

Т. Н. Чимитдоржиев (ИФМ СО РАН)

В 1994 г. окончил радиофизический факультет Томского государственного университета. В настоящее время — заместитель директора по науке Института физического материаловедения СО РАН (ИФМ СО РАН), доцент по специальности «Аэрокосмические исследования, фотограмметрия». Доктор технических наук.

М. Е. Быков (ИФМ СО РАН)

В 2010 г. окончил Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления (ВСГУТ, Улан-Удэ), инженер по специальности радиоэлектронные системы и телекоммуникации. В настоящее время — младший научный сотрудник в ИФМ СО РАН.

Ю. И. Кантемиров (компания «Совзонд»)

В 2004 г. окончил РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. После окончания университета работал научным сотрудником лаборатории космической информации для целей газовой промышленности в ООО «Газпром ВНИИГАЗ». С 2010 г. — ведущий специалист по тематической обработке радарных данных ДЗЗ компании «Совзонд».

Ф. Холец (F. Holecz; Sarmap SA, Швейцария)

Окончил Remote Sensing Laboratories университета Цюриха (Швейцария) по специальности «география». Работал научным сотрудником в NASA/Jet Propulsion Laboratories. Совладелец, учредитель и генеральный директор компании Sarmap SA (Швейцария), разрабатывающей программное обеспечение SARscape. Ph.D. по специальности «география».

М. Барбиери (M. Barbieri; Sarmap SA, Швейцария)

Окончил университет Рима «La Sapienza» (Италия) по специальности «геология». В течение 8 лет работал в Европейском космическом агентстве. В настоящее время инженер по приложениям дистанционного зондирования Земли компании Sarmap SA (Швейцария).

Технология количественной оценки высоты леса по данным космических радарных тандемных интерферометрических съемок со спутников TerraSAR-X/TanDEM-X

Начиная с декабря 2010 г., тандем из двух немецких радарных спутников TerraSAR-X и TanDEM-X (оператор — Airbus Defence and Space) выполняет интерферометрическую съемку земной поверхности в бистатическом режиме съемки, при котором спутник TerraSAR-X излучает радарный сигнал X-диапазона, который, отразившись от земной поверхности, регистрируется обоими спутни-

ками тандема TerraSAR-X и TanDEM-X. Этот съемочный режим позволяет получать тандемные интерферометрические пары радарных снимков без временного промежутка между съемками, т.е. пары снимков, снятые одновременно (рис. 1). По результатам централизованной интерферометрической обработки этих съемок оператором этих спутников планируется создание беспрецедентной по

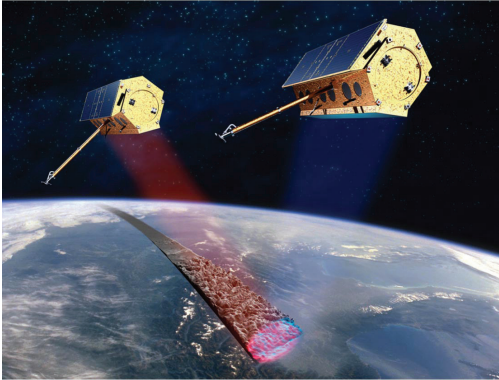


Рис. 1. Схематическое изображение тандемной интерферометрической съемки со спутников TerraSAR-X/TanDEM-X

точности и глобальному охвату цифровой модели местности, которая должна заменить цифровую модель SRTM.

Не меньший интерес, чем глобальная цифровая модель рельефа, представляют сами тандемные снимки в комплексном формате. Последние позволяют получать различные тематические продукты, помимо ЦММ и ЦМР. В частности, разница цифровой модели местности и рельефа на участки леса (при условии отражения радарного луча от вершук деревьев) дает карту высот деревьев. Пилотный проект по отработке этой технологии был выполнен совместно ИФМ СО РАН и компанией «СОВЗОНД» на примере залесенной территории в районе дельты реки Селенги (Бурятия).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И РАЙОН ИНТЕРЕСА

Участки интереса в районе дельты реки Селенги (Бурятия) и контуры используемых тандемных интерферометрических снимков TerraSAR-X/TanDEM-X X-диапазона длин волн (3,1 см) показаны на рис. 2. Для выяснения степени влияния длины волны радара на проникновение сигнала в лес была дополнительно привлечена интерферометрическая пара снимков ALOS PALSAR L-диапазона длин волн

(23,5 см) с временным интервалом 46 дней (на участок зеленого контура, рис. 2).

На первый участок интереса (зеленый контур, рис. 2) было обработано две тандемных интерферометрических пары TerraSAR-X/TanDEM-X от 18.02.2012 г. и 25.05.2013 г., а также одна пара снимков ALOS PALSAR от 20.08.2006 г. и 05.10.2006 г. На второй участок интереса — тандемная пара снимков TerraSAR-X/TanDEM-X от 29.05.2013 г. Характеристики вышеуказанных интерферометрических пар радарных снимков приведены в табл. 1.

Данные тандемных съемок TerraSAR-X/TanDEM-X предоставлены Немецким аэрокосмическим агентством (DLR) в рамках грантов XTI_HYDR0485 и XTI_GEOLO334.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ

Интерферометрическая обработка радарных данных для задач картирования высот деревьев выполнялась в программном обеспечении ENVI/SARscape (Exelis VIS, США-Франция), эксклюзивным дистрибьютором которого на территории России и СНГ является компания «Совзонд».

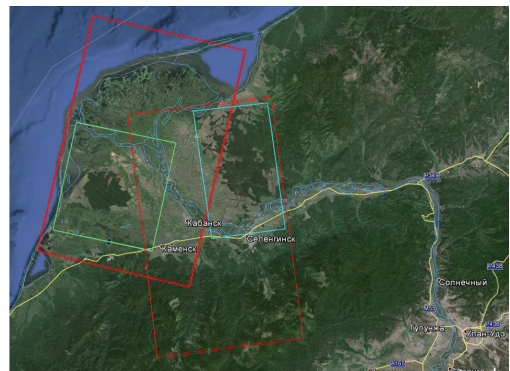


Рис. 2. Контуры тандемных пар снимков TerraSAR-X/TanDEM-X (красные контуры) и двух участков интереса (зеленый и голубой контуры). На участок, отмеченный зеленым контуром, дополнительно анализировалась интерферометрическая пара снимков ALOS PALSAR с временной разницей 46 дней

	TerraSAR-X/ TanDEM-X	TerraSAR-X/ TanDEM-X	TerraSAR-X/ TanDEM-X	ALOS PALSAR
Даты снимков пары	18.02.2012	25.05.2013	29.05.2013	20.08.2006, 05.10.2006
Пространственное разрешение, м	5	5	5	10
Перпендикулярная базовая линия, м	41	17	292	2 700
Перепад высот, соответствующий перепаду фазы в 2π	125	285	26	25
Средняя когерентность леса	> 0,9	> 0,9	> 0,85	> 0,7

Табл. 1. Характеристики интерферометрических пар снимков

Тестовый участок №1 на оптическом и радарном амплитудном снимках показан на рис. 3. Там же показаны контрольные точки с известными значениями высот деревьев, измеренных высотомером.

Первый этап интерферометрической обработки — корегистрация комплексных радарных изображений в уровне обработки SLC был выполнен только для пары снимков ALOS PALSAR, поскольку тандемные пары снимков TerraSAR-X/TanDEM-X поставляются уже ско-

регистрованными. После этого было выполнено комплексное поэлементное перемножение фаз снимков каждой пары с получением на выходе интерферограмм. В общем случае, как известно, комплексные интерферограммы содержат в себе несколько компонентов: фазу рельефа, фаза смещений земной поверхности за время между съемками снимков пары (в случае тандемной интерферометрии — отсутствует, но присутствует в паре снимков ALOS PALSAR, сделанных с раз-

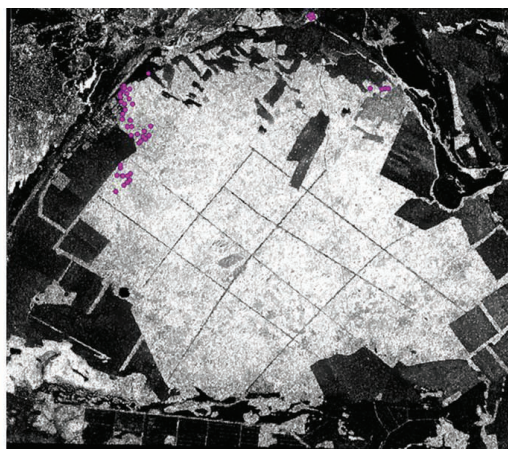


Рис. 3. Отображение участка интереса №1 на оптическом снимке (слева) и на радарном амплитудном снимке TerraSAR-X (справа). Розовые точки — наземные контрольные точки, с известными значениями высот деревьев

ницей в 46 дней), фазу атмосферы (также отсутствует в случае тандемной интерферометрии) и фазовый шум. Фрагменты интерферограмм двух тандемных пар снимков TerraSAR-X/TanDEM-X и одной пары снимков с повторных витков орбиты ALOS PALSAR на участок леса показаны на рис. 4.

На следующем этапе обработки общедоступная цифровая модель местности SRTM

была преобразована в синтезированные интерферограммы (ожидаемые фазы рельефа) для каждой из трех анализируемых интерферометрических пар снимков на тестовый участок 1. Затем из трех интерферограмм были вычтены соответствующие ожидаемые фазы рельефа SRTM. На выходе были получены дифференциальные интерферограммы, фрагменты которых приведены на рис. 5.

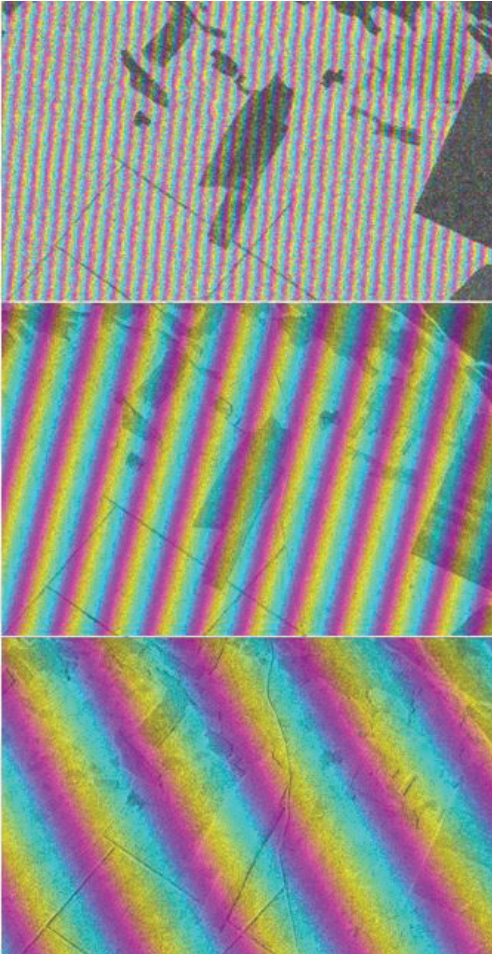


Рис. 4. Фрагменты интерферограмм тандемных пар снимков TerraSAR-X/TanDEM-X от 25.05.2013 г. (снизу) и 18.02.2012 г. (по центру), а также одной пары снимков с повторных витков орбиты ALOS PALSAR (сверху)



Рис. 5. Фрагменты дифференциальных интерферограмм тандемных пар снимков TerraSAR-X/TanDEM-X от 25.05.2013 г. (снизу) и 18.02.2012 г. (по центру), а также одной пары снимков с повторных витков орбиты ALOS PALSAR (сверху)

Далее к дифференциальным интерферограммам была применена процедура фильтрации фазового шума. По фильтрованным интерферограммам были рассчитаны файлы когерентности (корреляции фаз) радарных съемок, определяющие точность замера высоты в каждом конкретном пикселе (чем больше величина когерентности, тем выше точность замера высоты). Средняя когерентность леса составила для тандемных пар более 0,9, а для пары снимков ALOS PALSAR — более 0,7. Такие высокие значения когерентности позволили предположить достаточно высокую точность результирующих матриц высот местности.

В завершении интерферометрической обработки была выполнена развертка фазы для трех фильтрованных дифференциальных интерферограмм. Затем, средствами ENVI/SARscape развернутые фазы были пересчитаны в цифровые геокодированные матрицы абсолютных высот местности, приведенные на рис. 6. Как видно из рис. 6, цифровая модель местности, рассчитанная по интерферометрической паре снимков ALOS PALSAR с повторных витков, характеризуется гораздо большей степенью зашумленности, чем две тандемные пары. Это связано с эффектом временной декорреляции фаз, вызванным изменениями комплексной величины обратного радарного рассеяния. Вариации последней, как правило, связаны с изменениями диэлектрической проницаемости в данном случае лесной среды (например, влажности), произошедшими за период между съемками снимков интерферометрической пары с повторных витков орбиты. Естественно, этот эффект отсутствует при выполнении одновременной съемки интерферометрической пары снимков в тандемном режиме.

Для получения цифровых моделей высот деревьев по всем трем интерферометрическим парам снимков (при условии, что отражение радарного сигнала происходит от вер-

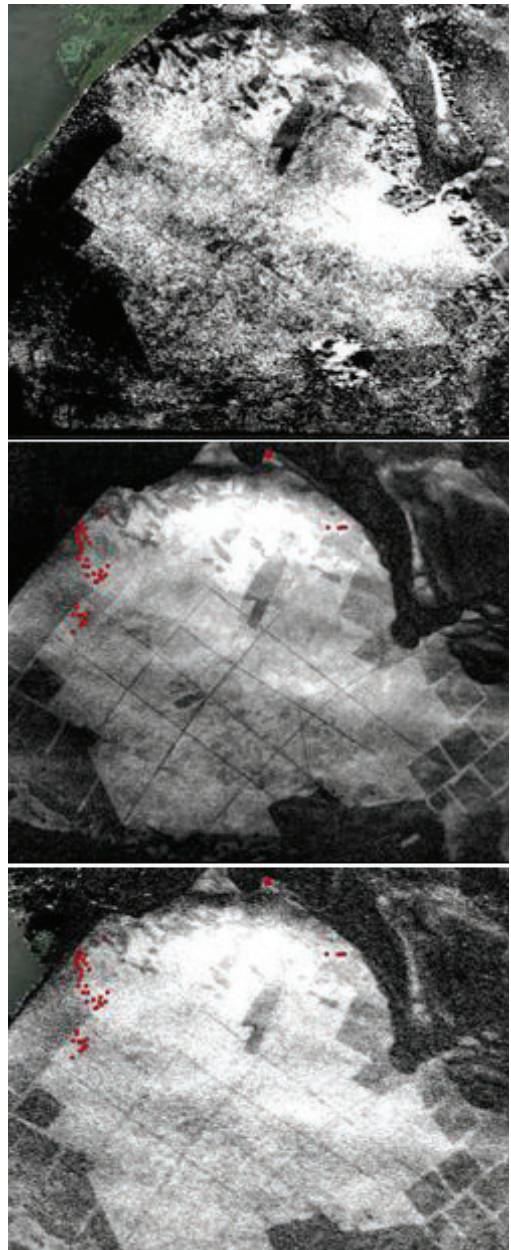


Рис. 6. Фрагменты ЦММ, построенных по тандемным парам снимков TerraSAR-X/TanDEM-X от 25.05.2013 г. (снизу) и 18.02.2012 г. (по центру), а также по паре снимков с повторных витков орбиты ALOS PALSAR (сверху)

хушек деревьев) теоретически необходимо вычистить из цифровых моделей местности (ЦММ) соответствующие им цифровые модели рельефа (ЦМР). ЦМР, в общем случае, может быть получена по топографическим картам, или в результате геодезических или GPS/ГЛОНАСС съемок. В данном случае, ЦМР были получены из радарных ЦММ следующим путем: на радарных ЦММ определялись участки без растительности (т.е. где ЦММ = ЦМР), а на участки с растительностью делалась интерполяция. В условиях сравнительно плоского рельефа в районе устья реки Селенги (локальные высотные вариации до 2–3 м) данный подход позволил получить достаточно точные ЦМР. Пример полученной ЦМР приведен на рис. 7.

В результате вычитания ЦМР из ЦММ по всем трем интерферометрическим парам на тестовый участок №1 были получены цифровые матрицы высот лесного полога с усреднением порядка 5–10 м. Трехмерное отображение матрицы средней высоты деревьев, рассчитанной по тандемной паре снимков TerraSAR-X/

TanDEM-X за 18.02.2012 г., с «наложением» на нее оптического снимка сверхвысокого разрешения приведено на рис. 8.

Далее, было выполнено сравнение средних высот деревьев, полученных по трем различным интерферометрическим парам радарных снимков, с высотами деревьев, измеренными на местности в 48 контрольных точках с помощью лазерного высотомера. Результаты сравнения приведены на рис. 9. Здесь видно, что, все три радарные интерферометрические оценки средней высоты деревьев в относительных величинах хорошо коррелируют между собой, однако отличаются друг от друга на некоторую среднюю абсолютную величину.

Так, самые низкие высоты деревьев получились в результате обработки снимков ALOS PALSAR. Это не удивительно, ведь у этого спутника большая длина волны — 23,5 см, что в 7,5 раз больше, чем у спутников TerraSAR-X и TanDEM-X. Это обуславливает большую степень проникновения радарного сигнала вглубь леса, на некоторых участках

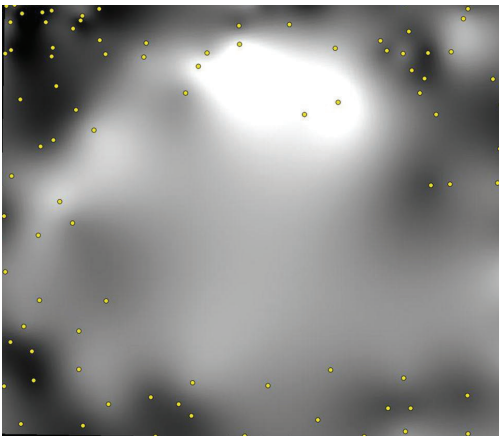


Рис. 7. Фрагмент ЦМР, полученной путем снятия высот с радарной тандемной ЦММ в точках без растительности (желтые точки) и интерполяции этих значений на участки с растительностью



Рис. 8. Псевдоцветовое трехмерное отображение фрагмента цифровой модели средней высоты деревьев, полученной по тандемной паре радарных снимков TerraSAR-X/TanDEM-X от 18.02.2012 г., с наложением на нее оптического снимка

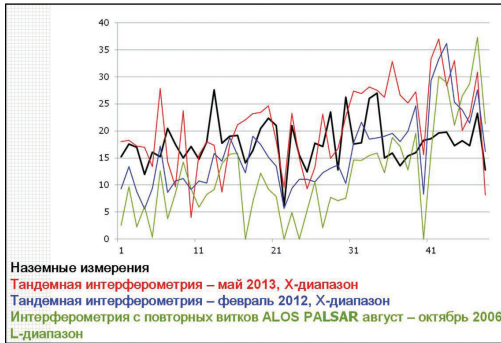


Рис. 9. Результаты сравнения высот деревьев, определенных по трем радарным интерферометрическим парам снимков с различными характеристиками, с высотами в наземных контрольных точках

(где высота деревьев равна нулю) вплоть до земной поверхности.

Высоты, наиболее близкие к замеренным на местности в контрольных точках, дала тандемная пара TerraSAR-X/TanDEM-X за 25.05.2013 г. Это, по мнению авторов, объясняется короткой длиной волны (3,1 см), которая не позволяет сигналу проникать в лес в условиях наличия лиственного покрова у лиственных деревьев (лес на рассматриваемом участке представлен примерно поровну березой и сосной).

Тандемная пара за 18.02.2012 г. дала высоты ниже, чем тандемная пара от 25.05.2013 г., но выше, чем пара снимков ALOS PALSAR с повторных витков. Вероятной причиной данного расхождения может быть тот факт, что в зимний период у лиственных деревьев отсутствуют листья, что позволяет сигналу с длиной волны 3,1 см несколько глубже проникать в лес. Естественно проникновение электромагнитной волны TerraSAR-X/TanDEM-X значительно меньше, чем у сигнала с длиной волны 23,5 см спутника ALOS PALSAR.

Выполненная работа показала принципиальную возможность дистанционных измерений высот деревьев по данным космической

радарной интерферометрии (в первую очередь, тандемной). Пример успешно полученной трехмерной модели высот деревьев приведен на рис. 8. Однако точность замера высот деревьев, даже у летней тандемной пары от 25.05.2013 г., как видно из рис. 9, не слишком высока. Однако, опыт обработки трех интерферометрических пар снимков с различными характеристиками на один и тот же участок позволил сформулировать требования к идеальной интерферометрической паре, которая позволит получить точную (точность замера высот 1–2 м) и высокодетальную (с шагом матрицы 5 м) цифровую модель высот деревьев: это должна быть интерферометрическая пара снимков X-диапазона длин волн, полученная в тандемном режиме съемки (два снимка делаются одновременно, чтобы избежать разности фаз, обусловленной разным состоянием атмосферы при съемках за разные даты) в летний период (когда у лиственных деревьев присутствует лиственный покров) с достаточно большой базовой линией (такой, чтобы средняя высота деревьев была сопоставима с перепадом фазы в 2π на интерферограмме).

Для более достоверной валидации результатов интерферометрических измерений был выбран дополнительный тестовый участок (голубой контур на рис. 2). При этом характеристики интерферометрических данных на данный участок были близки к идеальным требованиям, сформулированным выше.

Тандемная пара снимков TerraSAR-X/TanDEM-X была интерферометрически обработана в программном комплексе ENVI/SARscape аналогично обработке вышеописанных трех интерферометрических пар с получением на выходе цифровой модели высот деревьев (рис. 10). Сравнение высот деревьев, рассчитанных по тандемным радарным данным от 29.05.2013 г., с высотами, замеренными на местности в контрольных точках, приведено на рис. 11.

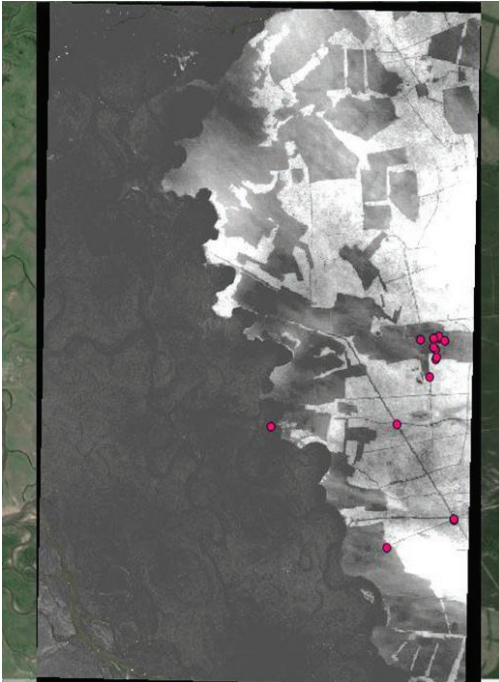


Рис. 10. Цифровая модель высот деревьев полученная по данным тандемной радарной съемки 29.05.2013 г. Розовые точки — наземные контрольные точки с известными высотами деревьев, использованные для валидации результатов обработки тандемных радарных данных

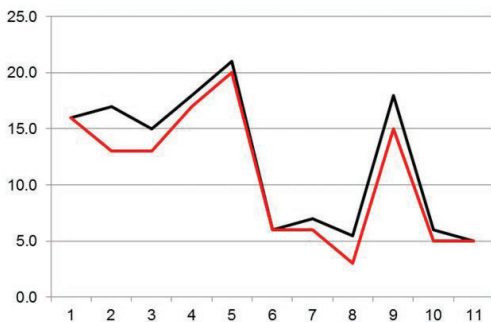


Рис. 11. Результаты сравнения высот деревьев, определенных по тандемной радарной интерферометрической паре снимков TerraSAR-X/TanDEM-X от 29.05.2013 г. с идеальными характеристиками, с высотами в наземных контрольных точка

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- ✧ Впервые в России в рамках совместного пилотного проекта, выполненного совместно ИФМ СО РАН и компанией «Совзонд», была апробирована технология измерения высот деревьев методом тандемной радарной интерферометрии на примере территории дельты реки Селенги (Республика Бурятия).
- ✧ 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 были сформулированы требования к характеристикам интерферометрических пар, пригодных для получения цифровых моделей высот деревьев с наибольшей точностью (в частности, к сезонности, базовым линиям (базисам съемки), к длинам волн, пространственному разрешению, одновременности съемки и т.д.).
- ✧ Точность получения цифровых моделей высот деревьев оценена по данным наземных контрольных точек и при соблюдении требований к характеристикам тандемных пар она составила 1–2 м.
- ✧ Пилотная территория характеризовалась плоским рельефом. При использовании предложенного подхода на практике в условиях более ярко выраженного рельефа — желательны наличие цифровых моделей рельефа (которые будут вычитаться из цифровых моделей местности с получением на выходе моделей высот деревьев), полученных по топокартам 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.