Исследование возможностей оценки запасов древесины в лесах Приморского края по данным спутниковой системы Proba-V

В. О. Жарко, С. А. Барталев, В. А. Егоров

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: zharko@d902.iki.rssi.ru

В работе представлен метод оценки запаса стволовой древесины в лесах по данным спутниковой системы Proba-V с разрешением 100 м, полученным в период наличия устойчивого снежного покрова. Метод основан на аппроксимации зависимости запаса древесины от коэффициента спектральной яркости (КСЯ) покрытой снегом земной поверхности в красном канале прибора. В качестве тестового региона выбрана территория Приморского края. Описан метод построения безоблачных композитных изображений по данным Proba-V, несущих информацию о пространственном распределении спектрально-отражательных характеристик покрытой снегом земной поверхности. Изложена процедура подготовки данных о пространственном распределении различных типов земного покрова (по данным спутниковых карт растительности) и характеристик рельефа местности (по данным цифровой модели рельефа). Подготовленные данные использованы для стратификации территории на однородные по условиям солнечного освещения области, включая затенённые северные и освещённые южные склоны, а также близкие к горизонтальным участки местности, с последующей независимой обработкой спутниковых данных в пределах каждой страты. Параметризация модели, аппроксимирующей соотношения величины запаса древесины и значений КСЯ, выполнялась отдельно для каждого класса лесного покрова, распространённого на территории исследования, на основе данных свободно доступной карты запаса с разрешением 1 км в предположении обратной пропорциональности запаса и КСЯ. Результаты аппроксимации использованы для получения оценок запаса стволовой древесины, основанных на композитном изображении покрытой снегом земной поверхности по данным Proba-V. Сравнение полученных по данным Proba-V оценок запаса стволовой древесины с материалами государственного учёта лесов на уровне лесохозяйственных предприятий Приморского края характеризуется коэффициентом детерминации $R^2 = 0{,}96$.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, леса, запас стволовой древесины, Proba-V

Одобрена к печати: 23.11.2017
DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-157-168

Введение

Надземная биомасса и тесно связанная с ней величина запаса (объёма) стволовой древесины (*англ*. growing stock volume — GSV) являются важнейшими характеристиками лесов. Информация о пространственном распределении и динамике запаса древесины в лесах России широко востребована для решения задач организации лесного хозяйства и лесной промышленности, оценки последствий пожаров и воздействия на леса других деструктивных факторов, контроля процессов лесопользования. Данные о биомассе лесов необходимы при проведении фундаментальных исследований углеродного цикла, в том числе при оценке потоков парниковых газов в системе лес-атмосфера. Мониторинг надземной биомассы лесов является необходимым условием реализации международных соглашений по климату.

Наиболее эффективным подходом к получению актуальных, однородных и объективных оценок характеристик лесного покрова на больших территориях является использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). При этом, несмотря на значительное число исследований и разработок в области методов спутниковой оценки надземной биомассы лесов, и в частности запаса древесины, к настоящему времени получена лишь очень ограниченная

информация о пространственном распределении биомассы/запаса в лесах для всей территории России на основе данных ДЗЗ (Щепащенко и др., 2017; Rodríguez-Veiga et al., 2017). В то же время практическое использование полученных данных существенно ограничивается их низким пространственным разрешением (500 м – 27,5 км) и/или отсутствием свободного доступа к источникам необходимых данных ДЗЗ, что, в свою очередь, лимитирует и возможности регулярного обновления информации о запасах лесов. Наиболее актуальным из доступных наборов данных такого рода является карта запасов стволовой древесины в лесах Северного полушария (Santoro et al., 2015, далее карта BIOMASAR).

В Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) разработан метод, обеспечивающий возможность регулярной оценки пространственного распределения запаса стволовой древесины в лесах России с разрешением 250 м на основе данных спутниковых наблюдений прибором MODIS, полученных в период наличия устойчивого снежного покрова на земной поверхности (Барталев и др., 2016а). Представленная работа направлена на исследование возможностей дальнейшего развития метода дистанционной оценки запаса древесины в лесах на основе использования данных спутниковой системы Proba-V пространственного разрешения 100 м.

Экспериментальные данные

В работе использовались данные спутниковой системы Proba-V, выведенной на орбиту в мае 2013 г. Прибор выполняет измерения коэффициента спектральной яркости (КСЯ) поверхности Земли в голубом (0,440–0,487 мкм), красном (0,614–0,696 мкм), ближнем ИК (0,772–0,902 мкм) и среднем ИК (1,570–1,635 мкм) диапазонах длин волн. В частности, стандартный продукт данных Proba-V S1 TOC предоставляет информацию о КСЯ земной поверхности (после коррекции влияния атмосферы) с пространственным разрешением около 100 м для видимых и ближнего ИК-каналов. Повторяемость наблюдений участка поверхности Земли с таким пространственным разрешением составляет для территории России 2–5 дней в зависимости от широты местности. В представленной работе использованы данные за периоды с декабря по май 2014/2015 и 2015/2016 гг., соответствующие возможному наличию снежного покрова на различных участках рассматриваемой территории.

Анализ взаимосвязи величины запаса стволовой древесины и КСЯ покрытой снегом земной поверхности выполнялся с использованием карты BIOMASAR. Указанная карта получена в результате применения одноимённого алгоритма (Santoro et al., 2011) для обработки данных разновременных радиолокационных измерений прибором ASAR, установленным на спутнике Envisat, и характеризует пространственное распределение запаса стволовой древесины [м^3/га] с разрешением порядка 1 км по состоянию на 2010 г. Карта находится в свободном доступе (http://biomasar.org/index.php?id=71) и сопровождается информацией о величине погрешности (uncertainty) оценки запаса, обусловленной использованной моделью, что позволяет анализировать достоверность данных карты для каждого пикселя. Необходимо отметить, что оценки запаса стволовой древесины по вышеуказанному адресу доступны только в пределах маски лесов, полученной на основе глобальной карты типов земного покрова GlobCover (Arino et al., 2008), однако для проведения представленных в настоящей работе исследований от разработчиков карты были получены данные, содержащие оценки величины запаса на всей территории.

В работе также использовались карты растительности России (Барталев и др., 2011) за 2010–2014 гг., характеризующие пространственно-временную вариабельность растительного покрова на территории исследования. В основе построения указанных карт лежит контролируемая локально-адаптивная классификация разносезонных композитных изображений КСЯ земной поверхности, сформированных по данным спутниковых наблюдений прибором MODIS, с использованием разработанного в ИКИ РАН алгоритма LAGMA (Bartalev et al., 2014). Карты предоставляют информацию о пространственном распределении 23 классов земного покрова, в том числе восьми классов лесов, с разрешением около 250 м для всей

территории России. Кроме того, для проведённых исследований была использована экспериментальная региональная карта растительного покрова (Барталев и др., 2016б), основанная на результатах контролируемой классификации разносезонных композитных изображений КСЯ по данным Proba-V и характеризующая распределение набора соответствующих тематических классов на рассматриваемой территории с пространственным разрешением 100 м.

В качестве тестового региона была выбрана территория Приморского края, около 80 % которой покрыто лесом, что обуславливает актуальность её исследования для развития методов спутникового мониторинга лесного покрова. При этом центральную и восточную части края занимают горы Сихотэ-Алинь, определяя необходимость учёта радиометрических искажений спутниковых измерений КСЯ земной поверхности, вызванных рельефом местности, при использовании данных ДЗЗ для оценки характеристик растительного покрова на территории исследования. Для этого были использованы данные цифровой модели рельефа (ЦМР) SRTM (Farr et al., 2007), имеющие пространственное разрешение около 90 м, на основе которых были рассчитаны углы наклона и азимуты склонов, что позволило характеризовать рельеф местности на рассматриваемой территории и учесть его влияние.

Для оценки согласованности полученных результатов с имеющимися данными о распределении запаса стволовой древесины использовались материалы официальной статистики об интегральной величине запаса [млн м^3] на уровне края, данные государственного учёта лесов (ГУЛ) 2008 года об интегральных величинах запасов [тыс. м^3] на уровне лесохозяйственных предприятий, а также выборочные данные наземного обследования лесов.

Метод обработки данных ДЗЗ

В основе представленного метода лежит использование оптических данных ДЗЗ, полученных в период устойчивого снежного покрова на земной поверхности, для оценки величины запаса стволовой древесины в лесах. Наличие снега приводит к маскированию на спутниковых изображениях всех типов земного покрова, кроме достаточно высокой древесно-кустарниковой растительности. Снег имеет устойчиво высокую отражательную способность в видимой части спектра, а вариации КСЯ лесного покрова по данным ДЗЗ зимнего периода определяются главным образом долей проективного покрытия земной поверхности кронами деревьев и их тенями, связанной с количеством и высотой деревьев в пикселе спутникового изображения. Это, в свою очередь, обуславливает тесную взаимосвязь КСЯ лесов в условиях покрытой снегом земной поверхности и величины удельного запаса стволовой древесины [м^3/га]. Разработанный метод основан на моделировании и оценке количественных параметров этой взаимосвязи и использовании полученных соотношений для картографирования запаса древесины по данным ДЗЗ зимнего периода. При этом для получения информации о характерных значениях КСЯ покрытой снегом земной поверхности на территории исследования формируется зимнее композитное изображение КСЯ по данным Proba-V, а параметризация модели выполняется на основе данных карты BIOMASAR.

Предварительная обработка данных Proba-V

Предварительная обработка данных Proba-V направлена на детектирование свободных от влияния облачности пикселей, содержащих измерения КСЯ земной поверхности с наличием снежного покрова. Кривая спектральной отражательной способности снега демонстрирует уникальное сочетание очень высоких значений в видимом диапазоне длин волн и очень низких величин в средней ИК-области спектра. Это позволяет отделять снежный покров от облачности и других типов земной поверхности на основе анализа измерений КСЯ в соответствующих спектральных каналах. Для обработки данных Proba-V разработан следующий набор эмпирических пороговых критериев, на основе которых пиксели относятся к одному из трёх классов:

$$\left.\begin{array}{lll} 1.\ R_{0,464} \geqslant 0,05 \quad \text{и} \quad 0,2 \geqslant R_{1,603} \geqslant 0,03 & & \text{— покрытая снегом земная поверхность;} \\ 2.\ R_{0,464} \geqslant 0,05 \quad \text{и} \quad R_{1,603} > 0,2 & & \text{— облачность;} \\ 3.\ R_{0,464} < 0,05 \quad \text{или} \quad R_{1,603} < 0,03 & & \text{— тени на земной поверхности} \\ & & \quad \text{и некоторые другие объекты,} \end{array}\right\} \quad (1)$$

где $R_{0,464}$ и $R_{1,603}$ — КСЯ в голубом и среднем ИК-каналах Proba-V соответственно (*рис. 1*).

Приведённая на *рис. 1* пунктирная прямая линия соответствует нулевым значениям нормализованного разностного индекса снега *NDSI* (Hall et al., 1995). При этом лежащая выше указанной линии область соответствует положительным значениям индекса, а область ниже линии — отрицательным. *NDSI* широко используется для детектирования снежного покрова по данным ДЗЗ, при этом бóльшие значения индекса соответствуют большей доле пикселя, покрытой снегом, а отрицательные значения — отсутствию снежного покрова. Выполненные исследования показали, что значения *NDSI* для сомкнутого полога леса на рассматриваемой территории, рассчитанные по данным Proba-V, часто оказываются отрицательными (см. *рис. 1*) вне зависимости от наличия снега на земной поверхности, что не позволило использовать *NDSI* для детектирования снежного покрова в данной работе.

В то же время использование критериев (1) может приводить к ошибочному отнесению безоблачных измерений КСЯ тёмнохвойных лесов с наличием снежного покрова к классу теней. Анализ гистограммы суммарного числа измерений, отнесённых к классу «покрытая снегом земная поверхность» за рассматриваемые периоды двух зимних сезонов, позволил задать минимальное пороговое значение числа чистых измерений. В случае если по результатам обработки всей совокупности данных для пикселя было детектировано менее 20 измерений, относящихся к классу «покрытая снегом земная поверхность», то для этого пикселя пороговые значения $R_{0,464}$ и $R_{1,603}$ критериев (1) уменьшались с 0,05 до 0,02 и с 0,03 до 0,01 соответственно.

Далее выполнялась процедура статистической фильтрации результатов измерений КСЯ, направленная на исключение шумов, связанных в том числе с возможным наличием снега в атмосфере или на кронах плотно сомкнутого лесного покрова.

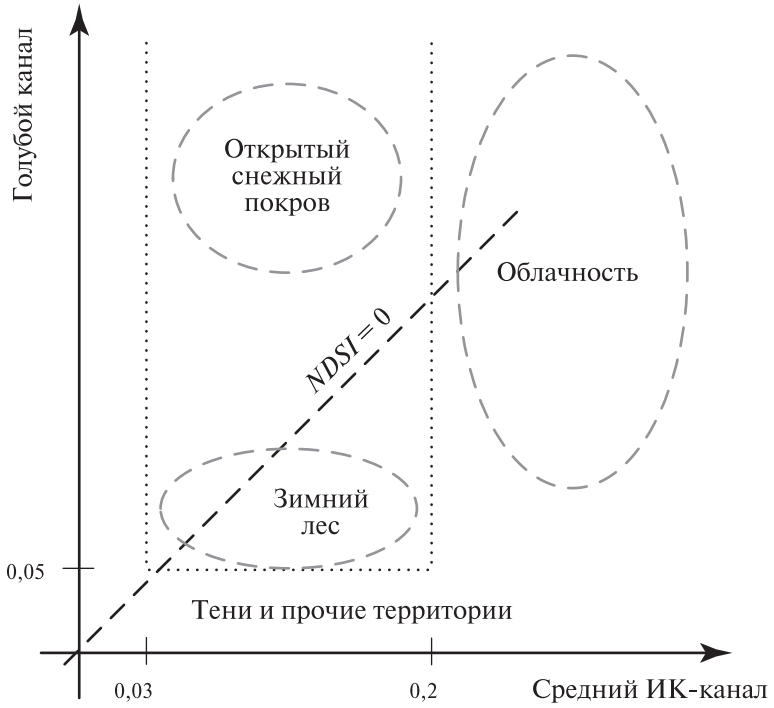

Рис. 1. Двумерная диаграмма, отражающая соответствие значений КСЯ в голубом и среднем ИК-каналах Proba-V различным типам земного покрова

Для каждого пикселя спутникового изображения все результаты измерений КСЯ, отнесённые к классу «покрытая снегом земная поверхность», использовались для расчёта средних M и стандартных отклонений σ значений КСЯ в среднем ИК-канале прибора. В случае если результат измерения КСЯ $R^i_{1,603}$ в этом канале отличался от среднего значения более чем на два стандартных отклонения, т. е. выполнялось условие $\left|R^i_{1,603} - M\right| > 2\sigma,$ то этот результат измерения считался шумовым и исключался из дальнейшей обработки.

Построение композитного изображения было основано на поиске минимального отклонения $\Delta_{\min}$ свободного от влияния шумов (т. е. не отфильтрованного на предыдущем этапе) измерения КСЯ покрытой снегом земной поверхности от среднего значения КСЯ M', рассчитанного на основе всей совокупности незашумленных результатов измерений для рассматриваемого пикселя. Измерение КСЯ R^i, удовлетворяющее условию $\left|R^i - M'\right| = \Delta_{\min}$, использовалось в качестве значения КСЯ пикселя формируемого композитного изображения. Таким образом, по данным Proba-V были построены композитные изображения КСЯ в красном и ближнем ИК-каналах прибора, отражающие пространственное распределение спектрально-отражательных характеристик покрытой снегом земной поверхности.

Данные о пространственном распределении типов земного покрова

Для учёта возможных различий параметров взаимосвязи запаса стволовой древесины и КСЯ покрытой снегом земной поверхности в зависимости от типа леса (лиственный/хвойный, вечнозелёный/листопадный) был подготовлен набор опорных данных о распределении различных типов земного покрова на территории исследования с пространственным разрешением 1 км для совместного использования с данными карты BIOMASAR. Поскольку указанная карта характеризует величину запаса древесины в 2010 г., а данные Proba-V доступны начиная с 2014 г., на первом этапе подготовки опорных данных были определены стабильные участки территории, на которых тип земного покрова не изменился за указанный период. Для этого использовался временной ряд карт растительного покрова России за 2010–2014 гг. с исходным пространственным разрешением 250 м, загрубленным до 1 км. При этом пиксель размером 1 км включался в набор опорных данных при выполнении следующих условий: 1) все пиксели размером 250 м внутри рассматриваемого пикселя принадлежат к одному классу; 2) класс земного покрова всех этих пикселей не изменился за вышеуказанный период. Кроме того, в набор опорных данных не включались пиксели, для которых оценка запаса в карте BIOMASAR имеет высокую погрешность.

Таким образом, были подготовлены опорные данные о пространственном распределении шести классов лесного покрова, распространённых на исследуемой территории: темнохвойный лес, лиственный лес, лиственничный лес и три класса смешанных лесов, отличающихся соотношением хвойных и лиственных пород. Также для анализа взаимосвязи запаса древесины и КСЯ в области низких значений запаса были подготовлены данные о распределении класса непокрытых лесом (но с возможным присутствием древесно-кустарниковой растительности низкой сомкнутости) территорий, включающих в себя луга, сельскохозяйственные земли и различные типы тундровых экосистем.

Решение многих задач спутникового картографирования и мониторинга растительного покрова в условиях сильно пересечённой местности требует адекватного учёта радиометрических искажений в данных ДЗЗ, вызванных рельефом территории (Егоров, Барталев, 2016). Учёт влияния рельефа в данной работе достигался выделением в три отдельные страты территорий, соответствующих затенённым северным склонам, освещённым южным склонам и близких к горизонтальным участкам земной поверхности, с последующей независимой обработкой данных ДЗЗ в пределах каждой из страт. Для этого использовались данные ЦМР SRTM, на основе которых были рассчитаны углы наклона *slp* и азимуты склонов *asp*.

Полученные данные позволили разбить каждый из шести классов лесов и класс нелесных территорий на 3 подкласса, а именно:

$$\left.\begin{array}{llll} asp < 90^\circ & \text{или} \quad asp > 270^\circ \quad \text{и} \quad slp \geqslant 5^\circ & & \text{— северные склоны;} \\ 270^\circ \geqslant asp \geqslant 90^\circ & \text{и} \quad slp \geqslant 5^\circ & & \text{— южные склоны;} \\ slp < 5^\circ & & & \text{— территория, близкая к горизонтальной.} \end{array}\right\} \quad (2)$$

Моделирование взаимосвязи запаса стволовой древесины в лесах и КСЯ покрытой снегом земной поверхности

Выполненные ранее исследования (Барталев и др., 2016а) показали возможность моделирования запаса древесины [м^3/га] на основе значений КСЯ покрытой снегом земной поверхности в красной области спектра с использованием обратной зависимости (*рис. 2*):

$$GSV = a_i^j RED^{-1} + b_i^j, \quad (3)$$

где GSV — запас древесины; RED — КСЯ в красном канале; a_i^j и b_i^j — коэффициенты, $i = 1..6$ — номер класса лесного покрова, $j = 1..3$ — номер подкласса, соответствующий типу склона. Параметризация модели (3) выполнялась на основе данных карты BIOMASAR и вышеописанного композитного изображения КСЯ покрытой снегом земной поверхности по данным Proba-V, загрубленного до разрешения 1 км, с использованием подготовленных опорных данных о пространственном распределении различных типов земного покрова.

Для каждой пары i, j, соответствующей одному из классов лесного покрова на склоне определённой ориентации/крутизны, выполнялась независимая оценка средних значений, дисперсий и ковариации величин RED^{-1} по данным композитного изображения КСЯ и GSV по данным BIOMASAR. Расчёт указанных статистических характеристик выполнялся на основе опорных данных, включающих в себя как пиксели i-го класса лесного покрова, так и пиксели класса нелесных территорий, что позволило обеспечить достаточное число измерений во всём диапазоне значений запаса.

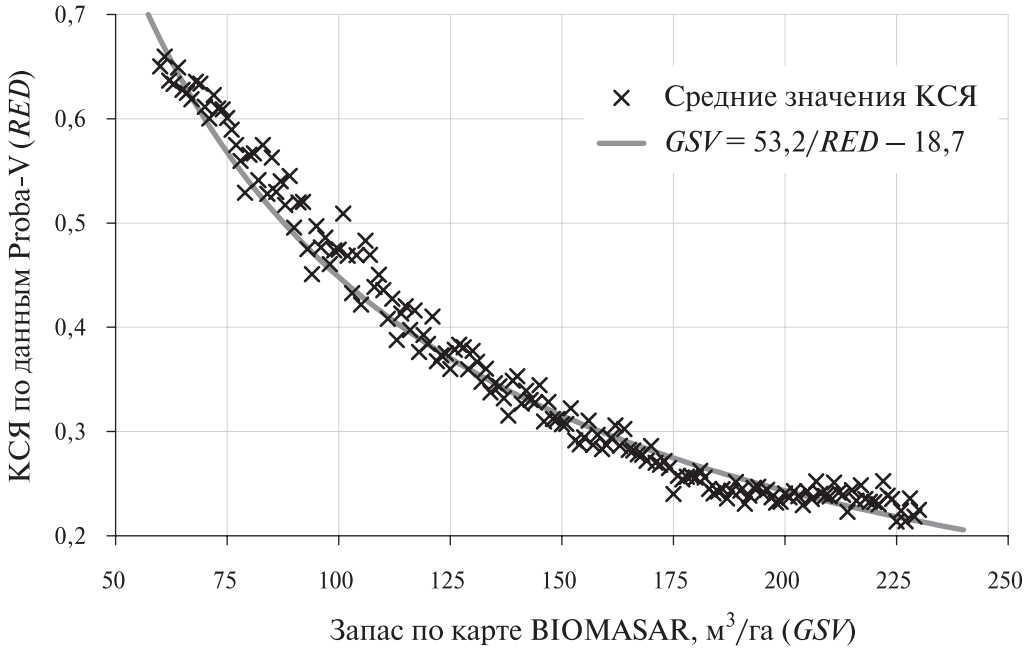

Рис. 2. Пример аппроксимации зависимости между КСЯ покрытой снегом земной поверхности в красном канале Proba-V и запасом тёмнохвойных лесов

Полученные данные использовались для оценки коэффициентов a_i^j и b_i^j соотношения (3) на основе метода наименьших квадратов:

$$\left.\begin{aligned} a_i^j &= \frac{\mathrm{cov}_i^j(RED^{-1}, GSV)}{\mathrm{var}_i^j(RED^{-1})}, \\ b_i^j &= \mathrm{mean}_i^j(GSV) - a_i^j \mathrm{mean}_i^j(RED^{-1}), \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

где $\mathrm{cov}_i^j(...)$, $\mathrm{var}_i^j(...)$ и $\mathrm{mean}_i^j(...)$ — ковариация, дисперсия и среднее значение указанных в скобках величин для пары i, j соответственно.

Таким образом, для каждого из шести распространённых на территории исследования классов лесного покрова на каждом из трёх рассматриваемых типов рельефа местности была получена модель зависимости запаса стволовой древесины от КСЯ покрытой снегом земной поверхности в красном канале Proba-V. При этом величина коэффициента детерминации R^2, характеризующая аппроксимацию указанной зависимости моделью (3), составила в среднем 0,74.

Результаты и обсуждение

Результаты моделирования были использованы для получения оценок запаса стволовой древесины в лесах, основанных на данных измерений КСЯ покрытой снегом земной поверхности с пространственным разрешением 100 м. Принадлежность пикселя к классу лесного покрова i определялась в соответствии с вышеупомянутой картой растительного покрова Приморского края, а информация о его соответствии выделенной по характеристикам рельефа местности страте j была получена согласно критериям (2) на основе данных ЦМР SRTM. Для каждого пикселя композитного изображения, принадлежащего лесному покрову, оценка запаса выполнялась на основе его значения КСЯ и пары i, j в соответствии с моделью (3).

Применение разработанного метода позволило сформировать экспериментальную карту запаса стволовой древесины [м^3/га] в лесах Приморского края (*рис. 3*, см. с. 164). Разработанная карта интегрирована в состав информационной системы дистанционного мониторинга лесов «ВЕГА-Приморье» (Лупян и др., 2016).

Полученные данные использованы для расчёта интегральной величины запаса древесины в лесах Приморского края. Результат оценки по спутниковым данным (1953,32 млн м^3) хорошо согласуется с данными Федерального агентства лесного хозяйства об «Общем запасе древесины лесных насаждений на землях лесного фонда и землях иных категорий» на территории Приморского края в 2010 г. (1936,67 млн м^3, http://www.fedstat.ru/indicator/data.do?id=38195) с величиной относительного отклонения 0,9 %.

Результаты более детального сравнения спутниковых оценок величины запаса с данными ГУЛ 2008 г. на уровне лесхозов (в границах указанного года) приведены на *рис. 4* (см. с. 165). Полученное значение $R^2 = 0{,}96$ говорит о высоком уровне согласованности сравниваемых данных.

Также выполнялось сравнение полученных оценок удельного запаса стволовой древесины с выборочными данными наземных обследований лесов на 79 участках, отобранных по критериям площади, компактности (соотношения площади и периметра) и однородности спектрально-отражательных характеристик. По результатам сравнения величина среднеквадратического отклонения запасов стволовой древесины, измеренных в диапазоне значений 50–250 м^3/га, составила 36,8 м^3/га, а среднее значение относительной ошибки — 21 %. Более подробное распределение среднеквадратических и относительных отклонений в зависимости от величины оцениваемого запаса приведено в *таблице* (см. с. 165).

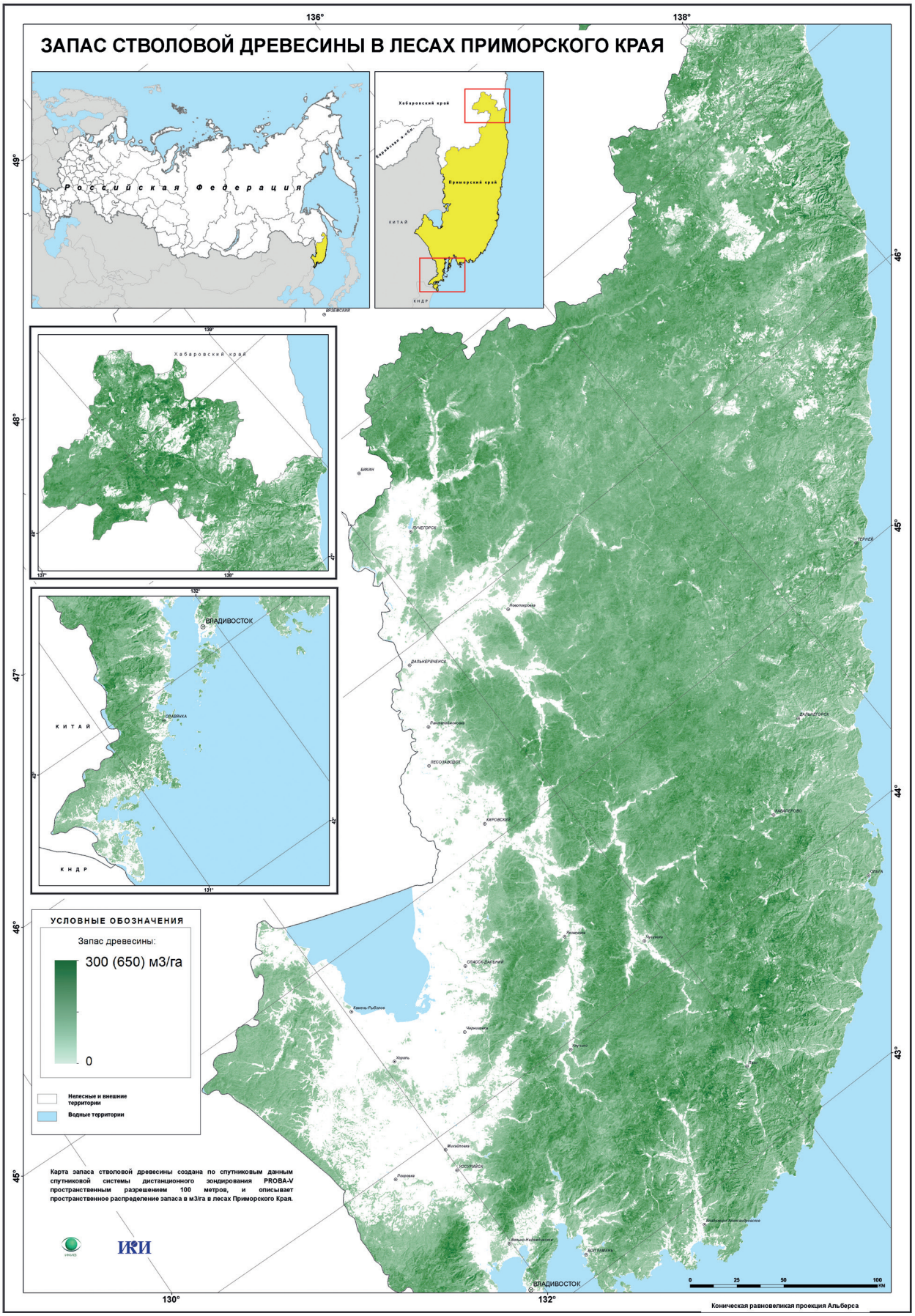

Рис. 3. Карта запасов стволовой древесины в лесах Приморского края по данным Proba-V

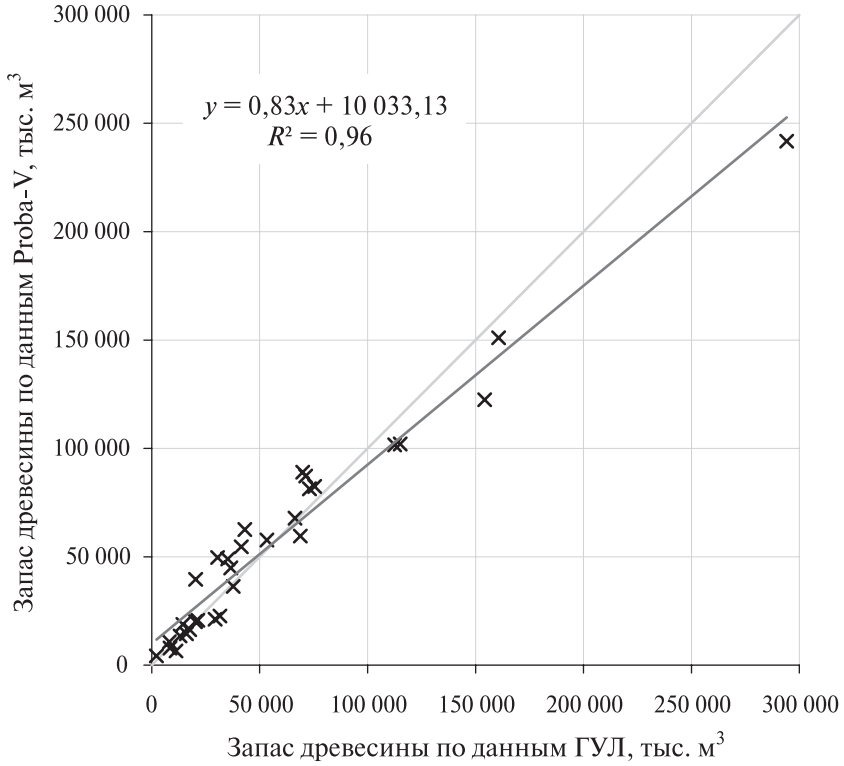

Рис. 4. Сравнение полученных оценок интегральной величины запаса стволовой древесины с данными ГУЛ 2008 г. на уровне лесхозов

Точность оценки запаса древесины для различных диапазонов его значений

Параметр	Диапазон значений запаса древесины, м^3/га			
	50–100	100–150	150–200	200–250
Среднеквадратическое отклонение, м^3/га	50,1	31,7	36,4	40,5
Среднее относительное отклонение, %	38,1	19,2	19,9	19,6

Таким образом, анализ точности разработанного метода оценки запаса стволовой древесины лесов продемонстрировал достаточно высокий уровень достоверности получаемых результатов на различных уровнях пространственной агрегации. При этом предложенный метод оценки запаса древесины в лесах обеспечивает более чем двукратное повышение пространственного разрешения по сравнению с доступными в настоящее время наборами данных о величине запаса на территории России, полученными по данным ДЗЗ. Необходимо также отметить, что разработанный метод является хорошо масштабируемым. Применение метода не требует наличия наземных данных, а все используемые данные ДЗЗ и продукты их обработки либо уже доступны (карта BIOMASAR, карты растительности России, ЦМР SRTM), либо могут быть подготовлены для всей территории России. Это обеспечивает потенциальную возможность применения данного метода для регулярной оценки запаса стволовой древесины в национальном масштабе с пространственным разрешением 100 м при условии использования локально-адаптивного подхода для учёта вариабельности спектрально-отражательных характеристик классов лесного покрова на больших территориях (Bartalev et al., 2014).

Исследования проводились при финансовой поддержке Минобрнауки России: контракт 14.607.21.0122 «Разработка методов и программных комплексов автоматизированной обработки спутниковых данных дистанционного зондирования Земли для создания и поддержки

информационных сервисов мониторинга ресурсного потенциала и состояния лесов России», уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI60715X0122. Обработка спутниковых данных и программная реализация разработанных методов были выполнены с использованием ресурсов ЦКП ИКИ-Мониторинг (Лупян и др., 2015).

Литература

1. *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Ершов Д. В.*, *Жарко В. О.*, *Колбудаев П. А.*, *Лупян Е. А.*, *Плотников Д. Е.* (2016б) Развитие возможностей регионального спутникового картографирования растительного покрова на примере Приморского края // 14-я всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2016. С. 326.
2. *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Ершов Д. В.*, *Исаев А. С.*, *Лупян Е. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Уваров И. А.* Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
3. *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Жарко В. О.*, *Лупян Е. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Хвостиков С. А.*, *Шабанов Н. В.* (2016а) Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
4. *Егоров В. А.*, *Барталев С. А.* Метод радиометрической коррекции искажений отражательных характеристик земного покрова в данных спутниковых измерений, вызванных влиянием рельефа местности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 192–201.
5. *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. С.*, *Бурцев М. А.*, *Егоров В. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Жарко В. О.*, *Кашницкий А. В.*, *Колбудаев П. А.*, *Крамарева Л. С.*, *Мазуров А. А.*, *Оксюкевич А. Ю.*, *Плотников Д. Е.*, *Прошин А. А.*, *Сенько К. С.*, *Уваров И. А.*, *Хвостиков С. А.*, *Ховратович Т. С.* Информационная система комплексного дистанционного мониторинга лесов «Вега-Приморье» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 11–28.
6. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Кашницкий А. В.*, *Мазуров А. А.*, *Матвеев А. М.*, *Суднева О. А.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
7. *Щепащенко Д. Г.*, *Швиденко А. З.*, *Пергер К.*, *Дресел К.*, *Фриц Ш.*, *Лакида П.*, *Мухортова Л. В.*, *Усольцев В. А.*, *Бобкова К. С.*, *Осипов А. Ф.*, *Мартыненко О. В.*, *Карминов В. Н.*, *Онтиков П. В.*, *Щепащенко М. В.*, *Краснер Ф.* Изучение фитомассы лесов: текущее состояние и перспективы // Сибирский лесной журн. 2017. № 4. С. 3–11.
8. *Arino O.*, *Bicheron P.*, *Achard F.*, *Latham J.*, *Witt R.*, *Weber J.* GlobCover: the most detailed portrait of Earth // ESA Bulletin — European Space Agency. 2008. No. 136. P. 24–31.
9. *Bartalev S.*, *Egorov V.*, *Loupian E.*, *Khvostikov S.* A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data // Remote Sensing Letters. 2014. V. 5. Iss. 1. P. 55–64.
10. *Farr T.*, *Rosen P.*, *Caro E.*, *Crippen R.*, *Duren R.*, *Hensley S.*, *Kobrick M.*, *Paller M.*, *Rodriguez E.*, *Roth L.*, *Seal D.*, *Shaffer S.*, *Shimada J.*, *Umland J.*, *Werner M.*, *Oskin M.*, *Burbank D.*, *Alsdorf D.* The Shuttle Radar Topography Mission // Reviews of Geophysics. 2007. V. 45. Iss. 2.
11. *Hall D.*, *Riggs G.*, *Salomonson V.* Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data // Remote Sensing of Environment. 1995. V. 54. Iss. 2. P. 127–140.
12. *Rodríguez-Veiga P.*, *Wheeler J.*, *Louis V.*, *Tansey K.*, *Balzter H.* Quantifying Forest Biomass Carbon Stocks From Space // Current Forestry Reports. 2017. V. 3. Iss. 1. P. 1–18.
13. *Santoro M.*, *Beaudoin A.*, *Beer C.*, *Cartus O.*, *Fransso J.*, *Hall R.*, *Pathe C.*, *Schmullius C.*, *Schepaschenko D.*, *Shvidenko A.*, *Thurner M.*, *Wegmüller U.* Forest growing stock volume of the northern hemisphere: Spatially explicit estimates for 2010 derived from Envisat ASAR // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 168. P. 316–334.
14. *Santoro M.*, *Beer C.*, *Cartus O.*, *Schmullius C.*, *Shvidenko A.*, *McCallum I.*, *Wegmüller U.*, *Wiesmann A.* Retrieval of growing stock volume in boreal forest using hyper-temporal series of Envisat ASAR ScanSAR backscatter measurements // Remote Sensing of Environment. 2011. V. 115. Iss. 2. P. 490–507.

Investigation of forest growing stock volume estimation possibilities over Russian Primorsky Krai region using Proba-V satellite data

V. O. Zharko, S. A. Bartalev, V. A. Egorov

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: zharko@d902.iki.rssi.ru

This paper presents a method for forest growing stock volume (GSV) estimation using 100 m Proba-V satellite data, acquired during the period of persistent snow cover. The method is based on the approximation of the relation between GSV and red-band snow-covered surface reflectance. The territory of Russian Primorsky Krai federal subject is selected as a test region. A method for production of Proba-V data-based cloud-free composite images, providing the info on the spatial distribution of snow-covered surface spectral reflectance, is described. An algorithm to prepare a dataset on spatial distribution of various land cover types (using satellite data-based vegetation maps) and terrain characteristics (using digital elevation model data) is presented. This dataset is used to stratify the territory into areas, uniform with respect to the solar illumination conditions, including shadowed northern and illuminated southern slopes, as well as approximately horizontal sites, with subsequent independent processing of satellite data within each stratum. Parameterization of a model, approximating GSV-reflectance relation, was performed separately for each forest cover type found on the study area based on a freely available 1 km GSV map under the assumption of inverse GSV-reflectance dependency. Approximation results are used to obtain GSV estimates derived from Proba-V data based snow-covered surface reflectance composite image. Comparison of Proba-V data based GSV estimates with state forest account data at the level of Primorsky Krai forest management units demonstrates determination coefficient $R^2 = 0.96$.

Keywords: remote sensing, forests, growing stock volume, GSV, Proba-V

Accepted: 23.11.2017
DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-157-168

References

1. Bartalev S. A., Egorov V. A., Ershov D. V., Zharko V. O., Kolbudaev P. A., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Razvitie vozmozhnostei regional'nogo sputnikovogo kartografirovaniya rastitel'nogo pokrova na primere Primorskogo kraya (Development of regional satellite vegetation mapping possibilities in the case of Primorie region), *14 konf. "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (14th Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space", Book of Abstracts), Moscow, 2016, p. 326.
2. Bartalev S. A., Egorov V. A., Ershov D. V., Isaev A. S., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Uvarov I. A., Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii po dannym spektroradiometra MODIS (Mapping of Russia's Vegetation Cover Using MODIS Satellite Spectroradiometer Data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302.
3. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V. (2016a) *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p.
4. Egorov V. A., Bartalev S. A., Metod radiometricheskoi korrektsii iskazhenii otrazhatel'nykh kharakteristik zemnogo pokrova v dannykh sputnikovykh izmerenii, vyzvannykh vliyaniem rel'efa mestnosti (Radiometric correction for topography-induced distortions in land cover reflectance derived from satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 192–201.
5. Loupian E. A., Bartalev S. A., Balashov I. V., Bartalev S. S., Burtsev M. A., Egorov V. A., Efremov V. Yu., Zharko V. O., Kashnitskii A. V., Kolbudaev P. A., Kramareva L. S., Mazurov A. A., Oksyukevich A. Yu., Plotnikov D. E., Proshin A. A., Sen'ko K. S., Uvarov I. A., Khvostikov S. A., Khovratovich T. S., Informatsionnaya sistema kompleksnogo distantsionnogo monitoringa lesov "Vega-Primor'e" (Vega-Primorie: complex remote forest monitoring information system), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 11–28.

6. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskii A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
7. Shchepashchenko D. G., Shvidenko A. Z., Perger K., Dresel K., Frits Sh., Lakida P., Mukhortova L. V., Usol'tsev V. A., Bobkova K. S., Osipov A. F., Martynenko O. V., Karminov V. N., Ontikov P. V., Shchepashchenko M. V., Kraksner F., Izuchenie fitomassy lesov: tekushchee sostoyanie i perspektivy (Forest biomass observation: current state and prospective), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No. 4, pp. 3–11.
8. Arino O., Bicheron P., Achard F., Latham J., Witt R., Weber J., GlobCover: the most detailed portrait of Earth, *ESA Bulletin — European Space Agency*, 2008, No. 136, pp. 24–31.
9. Bartalev S., Egorov V., Loupian E., Khvostikov S., A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data, *Remote Sensing Letters*, 2014, Vol. 5, Issue 1, pp. 55–64.
10. Farr T., Rosen P., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D., The Shuttle Radar Topography Mission, *Reviews of Geophysics*, 2007, Vol. 45, Issue 2.
11. Hall D., Riggs G., Salomonson V., Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data, *Remote Sensing of Environment*, 1995, Vol. 54, Issue 2, pp. 127–140.
12. Rodríguez-Veiga P., Wheeler J., Louis V., Tansey K., Balzter H., Quantifying Forest Biomass Carbon Stocks From Space, *Current Forestry Reports*, 2017, Vol. 3, Issue 1, pp. 1–18.
13. Santoro M., Beaudoin A., Beer C., Cartus O., Fransson J., Hall R., Pathe C., Schmullius C., Schepaschenko D., Shvidenko A., Thurner M., Wegmüller U., Forest growing stock volume of the northern hemisphere: Spatially explicit estimates for 2010 derived from Envisat ASAR, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 168, pp. 316–334.
14. Santoro M., Beer C., Cartus O., Schmullius C., Shvidenko A., McCallum I., Wegmüller U., Wiesmann A., Retrieval of growing stock volume in boreal forest using hyper-temporal series of Envisat ASAR ScanSAR backscatter measurements, *Remote Sensing of Environment*, 2011, Vol. 115, Issue 2, pp. 490–507.