров леса. Совместное использование оптических мультиспектральных снимков, данных радиолокационной интерферометрии и поляриметрии позволяет увеличить количество дистанционно определяемых характеристик, в том числе одной из важнейших — средней высоты леса.

В работе показано, что радарные интерферометрические измерения занижают действительную высоту леса в среднем на 5,5 м при значениях полноты древостоя 0,5; 0,9; 1 и на 2-4 м при значениях полноты 0,6-0,8. Существует возможность минимизировать ошибки при радарных интерферометрических измерениях высоты леса путём введения эмпирических поправок, которые могут иметь вид графика на *рис.* 5. Данный результат получен для конкретного лесного массива с преобладанием сосны. Для обобщения этих зависимостей необходимы дополнительные измерения в различных лесах.

Результаты дистанционных оптико-микроволновых измерений параметров леса размещены в интернете (http://ipms.nextgis.com/resource/1/display) в соответствии с современными тенденциями свободного распространения научных данных.

Работа выполнена в рамках государственного задания и при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-47-030001 р_а). Авторы признательны Японскому агентству аэрокосмических исследований JAXA за данные PALSAR-2, предоставленные по проекту RA6 № 1131, и немецкому аэрокосмическому центру DLR за данные TanDEM-X, предоставленные по проекту XTI_HYDR0485.

Литература

- 1. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
- 2. *Бондур В. Г.* Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исследование Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–16.
- Гаврилюк Е.А., Ершов Д. В. Тематическое картографирование породной структуры лесов на основе спутниковых изображений Landsat-TM/ETM+ // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: докл. 5-й Всерос. конф., посвященной памяти выдающихся ученых-лесоводов В.И. Сухих и Г.Н. Коровина. Москва, 22–24 апреля 2013. М.: ЦЭПЛ РАН, 2013. С. 112–115.
- 4. Дмитриев А. В., Чимитдоржиев Т. Н., Гусев М. А., Дагуров П. Н., Емельянов К. С., Захаров А. И., Кирбижекова И. И. (2014а) Базовые продукты зондирования Земли космическими радиолокаторами с синтезированной апертурой // Исследование Земли из космоса. 2014. №. 5. С. 83–83.
- 5. Дмитриев А. В., Чимитдоржиев Т. Н., Кирбижекова И. И., Дагуров П. Н., Базаров А. В., Гармаев А. М., *Емельянов К. С., Гусев М. А.* (2014б) Технология создания и применения базовых продуктов спутниковой радиолокации // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19. № 3. С. 5–13.
- 6. *Ефременко В. В., Мошков А. В., Семёнов А. А., Чимитдоржиев Т. Н.* Метод выявления угнетенной растительности по данным спектрозонального сканера // Исследование Земли из космоса. 1997. № 6. С. 3–10.
- Жарко В. О., Барталев С. А., Сидоренков В. М. Исследование возможностей использования данных Sentinel 2, полученных в условиях наличия снежного покрова, для оценки запаса стволовой древесины в лесах // 15-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. Москва. 2017. С. 360. URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_ conf/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6501.
- 8. *Лупян Е.А., Саворский В. П.* Базовые продукты обработки данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 87–97.

- 9. Лупян Е.А., Мазуров А.А., Назиров Р.Р., Прошин А.А., Флитман Е.В., Крашенниникова Ю.С. Технологии построения информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 26–43.
- 10. Лупян Е.А., Саворский В. П., Шокин Ю.И., Алексанин А.И., Назиров Р.Р., Недолужко И.В., Панова О.Ю. Современные подходы и технологии организации работы с данными дистанционного зондирования Земли для решения научных задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 21–44.
- 11. *Миллер С.А.* Архитектура инфраструктуры пространственных данных Германии // Пространственные данные. 2010. № 2. С. 7–15. URL: http://www.gisa.ru/70146.html (Дата обращения: 07.06.2018).
- 12. 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.
- 13. Чимитдоржиев Т. Н., Быков М. Е., Кантемиров Ю. И., Кирбижекова И. И., Лабаров Б. Б., Балтухаев А. К. К вопросу о точности определения высоты леса по данным радиолокационной интерферометрии TanDEM-X // Сибирский лесной журн. 2016. № 4. С. 128–133.
- Askne J. I., Dammert P. B., Ulander L. M., Smith G. C-band repeat-pass interferometric SAR observations of the forest // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1997. V. 35. No. 1. P. 25–35. DOI: 10.1109/36.551931.
- Beaudoin A., Bernier P. Y., Guindon L., Villemaire P., Guo X. J., Stinson G., Bergeron T., Magnussen S., Hall R. J. Mapping attributes of Canada's forests at moderate resolution through kNN and MODIS imagery // Canadian J. Forest Research. 2014. V. 44. No. 5. P. 521–532. DOI: 10.1139/cjfr-2013-0401.
- Colgan M. S., Baldeck C. A., Féret J.-B., Asner G. P. Mapping savanna tree species at ecosystem scales using support vector machine classification and BRDF correction on airborne hyperspectral and LiDAR data // Remote Sensing. 2012. V. 4. No. 11. P. 3462–3480. DOI: 10.3390/rs4113462.
- Deutscher J., Gutjahr K., Perko R., Raggam H., Hirschmugl M., Schardt M. Humid tropical forest monitoring with multi-temporal L-, C-and X-band SAR data // Proc. IEEE 9th Intern. Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images (Multi-Temp). Bruges, Belgium, 2017. P. 1–4.
- Dobson M. C., Ulaby F. T., LeToan T., Beaudoin A., Kasischke E. S., Christensen N. Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass // IEEE Transactions on Geoscience and remote Sensing. 1992. V. 30. No. 2. P. 412–415. DOI: 10.1109/36.134090.
- 19. Engler R., Waser L. T., Zimmermann N. E., Schaub M., Berdos S., Ginzler C., Psomas A. Combining ensemble modeling and remote sensing for mapping individual tree species at high spatial resolution // Forest ecology and management. 2013. V. 310. P. 64–73. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.07.059.
- Englhart S., Keuck V., Siegert F. Aboveground biomass retrieval in tropical forests The potential of combined X- and L-band SAR data use // Remote Sensing of Environment. 2011. V. 115. No. 5. P. 1260–1271. DOI: 10.1016/j.rse.2011.01.008.
- Feng Q., Chen E., Li Z., Li L., Zhao L. Forest vertical structure parameters extraction from airborne X-band InSAR data // 2016 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). IEEE, 2016. P. 155–158. DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7729031.
- Fransson J. E. S., Smith G., Askne J., Olsson H. Stem volume estimation in boreal forests using ERS-1/2 coherence and SPOT XS optical data // Intern. J. Remote Sensing. 2001. V. 22. No. 14. P. 2777–2791. DOI: 10.1080/01431160010006872.
- 23. *Gama F. F., Dos Santos J. R., Mura J. C.* Eucalyptus Biomass and Volume Estimation Using Interferometric and Polarimetric SAR Data // Remote Sensing. 2010. V. 2. No. 4. P. 939–956. DOI: 10.3390/rs2040939.
- 24. *Gonçalves F. G., Santos J. R., Treuhaft R. N.* Stem volume of tropical forests from polarimetric radar // Intern. J. Remote Sensing. 2011. V. 32. No. 2. P. 503–522. DOI: 10.1080/01431160903475217.
- 25. *Goodenough D. G., Chen H., Cloude S. R., Gordon P.* Multisource aboveground carbon estimation of forests // 2016 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). IEEE, 2016. P. 147–150.
- Haack B., Mahabir R. Separability Analysis of Integrated Spaceborne Radar and Optical Data: Sudan Case Study // J. Remote Sensing. 2017. V. 5. No. 1. P. 10–21. DOI: 10.18005/JRST0501002.
- 27. *Imhoff M. L.* Radar backscatter and biomass saturation-Ramifications for global biomass inventory. // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1995. V. 33. No. 2. P. 511–518. DOI: 10.1109/36.377953.
- 28. Jaaskelainen T., Silvennoinen R., Hiltunen J., Parkkinen J. P.S. Classification of the reflectance spectra of pine, spruce, and birch // Applied Optics. 1994. V. 33. No. 12. P. 2356–2362. DOI: 10.1364/AO.33.002356.
- Joshi N., Baumann M., Ehammer A., Fensholt R., Grogan K., Hostert P., Jepsen M. R., Kuemmerle T., Meyfroidt P., Mitchard E. T.A., Reiche J., Ryan C. M., Waske B. A review of the application of optical and radar remote sensing data fusion to land use mapping and monitoring // Remote Sensing. 2016. V. 8. No. 1. P. 70. DOI: 10.3390/rs8010070.

- Le Maire G., François C., Soudani K., Berveiller D., Pontailler J.-Y., Bréda N., Genet H., Davi H., Dufrêne E. Calibration and validation of hyperspectral indices for the estimation of broadleaved forest leaf chlorophyll content, leaf mass per area, leaf area index and leaf canopy biomass // Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112. No. 10. P. 3846–3864. DOI: 10.1016/j.rse.2008.06.005.
- Li W., Chen E., Li Z., Ke Y., Zhan W. Forest aboveground biomass estimation using polarization coherence tomography and PolSAR segmentation // Intern. J. Remote Sensing. 2015. V. 36. No. 2. P. 530–550. DOI: 10.1080/01431161.2014.999383.
- 32. *Neumann M., Ferro-Famil L., Reigber A.* Estimation of forest structure, ground, and canopy layer characteristics from multibaseline polarimetric interferometric SAR data // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2010. V. 48. No. 3. P. 1086–1104. DOI: 10.1109/TGRS.2009.2031101.
- 33. *Perko R., Raggam H., Deutscher J., Gutjahr K., Schardt M.* Forest assessment using high resolution SAR data in X-band // Remote Sensing. 2011. V. 3. No. 4. P. 792–815. DOI: 10.3390/rs3040792.
- 34. Puliti S., Solberg S., Næsset E., Gobakken T., Zahabu E., Mauya E., Malimbwi R. E. Modelling above Ground Biomass in Tanzanian Miombo Woodlands Using TanDEM-X WorldDEM and Field Data // Remote Sensing. 2017. V. 9. No. 10. P. 984. DOI: 10.3390/rs9100984.
- Pulliainen J., Engdahl M., Hallikainen M. Feasibility of multi-temporal interferometric SAR data for stand-level estimation of boreal forest stem volume // Remote Sensing of Environment. 2003. V. 85. No. 4. P. 397–409. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00016-6.
- Reiche J., Hamunyela E., Verbesselt J., Hoekman D., Herold M. Improving near-real time deforestation monitoring in tropical dry forests by combining dense Sentinel-1 time series with Landsat and ALOS-2 PALSAR-2 // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 204. P. 147–161. DOI: 10.1016/j.rse.2017.10.034.
- 37. Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and Case Studies / eds. Wulder M.A., Franklin S.E. Springer Science and Business Media, 2003. 519 p.
- 38. *Sadeghi Y., St-Onge B., Leblon B., Simard M. Papathanassiou K.* Role of Vegetation Phenology (Leafon, Leaf-off) in the Accuracy of Forest Height Maps Derived from TanDEM-X Interferograms // Conf. POLinSAR 2015, Frascati, Italy. URL: https://goo.gl/aPNMsr.
- Santoro M., Eriksson L. E. B., Fransson J. E. S. Reviewing ALOS PALSAR Backscatter Observations for Stem Volume Retrieval in Swedish Forest // Remote Sensing. 2015. V. 7. No. 4. P. 4290–4317. DOI: 10.3390/rs70404290.
- 40. *Sauer S., Kugler F., Lee S. K., Papathanassiou K.* Polarimetric decomposition for forest biomass retrieval // 2010 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). IEEE, 2010. P. 4780–4783. DOI: 10.1109/IGARSS.2010.5653894.
- Schepaschenko D., McCallum I., Shvidenko A., Fritz S., Kraxner F., Obersteiner M. A new hybrid land cover dataset for Russia: a methodology for integrating statistics, remote sensing and in situ information // J. Land Use Science. 2011. V. 6. No. 4. P. 245–259. DOI: 10.1080/1747423X.2010.511681.
- 42. *Schmitt M., Shahzad M., Zhu X. X.* Forest remote sensing on the individual tree level by airborne millimeterwave SAR // 2016 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). IEEE, 2016. P. 151– 154. DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7729030.
- 43. Soudani K., François C., Le Maire G., Le Dantec V., Dufrêne E. Comparative analysis of IKONOS, SPOT, and ETM+ data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 102. No. 1. P. 161–175. DOI: 10.1016/j.rse.2006.02.004.
- 44. *Tian J.*, *Schneider T.*, *Straub C.*, *Kugler F.*, *Reinartz P.* Exploring Digital Surface Models from Nine Different Sensors for Forest Monitoring and Change Detection // Remote Sensing. 2017. V. 9. No. 3. P. 287. DOI: 10.3390/rs9030287.
- 45. *Wilson B. T., Lister A. J., Riemann R. I.* A nearest-neighbor imputation approach to mapping tree species over large areas using forest inventory plots and moderate resolution raster data // Forest Ecology and Management. 2012. V. 271. P. 182–198. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.02.002.
- Zhang Z., Ni W., Sun G., Huang W., Ranson K. J., Cook B. D., Guo Z. Biomass retrieval from L-band polarimetric UAVSAR backscatter and PRISM stereo imagery // Remote Sensing of Wnvironment. 2017. V. 194. P. 331–346. DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.034.

Remote optical-microwave measurements of forest parameters: modern state of research and experimental assessment of potentials

T. N. Chimitdorzhiev, A. V. Dmitriev, I. I. Kirbizhekova, A. A. Sherkhoeva, A. K. Baltukhaev, P. N. Dagurov

Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude 670047, Russia E-mail: tchimit@ipms.bscnet.com

The paper presents an overview of modern trends in remote sensing (RS) of forest with the help of fusion of multispectral images, radar interferometry and partially, polarimetry data. Basing on the analysis of publications of recent years, we show that the considered complex approach allows to expand the capabilities of RS to assess the forest's taxonomic parameters in comparison with technologies which involve the analysis of characteristics only by radar or only by optical multispectral methods. The experimental part briefly describes the algorithms of optical and polarimetric radar data processing which serve to determine the predominant species, canopy closeness, aboveground biomass. For one of the forest taxonomic key parameters — average height, the calculation method is described in more detail. Analysis of the accuracy of radar interferometric measurements is carried out basing on the results obtained by the authors. The systematic underestimation of the actual forest height was established: the discrepancy between the results of radar interferometry and field measurements reached 5.5 m at the values of stand fullness equaled to 0.5, 0.9 and 1, and varies in the range from 2 to 4 m at fullness spanned from 0.6 to 0.8. The conclusion is made about necessity of updating results of radar interferometry by means of appropriate corrections obtained for different values of the forest fullness. The results of remote optical-microwave measurements of forest parameters are available on the Internet in accordance with the modern trends of free distribution of scientific data.

Keywords: radar interferometry, radar polarimetry, spectral analysis, image texture, data fusion, forest inventory

Accepted: 10.07.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-9-24

References

- 1. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Satellite mapping of vegetation cover in Russia), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p.
- 2. Bondur V.G., Sovremennye podkhody k obrabotke bol'shikh potokov giperspektral'noi i mnogospektral'noi aerokosmicheskoi informatsii (Modern approaches to processing large flows of hyperspectral and multispectral aerospace information), *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 1, pp. 3–17.
- Gavrilyuk E.A., Ershov D.V., Tematicheskoe kartografirovanie porodnoi struktury lesov na osnove sputnikovykh izobrazhenii Landsat-TM/ETM+ (Thematic mapping of forest species structure based on Landsat-TM\ETM+ satellite images), *Aerokosmicheskie metody i geoinformatsionnye tekhnologii v lesovedenii i lesnom khozyaistve: doklady V Vserossiiskoi konferentsii* (Aerospace Method and GIS-Technologies in Forestry and Forest Management: Proc. 5th All-Russian Conf.), Moscow, April 22–24, 2013, Moscow: CEPL RAS, 2013, pp. 112–115.
- 4. Dmitriev A. V., Chimitdorzhiev T. N., Gusev M. A., Dagurov P. N., Emel'yanov K. S., Zakharov A. I., Kirbizhekova I. I., Bazovye produkty zondirovaniya Zemli kosmicheskimi radiolokatorami s sintezirovannoi aperturoi (Basic products of earth sensing by space radars with synthetic aperture), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 5, pp. 83–83.
- Dmitriev A. V., Chimitdorzhiev T. N., Kirbizhekova I. I., Dagurov P. N., Bazarov A. V., Garmaev A. M., Emel'yanov K. S., Gusev M. A., Tekhnologiya sozdaniya i primeneniya bazovykh produktov sputnikovoi radiolokatsii (Technology of creation and application of satellite radar basic products), *Vychislitel'nye tekhnologii*, 2014, Vol. 19, No. 3, pp. 5–13.
- 6. Efremenko V.V., Moshkov A.V., Semenov A.A., Chimitdorzhiev T.N., Metod vyyavleniya ugnetennoi rastitel'nosti po dannym spektrozonal'nogo skanera (Method for detection of the oppressed vegetation with help of multispectral scanner), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1997, No. 6, pp. 3–10.

- 7. Zharko V.O., Bartalev S.A., Sidorenkov V.M., Issledovanie vozmozhnostei ispol'zovaniya dannykh Sentinel 2, poluchennykh v usloviyakh nalichiya snezhnogo pokrova, dlya otsenki zapasa stvolovoi drevesiny v lesakh (Study of the feasibility of using Sentinel 2 data obtained under snow cover to estimate the stock of stem wood in forests.), XV Vserossiyskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa" (XV All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, Moscow, 2017, p. 360, available at: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6501.
- 8. Loupian E.A., Savorskii V.P., Bazovye produkty obrabotki dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli (Basic products of Earth remote sensing data processing), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 87–97.
- 9. Loupian E.A., Mazurov A.A., Nazirov R.R., Proshin A.A., Flitman E.V., Krashenninikova Yu.S., Tekhnologii postroeniya informatsionnykh sistem distantsionnogo monitoringa (Technologies for building information systems for remote monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 26–43.
- Loupian E.A., Savorskii V.P., Shokin Yu.I., Aleksanin A.I., Nazirov R.R., Nedoluzhko I.V., Panova O. Yu., Sovremennye podkhody i tekhnologii organizatsii raboty s dannymi distantsionnogo zondirovaniya Zemli dlya resheniya nauchnykh zadach (Modern approaches and technologies of organization of work with data of the Earth remote sensing for the solution of scientific problems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 21–44.
- 11. Miller S.A., Arkhitektura infrastruktury prostranstvennykh dannykh Germanii (The architecture of the infrastructure of Germany's spatial data), *Prostranstvennye dannye*, 2010, No. 2, pp. 7–15, available at: http:// www.gisa.ru/70146.html.
- 12. Chimitdorzhiev T. N., Bykov M. E., Kantemirov Yu. I., Kholets F., Barbieri M., Tekhnologiya kolichestvennoi otsenki vysoty lesa po dannym kosmicheskikh radarnykh tandemnykh interferometricheskikh s"emok so sputnikov TerraSAR-X/TanDEM-X (Technology of quantitative estimation of forest heights on the basis of data of space tandem radar interferometric surveys by the TerraSAR-X/TanDEM-X satellites), *Geomatika*, 2014, No. 1, pp. 72–79.
- Chimitdorzhiev T. N., Bykov M. E., Kantemirov Yu. I., Kirbizhekova I. I., Labarov B. B., Baltukhaev A. K., K voprosu o tochnosti opredeleniya vysoty lesa po dannym radiolokatsionnoi interferometrii TanDEM-X (On the accuracy of determining the forest height from the data of TanDEM-X radar interferometry), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2016, No. 4, pp. 128–133.
- 14. Askne J. I., Dammert P. B., Ulander L. M., Smith G., C-band repeat-pass interferometric SAR observations of the forest, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, Vol. 35, No. 1, pp. 25–35, DOI: 10.1109/36.551931.
- 15. Beaudoin A., Bernier P. Y., Guindon L., Villemaire P., Guo X. J., Stinson G., Bergeron T., Magnussen S., Hall R. J., Mapping attributes of Canada's forests at moderate resolution through kNN and MODIS imagery, *Canadian J. Forest Research*, 2014, Vol. 44, No. 5, pp. 521–532, DOI: 10.1139/cjfr-2013-0401.
- 16. Colgan M. S., Baldeck C. A., Féret J.-B., Asner G. P., Mapping savanna tree species at ecosystem scales using support vector machine classification and BRDF correction on airborne hyperspectral and LiDAR data, *Remote Sensing*, 2012, Vol. 4, No. 11, pp. 3462–3480, DOI:10.3390/rs4113462
- Deutscher J., Gutjahr K., Perko R., Raggam H., Hirschmugl M., Schardt M., Humid tropical forest monitoring with multi-temporal L-, C- and X-band SAR data, *Proc. IEEE 9th Intern. Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images (Multi-Temp)*, Bruges, Belgium, 2017, pp. 1–4.
- Dobson M. C., Ulaby F. T., LeToan T., Beaudoin A., Kasischke E. S., Christensen N., Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, Vol. 30, No. 2, pp. 412–415, DOI: 10.1109/36.134090.
- 19. Engler R., Waser L. T., Zimmermann N. E., Schaub M., Berdos S., Ginzler C., Psomas A., Combining ensemble modeling and remote sensing for mapping individual tree species at high spatial resolution, *Forest ecology and management*, 2013, Vol. 310, pp. 64–73, DOI: 10.1016/j.foreco.2013.07.059.
- Englhart S., Keuck V., Siegert F., Aboveground biomass retrieval in tropical forests The potential of combined X- and L-band SAR data use, *Remote Sensing of Environment*, 2011, Vol. 115, No. 5, pp. 1260– 1271, DOI: 10.1016/j.rse.2011.01.008.
- Feng Q., Chen E., Li Z., Li L., Zhao L., Forest vertical structure parameters extraction from airborne X-band InSAR data, 2016 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS), IEEE, 2016, pp. 155–158, DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7729031.
- 22. Fransson J. E. S., Smith G., Askne J., Olsson H., Stem volume estimation in boreal forests using ERS-1/2 coherence and SPOT XS optical data, *Intern. J. Remote Sensing*, 2001, Vol. 22, No. 14, pp. 2777–2791, DOI: 10.1080/01431160010006872.

- 23. Gama F. F., Dos Santos J. R., Mura J. C., Eucalyptus Biomass and Volume Estimation Using Interferometric and Polarimetric SAR Data, *Remote Sensing*, 2010, Vol. 2, No. 4, pp. 939–956, DOI: 10.3390/rs2040939.
- 24. Gonçalves F.G., Santos J.R., Treuhaft R.N., Stem volume of tropical forests from polarimetric radar, *Intern. J. Remote Sensing*, 2011, Vol. 32, No. 2, pp. 503–522, DOI: 10.1080/01431160903475217.
- 25. Goodenough D.G., Chen H., Cloude S.R., Gordon P., Multisource aboveground carbon estimation of forests, *2016 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, IEEE, 2016, pp. 147–150, DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7729029.
- 26. Haack B., Mahabir R., Separability Analysis of Integrated Spaceborne Radar and Optical Data: Sudan Case Study, *J. Remote Sensing*, 2017, Vol. 5, No. 1, pp. 10–21, DOI: 10.18005/JRST0501002.
- 27. Imhoff M. L., Radar backscatter and biomass saturation-Ramifications for global biomass inventory, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, Vol. 33, No. 2, pp. 511–518, DOI: 10.1109/36.377953.
- Jaaskelainen T., Silvennoinen R., Hiltunen J., Parkkinen J. P. S., Classification of the reflectance spectra of pine, spruce, and birch, *Applied Optics*, 1994, Vol. 33, No. 12, pp. 2356–2362, DOI: 10.1364/AO.33.002356.
- 29. Joshi N., Baumann M., Ehammer A., Fensholt R., Grogan K., Hostert P., Jepsen M. R., Kuemmerle T., Meyfroidt P., Mitchard E. T. A., Reiche J., Ryan C. M., Waske B., A review of the application of optical and radar remote sensing data fusion to land use mapping and monitoring, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 1, p. 70, DOI: 10.3390/rs8010070.
- Le Maire G., François C., Soudani K., Berveiller D., Pontailler J.-Y., Bréda N., Genet H., Davi H., Dufrêne E., Calibration and validation of hyperspectral indices for the estimation of broadleaved forest leaf chlorophyll content, leaf mass per area, leaf area index and leaf canopy biomass, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, No. 10, pp. 3846–3864, DOI: 10.1016/j.rse.2008.06.005.
- Li W., Chen E., Li Z., Ke Y., Zhan W., Forest aboveground biomass estimation using polarization coherence tomography and PolSAR segmentation, *Intern. J. Remote Sensing*, 2015, Vol. 36, No. 2, pp. 530–550, DOI: 10.1080/01431161.2014.999383.
- 32. Neumann M., Ferro-Famil L., Reigber A., Estimation of forest structure, ground, and canopy layer characteristics from multibaseline polarimetric interferometric SAR data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, Vol. 48, No. 3, pp. 1086–1104, DOI: 10.1109/TGRS.2009.2031101.
- 33. Perko R., Raggam H., Deutscher J., Gutjahr K., Schardt M., Forest assessment using high resolution SAR data in X-band, *Remote sensing*, 2011, Vol. 3, No. 4, pp. 792–815, DOI:10.3390/rs3040792.
- 34. Puliti S., Solberg S., Næsset E., Gobakken T., Zahabu E., Mauya E., Malimbwi R. E., Modelling above Ground Biomass in Tanzanian Miombo Woodlands Using TanDEM-X WorldDEM and Field Data, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, No. 10, p. 984, DOI: 10.3390/rs9100984.
- Pulliainen J., Engdahl M., Hallikainen M., Feasibility of multi-temporal interferometric SAR data for stand-level estimation of boreal forest stem volume, *Remote Sensing of Environment*, 2003, Vol. 85, No. 4, pp. 39–409, DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00016-6.
- Reiche J., Hamunyela E., Verbesselt J., Hoekman D., Herold M., Improving near-real time deforestation monitoring in tropical dry forests by combining dense Sentinel-1 time series with Landsat and ALOS-2 PALSAR-2, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 204, pp. 147–161, DOI: 10.1016/j.rse.2017.10.034.
- 37. *Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and Case Studies*, Wulder M.A., Franklin S.E. (eds.), Springer Science & Business Media, 2003, 519 p., DOI: 10.1007/978-1-4615-0306-4.
- Sadeghi Y., St-Onge B., Leblon B., Simard M., Papathanassiou K., Role of Vegetation Phenology (Leafon, Leaf-off) in the Accuracy of Forest Height Maps Derived from TanDEM-X Interferograms, *Conf. POLinSAR 2015, Frascati, Italy*, available at: https://goo.gl/aPNMsr.
- Santoro M., Eriksson L. E. B., Fransson J. E. S., Reviewing ALOS PALSAR Backscatter Observations for Stem Volume Retrieval in Swedish Forest, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, No. 4, pp. 4290–4317, DOI: 10.3390/rs70404290.
- 40. Sauer S., Kugler F., Lee S. K., Papathanassiou K., Polarimetric decomposition for forest biomass retrieval, *2010 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.* (*IGARSS*), IEEE, 2010, pp. 4780–4783, DOI: 10.1109/IGARSS.2010.5653894.
- 41. Schepaschenko D., McCallum I., Shvidenko A., Fritz S., Kraxner F., Obersteiner M., A new hybrid land cover dataset for Russia: a methodology for integrating statistics, remote sensing and in situ information, *J. Land Use Science*, 2011, Vol. 6, No. 4, pp. 245–259, DOI: 10.1080/1747423X.2010.511681.
- 42. Schmitt M., Shahzad M., Zhu X., Forest remote sensing on the individual tree level by airborne millimeterwave SAR, *2016 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.* (*IGARSS*), IEEE, 2016, pp. 151–154, DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7729030.

- 43. Soudani K., François C., Le Maire G., Le Dantec V., Dufrêne E., Comparative analysis of IKONOS, SPOT, and ETM+ data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 102, No. 1, pp. 161–175, DOI: 10.1016/j.rse.2006.02.004.
- 44. Tian J., Schneider T., Straub C., Kugler F., Reinartz P., Exploring Digital Surface Models from Nine Different Sensors for Forest Monitoring and Change Detection, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, No. 3, p. 287, DOI: 10.3390/rs9030287.
- 45. Wilson B. T., Lister A. J., Riemann R. I., A nearest-neighbor imputation approach to mapping tree species over large areas using forest inventory plots and moderate resolution raster data, *Forest Ecology and Management*, 2012, Vol. 271, pp. 182–198, DOI: 10.1016/j.foreco.2012.02.002.
- 46. Zhang Z., Ni W., Sun G., Huang W., Ranson K.J., Cook B.D., Guo Z., Biomass retrieval from L-band polarimetric UAVSAR backscatter and PRISM stereo imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 194, pp. 331–346, DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.034.