

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 528.8.044.2:630*5(571.54)

К ВОПРОСУ О ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ ЛЕСА ПО ДАННЫМ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ TanDEM-X

Т. Н. Чимитдоржиев¹, М. Е. Быков¹, Ю. И. Кантемиров²,
И. И. Кирбижекова¹, Б. Б. Лабаров³, А. К. Балтухаев¹

¹ *Институт физического материаловедения СО РАН
670047, Республика Бурятия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6*

² *Компания «СОВЗОНД»
115563, Москва, ул. Шипиловская, 28а, бизнес-центр «Милан»*

³ *Институт землеустройства, кадастров и мелиорации
Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В. Р. Филиппова
670024, Республика Бурятия, Улан-Удэ, ул. Пушкина, 8*

E-mail: scidir@ipms.bsnet.ru, evgomod@yahoo.com, y_kantemirov@sovzond.ru,
kirbizhekova@bk.ru, labarov_balchin@mail.ru, arcadiy_b@mail.ru

Поступила в редакцию 28.01.2016 г.

Представлены результаты исследований с целью валидации радиолокационного интерферометрического метода определения высоты лесного полога на основе спутниковых данных TanDEM-X и ALOS PALSAR. Исследования проведены на территории Байкало-Кударинского лесничества Республики Бурятия. Лесная растительность представлена преимущественно хвойными породами – сосной и елью с незначительной примесью лиственных пород – осины, березы и др. Высота лесной растительности определена путем вычитания цифровой модели рельефа (ЦМР) из цифровой модели местности (ЦММ). ЦМР построена по данным L-диапазона (длина волны 23.5 см) спутникового радара ALOS PALSAR на горизонтальной согласованной поляризации. При исследовании полагалось, что радиолокационный сигнал ALOS PALSAR проходит всю толщу леса и отражается от подстилающей поверхности, позволяя восстановить рельеф местности под лесным пологом. Для получения ЦММ использованы данные X-диапазона (длина волны 3 см) радиолокационного интерферометра TanDEM-X. В последнем случае предполагалось, что радиолокационный эхо-сигнал рассеивается от некоторой виртуальной поверхности расположения фазовых центров рассеяния, характеризующих верхнюю границу сплошного лесного полога. Для проверки точности спутниковых определений высоты леса на исследуемой территории выполнены высокоточные геодезические измерения высоты деревьев с помощью электронного тахеометра и координат контрольных точек при помощи дифференциальных GPS-приемников. Расхождение спутниковых и наземных измерений по 11 тестовым участкам не превысило 2 м, что в основном связано с различием методик измерения – высоты отдельных деревьев наземными методами и высоты сплошного лесного полога с помощью радарной интерферометрии.

Ключевые слова: *спутниковая радиолокация, дифференциальная интерферометрия, высота леса, валидация.*

DOI: 10.15372/SJFS20160413

© Чимитдоржиев Т. Н., Быков М. Е., Кантемиров Ю. И., Кирбижекова И. И., Лабаров Б. Б., Балтухаев А. К., 2016

ВВЕДЕНИЕ

Радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) широко используются в дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) из космоса наряду с сенсорами видимого и инфракрасного диапазона (Lillesand et al., 2004; Сухих, 2005). Преимуществом радарного зондирования является независимость процесса получения изображений от освещенности снимаемой поверхности и наличия облачности. Кроме того, радиоволны обладают определенной способностью проникать в подстилающие слои почвенно-растительных и снежно-ледовых покровов, обеспечивая подповерхностное зондирование (McRoberts, Tomppo, 2007; Верба и др., 2009). Широкое применение РСА космического базирования для картирования земных покровов обусловлено их высокой разрешающей способностью, сравнимой с разрешением оптических систем. Например, для таких РСА, как COSMO-SkyMed и TerraSAR-X, разрешение по поверхности достигает 1 м, а для разведывательных спутников SAR-Lupe – 0.5 м.

Значительное развитие в мире получили методы радиолокационной интерферометрии, позволяющей выполнять построение цифровых моделей рельефа (ЦМР) и цифровых моделей местности (ЦММ). Суть метода радарной интерферометрии заключается в съемке одного и того же участка земной поверхности с двух спутников или из двух точек орбиты одного радиолокатора. Разница расстояний, пройденных двумя радиолокационными эхо-сигналами, может быть измерена как разность фаз, на основе которой строятся ЦМР и ЦММ (Леонов и др., 2011; Кантемиров, 2013). В последнем случае модель отображает рельеф только на открытых и безлесных участках. При наличии строений и растительности ЦММ отличается от ЦМР на величину, соответствующую высоте различных объектов инфраструктуры, зданий, лесного полога и пр.

В настоящее время доступны спутниковые данные в X-, C- и L-диапазонах (длина волны 3, 5 и 25 см) таких РСА, как TanDEM-X, Radarsat, Sentinel-1A, ALOS PALSAR и ALOS PALSAR-2 (Верба и др., 2009). В 2020 г. планируется запуск на орбиту РСА BIOMASS в P-диапазоне (длина волны 75 см) для составления глобальной карты распределения биомассы лесной растительности и исследования ее динамики.

В зависимости от используемого диапазона и поляризации радиолокационный эхо-сигнал проникает в толщу леса и рассеивается неодно-

родностями леса на различных высотах. Корреляция интенсивности отраженного эхо-сигнала с параметрами лесной среды наиболее высока в P-диапазоне и уменьшается с длиной волны (Le Toan et al., 1992). При плотном древостое наблюдается эффект насыщения, усиливающийся при уменьшении длины волны, что накладывает некоторые ограничения при определении биофизических параметров лесной среды. Так, если в P-диапазоне можно изучать даже тропический лес высотой до 40 м и биомассой 200–600 т/га, то в L-диапазоне эффект насыщения на согласованной горизонтальной поляризации HH наступает уже при высоте леса ~ 20 м и биомассе ~ 150 т/га, характерных для бореального леса, а на согласованной вертикальной поляризации VV – уже при ~ 70 т/га (Watanabe et al., 2004).

Радарный отклик C-диапазона с длиной волны 5–6 см на аналогичной поляризации связан с распределением и геометрическими размерами ветвей верхней части лесного полога или кроны деревьев (Leckie, Ranson, 1998; McRoberts, Tomppo, 2007). Для дистанционной оценки средней высоты леса интерес представляет трехсантиметровый X-диапазон радиолокации (Чимитдоржиев и др., 2014). Рассеяние в данном диапазоне длин волн происходит от ветвей, листьев и хвои на верхней границе леса, т. е. от некой виртуальной поверхности, характеризующей сплошное проективное покрытие лесного полога. Последнее обстоятельство используется в радиолокационной интерферометрии для оценки средней высоты леса.

В данной работе представлены результаты исследований, цель которых – валидация метода спутникового определения высоты лесного полога по радиолокационным интерферометрическим данным бистатистического радара TanDEM-X и ALOS PALSAR.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проведены на территории Байкало-Кударинского лесничества Кабанского района Республики Бурятия с координатами 52°10' с. ш., 106°48' в. д. Лесной массив расположен с восточной стороны от р. Селенга на террасе речной долины с плавными формами рельефа, без резких и значительных перепадов высоты. В среднем локальные вариации рельефа в пределах лесных выделов не превышают 3–4 м. Лесная растительность представлена преимущественно хвойными породами – сосной, елью с незначительной примесью лиственных

пород – осины, березы и др. (Леса..., 2008; Ев-докименко, 2014; Зиганшин, 2014).

Для изучения возможностей оценки высоты лесной растительности использованы три интерферометрических пары данных TanDEM-X на горизонтальной согласованной поляризации (НН) с пространственным разрешением 5 м от 18 февраля 2012 г., 25 и 29 мая 2013 г. и интерферометрические пары PCA ALOS PALSAR на поляризации НН с разрешением 10 м от 20 августа и 05 октября 2006 г.

В силу значительного количества публикаций с детальным описанием технологии построения ЦМР и ЦММ при помощи радарной интерферометрии (Леонов и др., 2011; Кантемиров, 2013; Чимитдоржиев и др., 2014) авторы не приводят алгоритм построения таковых. Отметим лишь, что среднюю высоту леса и деревьев определяли по 11 лесным выделам. Интерферометрическая обработка радарных данных для задач картирования высоты леса выполнена в программном обеспечении ENVI/SARscape (Exelis VIS, США-Франция), эксклюзивным дистрибьютором которого на территории России и СНГ является компания «СОВЗОНД».

Высота лесной растительности может быть определена вычитанием ЦМР из ЦММ. Цифровая модель рельефа создается по данным спутникового радара ALOS PALSAR L-диапазона (длина волны 23.5 см) на горизонтальной согласованной поляризации НН с пространственным разрешением 10 м. В данном диапазоне, как указано выше, радиолокационный сигнал проникает сквозь толщу хвойного леса (высотой ~ 15–20 м и биомассой ~ 130–150 т/га) и отражается от подстилающей поверхности, т. е. фактически радиолокационная интерферометрия с указанными параметрами позволяет восстановить рельеф местности под лесным пологом. Для получения трехмерной цифровой модели местности с учетом лесной растительности использованы интерферометрические данные TanDEM-X с длиной волны 3 см. В данном диапазоне радиолокационный эхо-сигнал рассеивается от некоторой усредненной виртуальной поверхности расположения фазовых центров рассеяния, характеризующих верхнюю границу сплошного лесного полога.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для проверки точности радиолокационных интерферометрических определений высоты на 11 тестовых участках леса выполнены

высокоточные геодезические измерения. Статистическая репрезентативность обеспечена типическим способом отбора данных – наиболее распространенных (типовых) тестовых участков Байкало-Кударинского хвойного леса и контрольных точек. Для подтверждения универсальности методики дистанционного определения высоты леса в дальнейшем, конечно, необходимо будет апробировать технологию и для лесов другого породного состава: лиственных, смешанных и лиственных, расположенных в данных и иных природно-климатических условиях.

Высота деревьев измерена с помощью электронного тахеометра, а координаты контрольных точек – при помощи дифференциальных GPS-приемников (Соловьев, 2000). Точность последних измерений 1–2 см.

На рис. 1 приведено псевдоцветовое трехмерное представление леса, полученное наложением оптического цветного изображения на ЦММ.

Сравнение результатов полевых геодезических и радиолокационных интерферометрических измерений показано на рис. 2.

Отметим, что с точки зрения зависимости статистической значимости результатов от числа наблюдений в согласии с теорией малых выборок Стьюдента и Фишера статистический подход справедлив и при малом числе наблюдений, только классическая теория ошибок преувеличивает надежность, причем тем больше, чем меньше n .

Сближение оценок происходит при $n \sim 20$. При меньшем числе наблюдений величина доверительного интервала (погрешность измерений Δ) корректируется посредством соответствующего множителя – коэффициента Стьюдента t (Гмурман, 2003). Необходимое число наблюдений n_{\min} можно рассчитать исходя из требуемой точности измерений ($\Delta < \epsilon$) или принятого соотношения абсолютной ошибки и среднеквадратичного отклонения ($\Delta/\sigma = 100, 50, \dots, 10\%$ и т. д.) при заданном уровне доверия: чем больше измерений – тем выше точность. Но увеличение числа наблюдений целесообразно только до тех пор, пока случайная ошибка не станет сравнимой с систематической. В данном случае при $n = 11$ разница спутниковых и наземных измерений высоты составила (1.46 ± 0.91) м, доверительный интервал рассчитан при вероятности 0.95. Поскольку погрешность измерений 0.91 м почти вдвое меньше систематической

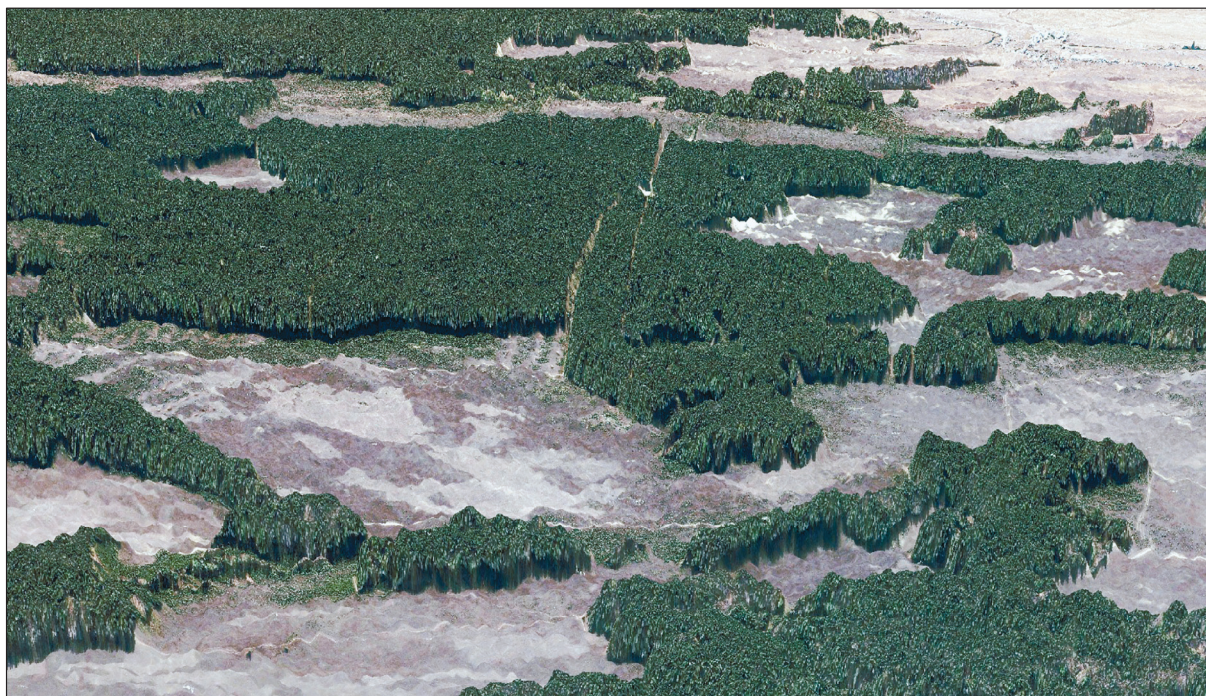


Рис. 1. Псевдоцветовое трехмерное отображение фрагмента цифровой модели средней высоты деревьев, полученной по тандемной паре радарных снимков TerraSAR-X/TanDEM-X от 18.02.2012.

ошибки 2 м, соответствующей относительной точности тандемных измерений высоты на пологих участках (TanDEM-X..., 2010), то, очевидно, нет необходимости в увеличении числа измерений.

Расхождение не превышает в большинстве случаев 2.5 м (см. рис. 2), что, по нашему мнению, связано с различием методик измерения. Как отмечалось выше, радарная интерферометрия позволяет рассчитать усредненную высоту лесного полога. Что касается полевых геодези-

ческих измерений, то при помощи электронного тахеометра определяли высоту деревьев от уровня земли до вершин, возвышающихся над «сплошной» лесной средой.

По результатам обработки разносезонных тандемных пар радарных снимков X-диапазона и пары радарных снимков L-диапазона, полученных с повторных витков орбиты, и сравнения результатов их обработки с данными наземных замеров высот деревьев сформулированы требования к характеристикам интерферометрических пар, пригодных для получения цифровых моделей высоты леса с наибольшей точностью (в частности, к сезонности, базовым линиям (базисам съемки), к длинам волн, пространственному разрешению, одновременности съемки и т. д.). Пилотная территория характеризовалась плоским рельефом. При использовании предложенного подхода на практике в условиях более ярко выраженного рельефа желательно наличие ЦМР (которые будут вычитаться из ЦММ с получением на выходе моделей высоты леса), полученных по топографическим картам или из других источников. В частности, представляется целесообразным использование для расчета ЦМР данных перспективного радарного спутника BIOMASS P-диапазона длин волн (75 см), сигнал которого будет «просвечивать» лес целиком.

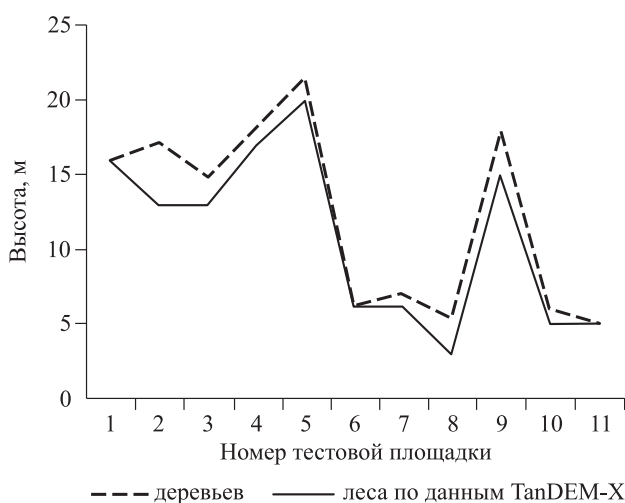


Рис. 2. Сравнение спутниковых (пунктир) и наземных (сплошная линия) измерений высоты леса.

Для безлесных участков ЦММ и ЦМР совпадают, что в перспективе позволит использовать рельеф безлесных участков в качестве основы для интерполяции и моделирования ЦМР лесной растительности. Точность построения будет зависеть от количества, плотности и равномерности распределения сети опорных точек. Поскольку лесные массивы Байкальского региона не очень густые (средняя полнота насаждений составляет 0.5–0.6), то на соответствующих радиолокационных изображениях с высоким разрешением хорошо заметны даже небольшие по площади лесные полянки и прогалины, что позволяет получить достаточное количество опорных точек для построения ЦМР с высокой степенью точности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная оценка расхождений при измерении высоты леса полевыми геодезическими методами и на основе спутниковых данных показала принципиальную возможность дистанционных измерений средней высоты лесного полога по данным космической радарной интерферометрии TanDEM-X.

Отметим, что для построения детальной трехмерной модели леса (с шагом матрицы высот 5 м) следует использовать интерферометрические пары снимков TanDEM-X, полученные: 1) одновременно в тандемном режиме съемки для исключения дополнительной разности фаз, обусловленной различиями состояния атмосферы при съемках за разные даты; 2) в летний период при наличии у лиственных деревьев лиственного покрова во избежание дополнительного понижения усредненной высоты лесного полога; 3) с достаточно большой базовой линией, чтобы средняя высота деревьев была сопоставима с перепадом фазы в 2π на интерферограмме.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 15-47-04386 и 16-08-00646. Интерферометрические данные TanDEM-X получены по гранту Германского аэрокосмического центра DLR XTI_HYDR0485 «The Study of Cryogenic Processes in Siberia by Interferometry TanDEM-X». Интерферометрические данные ALOS PALSAR получены в рамках соглашения с японским аэрокосмическим агентством JAXA «Research Agreement for the Advanced Land Observing Satellite-2 (for the fourth RA)» PIN. 1131.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Верба В. С., Неронский Л. Б., Поливанов С. С. Тенденции развития систем радиолокационного наблюдения космического базирования // Научно-технические технологии. 2009. Т. 10. № 8. С. 3–9.
- Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. 9-е изд. М.: Высш. школа, 2003. 479 с.
- Евдокименко М. Д. Пирогенные трансформации байкальских лесов. Ретроспектива и современность // Сиб. лесн. журн. 2014. № 3. С. 64–75.
- Зиганишин Р. А. Лесной массив: географические и лесотаксационные признаки и критерии // Сиб. лесн. журн. 2014. № 1. С. 50–68.
- Кантемиров Ю. И. Космический радарный мониторинг смещений и деформаций земной поверхности и сооружений: опыт компании «СОВЗОНД» // Вестн. СибГАУ. 2013. № 5 (51). С. 52–54.
- Леонов В. М., Рябоконт Г. П., Федотов А. П., Захаров А. И. Возможности получения и использования комплексной информации радиолокационного и оптического диапазонов спектра при решении задач высокоточного картографирования земной поверхности и построения цифровых моделей ее рельефа // Космонавтика и ракетостроение. 2011. № 2 (63). С. 106–110.
- Леса бассейна Байкала (состояние, использование и охрана) / Под ред. А. А. Онучина. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН. 2008. 245 с.
- Соловьев Ю. А. Системы спутниковой навигации. М.: Эко-тренд, 2000. 268 с.
- Сухих В. И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 392 с.
- Чимитдоржиев Т. Н., Быков М. Е., Кантемиров Ю. И., Холец Ф., Барбуери 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.
- Leckie D. G., Ranson K. J. Forestry applications using imaging radar // Principles and applications of imaging radar: manual of remote sensing. V. 2 / F. M. Henderson and A. J. Lewis (Eds.). Third ed. NY: J. Wiley & Sons Inc, 1998. P. 435–509.
- Le Toan T., Beaudoin A., Riou J., Guyon D. Relating forest biomass to SAR data // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 1992. V. 30. N. 2. P. 403–411.
- Lillesand T. M., Kiefer R. W., Chipman J. W. Remote sensing and image interpretation. 5th ed. NY: J. Wiley & Sons Inc., 2004. 612 p.

McRoberts R. E., Tomppo E. O. Remote sensing support for national forest inventories // *Rem. Sens. Environ.* 2007. V. 110. N. 4. P. 412–419.
TanDEM-X Ground Segment TD-PD-PL-0069
TanDEM Science Plan. 2010. 35 p. <https://tandemx-science.dlr.de/pdfs/>

Watanabe M., Shimada M., Rosenqvist A., Shakil A. R., Ohta K., Tadono T., Matsuoka M., Furuta R. Tight correlations between forest parameters and backscattering coefficient derived by the L-band airborne SAR (PiSAR) // *Proc. IEEE Int. Geosci. Rem. Sens. Symp.* 2004. V. 4. P. 2340–2343.

TO THE QUESTION ON ACCURACY OF FOREST HEIGHTS MEASUREMENTS BY THE TanDEM-X RADAR INTERFEROMETRY DATA

**T. N. Chimitdorzhiev¹, M. E. Bykov¹, Yu. I. Kantemirov²,
I. I. Kirbizhekova¹, B. B. Labarov³, A. K. Baltukhaev¹**

¹ *Institute of Physical Materials Science, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Sakhyanova str., 6, Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670047 Russian Federation*

² *Sovzond Company
Shipilovskaya str., 28a, Milan Business Center, Moscow, 115563 Russian Federation*

³ *Institute of Land Management, Cadasters and Melioration
V. R. Filippov Buryat State Academy of Agriculture
Pushkin str., 8, Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670024 Russian Federation*

E-mail: scidir@ipms.bsnet.ru, evgomod@yahoo.com, y_kantemirov@sovzond.ru,
kirbizhekova@bk.ru, labarov_balchin@mail.ru, arcadiy_b@mail.ru

The paper presents the validation results of the InSAR method for determining the forest canopy height, based on TanDEM-X and ALOS PALSAR data. The research conducted on the territory of the Baikal-Kudara forest area of the Republic of Buryatia (52°10'N, 106°48'E). Forest vegetation is represented mainly by conifers – pine, and spruce, with a small admixture of deciduous trees – aspen, birch, etc. The forest vegetation height was determined by subtracting the digital elevation model (DEM) of the digital terrain model (DTM). DEM is built according to the L-band (wavelength of 23.5 cm) ALOS PALSAR satellite with horizontal co-polarization mode. In the investigation it was assumed that a radar signal of ALOS PALSAR passes all forest thickness and reflected from the underlying surface, made it possible to recover terrain under forest canopy. DTM has been built using the TanDEM-X data (wavelength 3 cm). In this case, it was assumed that the radar echoes scattered from a some virtual phase centers of scattering surface, which characterizes the upper limit of the continuous forest canopy. To check the accuracy of satellite definitions of forest height in study area were made high-precision geodetic measurement of trees heights using electronic total station and the coordinates of geographic control points using differential GPS receivers. The discrepancy between the satellite and ground-based measurements at 11 test sites did not exceed 2 m, which is mainly due to the difference in measurement techniques: height of individual trees by ground methods and continuous forest canopy height using radar interferometry.

Keywords: *satellite radiolocation, differential interferometry, forest height, validation.*

How to cite: *Chimitdorzhiev T. N., Bykov M. E., Kantemirov Yu. I., Kirbizhekova I. I., Labarov B. B., Baltukhaev A. K. To the question on accuracy of forest heights' measurements by the TanDEM-X radar interferometry data // Sibirskij Lesnoj Zhurnal (Siberian Journal of Forest Science). 2016. N. 4: 128–133 (in Russian with English abstract).*