

УДК 629.78+ 630*52: 587/588

СИСТЕМА ОЦЕНКИ ЛЕСНЫХ РЕСУРСОВ ЯПОНСКОГО КЕДРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

© 2014 г. Н. Абэ¹, М. Тхукахару², Ф. Хомма³, Ю. Омомо³, Т. Ишияма³

¹ Научно-исследовательский институт корпорации «Вижн Тех» (Vision Tech Inc.)
Япония, 950-2101, Ниигата, Икараши, 1, Нишики, 6860-39

² Научно-исследовательский институт лесоводства префектуры Ниигата
Япония, 958-0264, Ниигата, Мураками, Уноторо, 2249-5

³ Компания Орис Лимитед (Oris Co. Ltd.)
Япония, 950-0951, Ниигата, Чуоку, Тояно, 310

E-mail: ceber@leaf.ocn.ne.jp, fumio_H@oris.co.jp, oomomo@oris.co.jp, takehiro@oris.co.jp

Поступила в редакцию 30.06.2014 г.

Предпринята попытка оценить запасы древесины посадок кедр японского (*Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L. f.) D. Don), на японском языке – суги) по космическим снимкам, полученным с японского спутника ALOS приборами AVNIR-2 и PRISM, с целью определения возможности последующего использования его плантаций в качестве лесных ресурсов для заготовки древесины. Предварительно выполнена высокоточная геометрическая коррекция изображений посредством обнаружения и увязки наземных опорных точек (Ground Control Points – GCP) с их отметками, определенными на космических снимках посредством расчета коэффициентов полиномов обобщенных аппроксимирующих функций (Rational Polynomial Coefficients – RPC). Для топографической коррекции использовали метод регрессии двойного разделения (Dual Partitioning Regression). Слой «лес» выделяли способом первичной классификации (primary classification), а плантации суги – способом вторичной классификации (secondary classification). Общая точность определений категорий лесного покрова при первичной классификации составила 94, а при вторичной – 89 %. Адекватные и эффективные параметры для оценки запаса стволовой древесины на 1 га отбирали посредством множественного регрессионного анализа связи между фактическими объемами стволов, определенными на земле инструментально, и цифровыми значениями спектральных диапазонов космического снимка (принимались средние значения диапазонов) путем ступенчатого процесса (stepwise procedure). Установлено, что наиболее информативным является ближний инфракрасный (NIR) 4-й спектральный диапазон, для которого рассчитано регрессионное уравнение связи с запасом древесины. Показано, что лесные участки с отрицательными значениями нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) не являются насаждениями суги. Применение периодического спутникового мониторинга позволяет существенно повысить точность данных лесного реестра и определения количественных характеристик лесных ресурсов суги, что способствует более эффективному лесопользованию.

Ключевые слова: кедр японский (*Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L. f.) D. Don), лесные ресурсы, спутниковые снимки ALOS (AVNIR-2, PRISM), геометрическая коррекция, топографическая коррекция, уравнения для определения запасов древесины, уточнение лесного реестра, Япония.

ВВЕДЕНИЕ

Кедр японский ((*Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L. f.) D. Don), на японском языке – суги) – экономически наиболее значимая древесная порода в лесных посадках в Японии. Площадь его плантаций здесь составляет примерно 40 % от общей площади лесопосадок (Forestry Agency, 2012) (рис. 1).

Многие насаждения суги к настоящему времени достигли возраста спелости и должны поступать в рубку, однако низкие цены на древесину не способствуют этому и вынуждают лесовладельцев снижать затраты на лесозаготовки, чтобы обеспечить практическое использование этих лесов.

В Японии для обеспечения управления лесами традиционно используются базовые лесные карты и данные лесного реестра. Однако запас древесины в лесном реестре рассчитывается по уравнениям хода роста древостоев, включенным в базы данных, результирующие показатели которых существенно отличаются от фактических запасов, имеющих в насаждениях. В ряде публикаций отмечена возможность определения фактических запасов насаждений суги по данным космической съемки (Abe, Ishida, 2004; Abe, Iida, 2009).

Прежде для определения запаса древесины в японских лесах использовались спутниковые снимки с аппарата Landsat, а данные с запущенного в 2004 г. японского спутника ALOS (Advanced Land Observing Satellite –



Рис. 1. Спелое, 70-летнее насаждение суги в префектуре Ниигата, Япония.

усовершенствованный спутник наблюдения Земли) до настоящего времени не находили применения при инвентаризации лесов.

Известно, что точность определения древесного запаса по космическим снимкам, полученным разными системами, может значительно различаться. Поэтому в данной работе предпринята попытка оценить возможности определения запасов древесины в насаждениях суги по данным спутниковой съемки с аппарата ALOS. Решались следующие задачи:

а) рассчитать и оценить наиболее адекватные и эффективные уравнения связи цифровых значений яркостей насаждений, определяемых по снимкам, с данными объемов стволовой древесины (запас в м³/га), полученными при полевых исследованиях;

б) изучить факторы, влияющие на точность определения объемов стволовой древесины по рассчитанным уравнениям;

в) повысить точность лесного реестра благодаря использованию данных спутниковой съемки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Район исследований площадью приблизительно 2165 км² расположен в округе Иетсу префектуры Ниигата. В работе использованы космические снимки, полученные со спутника ALOS приборами AVNIR-2 (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer – усовершенствованный радиометр видимого и ближнего инфракрасного диапазонов) и PRISM (Panchromatic Remote Sensing Instrument for Stereo Mapping – панхроматический прибор дистанционного зондирования для стереокартографирования). Данные, полученные прибором PRISM, позволили составить панхроматические изображения улучшенной четкости.

Краткая характеристика снимков, полученных со спутника ALOS, представлена в табл. 1.

Лесная растительность в районе исследований состоит из хвойных и широколиственных древесных пород. Хвойные породы представлены кедром японским (суги) (*Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L. f.) D. Don), со-

Таблица 1. Основные параметры снимков со спутника ALOS

Показатель	AVNIR-2	PRISM
Дата съемки	08.05.2010	08.05.2010
Центр полосы съемки по долготе, град.	138.102	137.2095
Центр полосы съемки по широте, град.	37.2439	37.2095
Размер пикселя (геометрическое разрешение снимка на местности), м	10	2.5
Ширина полосы съемки, км	70	70
Используемые спектральные диапазоны, мкм	1-й канал 0.42~0.5 2-й канал 0.52~0.6 3-й канал 0.61~0.69 4-й канал 0.76~0.89	1-й канал 0.5~0.77

сной густоцветной, или густоцветковой, или красной японской (*Pinus densiflora* Siebold et Zuss., на японском языке – акаматсу), сосной Тунберга, или японской черной, или азиатской, или парчовой (*Pinus thunbergii*, на японском языке – куроматсу), елью обыкновенной, или елью европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) и др.

Широколиственные древесные породы представлены буком японским, или зубчатым, или городчатым, или Зибольда (*Fagus crenata* Blume, на японском языке – буна), дубом монгольским (*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb., на японском языке – мизунара), магнолией обратнойщевидной, или японской крупнолистной, или японской белокорой (*Magnolia obovata* Thunb., на японском языке – хоуноки), каштаном японским конским (*Aesculus turbinata* Blume, на японском языке – точиноки) (MSCIE, 1995).

Для обработки спутниковых снимков использовались программное обеспечение ERDAS, версия 9.1. (ESRI, 2009), базовые топографическая и лесная карты территории исследований в масштабе 1:5 000, переведенные в цифровой ГИС-формат, для топографической коррекции – цифровая карта рельефа местности с размером сетки 50 × 50 м (Geospatial..., 2009). Наземные пробные площади (ПП) размером 40 × 40 м закладывали по общепринятой методике управления лесного хозяйства префектуры Ниигата, на них производили сплошной пересчет с измерением диаметров стволов на высоте груди и высоты всех деревьев.

Классификация изображений. При дешифрировании снимков использован метод контролируемой классификации (supervised classification). Классификация изображений

ведется по пикселям, но во многих случаях мелкие пиксели, принадлежащие к одному классу, классифицируются по-разному и не позволяют достоверно дешифрировать объекты изображения. Для обеспечения более точной классификации изображений лесов на снимках применялась функция исключения и генерализации средствами ERDAS (ESRI, 2009). Использовалось скользящее окно (5 на 5 пикселей). Центральному пикселю присваивалось значение преобладающего в пределах скользящего окна. Таким образом, посредством удаления мелких пикселей достигается более равномерное и реалистичное изображение лесного ландшафта (рис. 2).

Геометрическая коррекция спутниковых снимков с использованием коэффициентов полиномов обобщенных аппроксимирующих функций (RPC). Предварительно выполнялась геометрическая коррекция спутниковых снимков ALOS с расчетом коэффициентов полиномов обобщенных аппроксимирующих функций (Rational Polynomial Coefficients – RPC). Снимки представлялись в виде RPC-файлов. RPC-файлы, в свою очередь, создавались на основе проектной модели с использованием коэффициентов аппроксимирующей полиномиальной кривой. Аппроксимация на основе RPC-данных осуществлялась рациональной функцией стандартизированных значений широты, долготы и высоты местности и отображалась стандартизированными полиномиальными коэффициентами (EORC/RESTEC, 2009).

Обычно точность геометрической коррекции снимков отображается значениями среднеквадратической ошибки (Root Mean Square Error – RMSE), но в случае использования RPC-данных среднеквадратическая ошибка

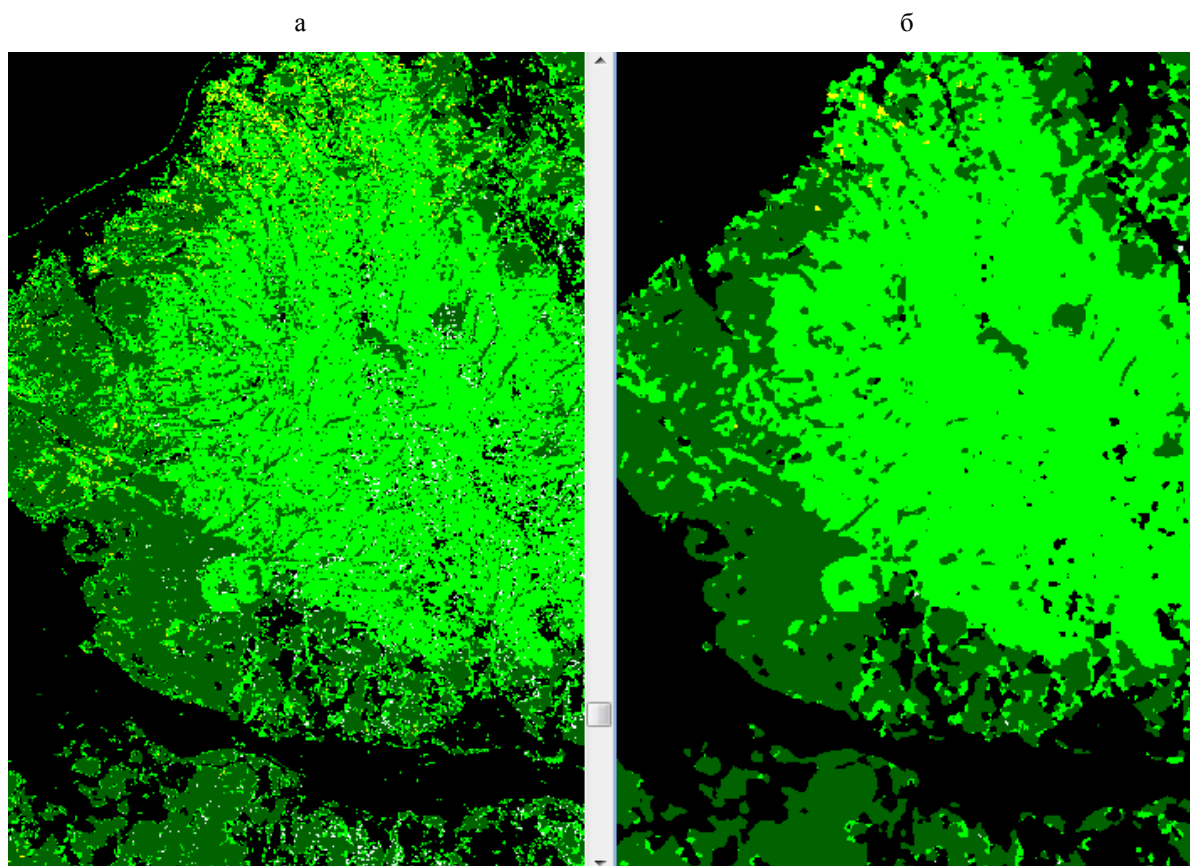


Рис. 2. Исходная (а) и генерализованная (б) классификации изображений лесов.

AVNIR-2

PRISM (улучшенной четкости)

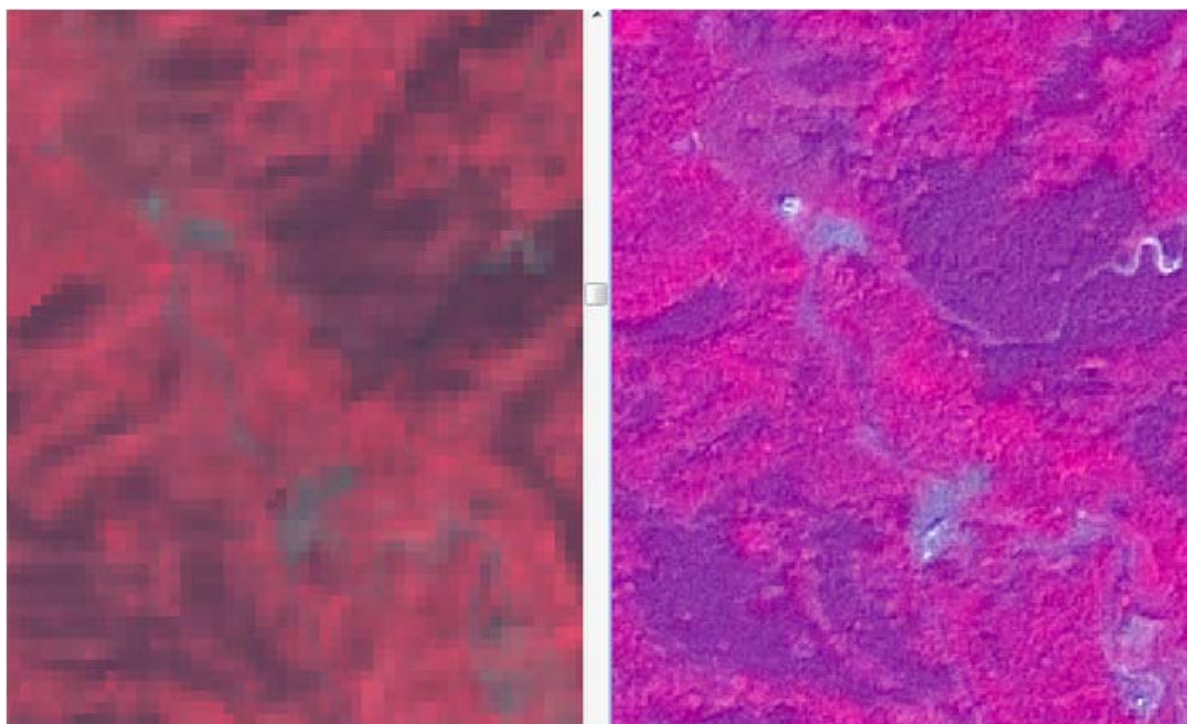


Рис. 3. Спутниковые изображения лесной территории, полученные приборами AVNIR-2 и PRISM (панхроматическое).

не показательна (Lillesand, Kiefer, 2000). По параметрам точности геометрической кор-

рекции желательно достижение значения RMSE на уровне не более 0.5 м. В нашем

случае показатели RMSE с использованием ERDAS (2009) составили для AVNIR-2 13.3 и для PRISM – 17.6 м соответственно. Причина получения столь высоких показателей RMSE не выявлена.

Использование изображений улучшенной четкости. В связи с тем, что пространственное разрешение прибора ALOS AVNIR-2 относительно невысокое и составляет 10×10 м, использование видимого изображения для анализа лесных ландшафтов представляется нецелесообразным. Панхроматические снимки улучшенной четкости, полученные приборами AVNIR-2 и PRISM, при точной геометрической коррекции изображений имеют пространственное разрешение 2.5×2.5 м, что позволяет достоверно дешифрировать по ним различные категории лесного покрова, дороги, насаждения суги и широколиственных пород, а также использовать их для формирования обучающих выборок (рис. 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Геометрическая коррекция изображений. Как уже отмечено, при работе с RPC-данными значения среднеквадратической ошибки (RMSE) не являются показательными при оценке точности геометрической коррекции спутниковых изображений. Это, в частности, связано с тем, что RPC-модель, показывая хорошую корреляцию между контрольными точками на спутниковых снимках и цифровых картах равнинных территорий, не работает в горных условиях. В нашем случае преобладающая часть района исследований является горной местностью, поэтому геометрическая коррекция снимков AVNIR-2 и PRISM осуществлялась с использованием более 60 наземных контрольных пунктов (Ground Control Points – GCP) с целью увязки их местоположений с контрольными точками на спутниковых изображениях. Для решения задачи также использовались цифровые карты, доступные в национальной базе данных геопространственной информации гео-линк (geo-link) (Geospatial Information..., 2009) (рис. 4, 5).

Топографическая коррекция. На космических снимках горных территорий выполнение топографической коррекции является обязательным условием. В статье R. Riva, N. Abe (2006) приводятся данные о степени коррелированности показателей запасов насаждений суги, уточненные различными методами топографической коррекции, и спектральных диапазонов. В частности, использовались следующие методы топографической коррекции: статический эмпирический (Static Empirical), метод коррекции Миннарта (Minnaert Correction Method), двойной корреляции (C-Correlation) и нормализованный топографический метод (Topographic Normalize Method).

Наиболее высокие значения коэффициентов корреляции показателей древесных запасов насаждений суги отмечены при использовании: для 1-го и 2-го спектральных диапазонов – нормализованного топографического метода, для 3-го и 4-го – метода двойной корреляции, для 5-го и 7-го – метода коррекции Миннарта. Так как различия коэффициентов корреляции при использовании этих методов были незначительными, для нашего исследования мы выбрали наиболее распространенный метод коррекции Миннарта.

Однако у данного метода есть существенный недостаток, который заключается в том, что выполнение топографической коррекции невозможно на территориях, куда не попадают прямые солнечные лучи (например, затененные участки в горах), поскольку косинус угла падения лучей имеет отрицательные значения.

Для устранения этого недостатка использован метод регрессии двойного разделения (Sakamoto et al., 2009), т. е. разделения спутникового изображения на две части – со значениями косинуса угла падения солнечных лучей > 0 и < 0 соответственно, что позволило после проведения топографической коррекции данным способом получить существенно более полный цифровой ряд данных.

Установлены коэффициенты регрессии двойного разделения, которые наиболее тесно сопряжены со следующими спектральными диапазонами (СД), мкм: СД 1 – 9.3864; СД 2 – 28.9788; СД 3 – 28.251; СД 4 – 54.1233

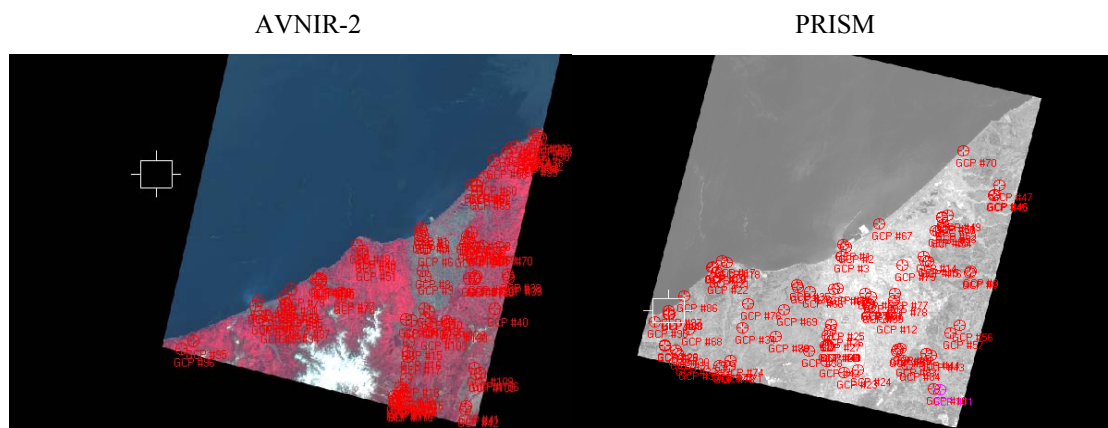


Рис. 4. Распределение наземных контрольных пунктов (GCP) и их отображение на спутниковых снимках AVNIR-2 и PRISM.

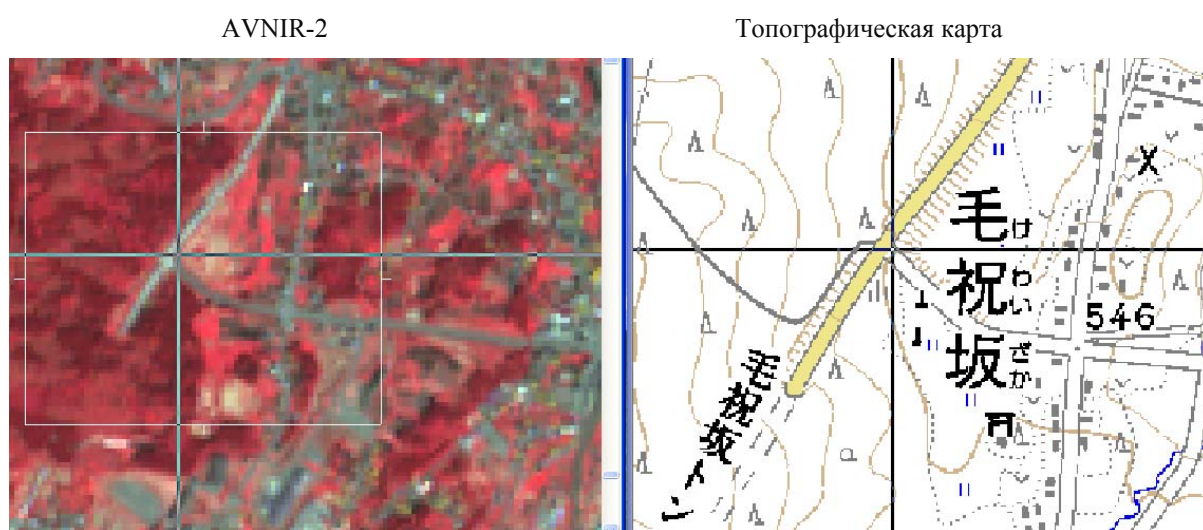


Рис. 5. Отображение и коррекция координатной привязки GCP на снимке AVNIR-2 с использованием цифровых данных геопространственной информации geo-link и топографических карт местности. Знак «+» на рисунке показывает совпадение местоположения и координат GCP на снимке AVNIR-2 и на карте М 1: 5 000.

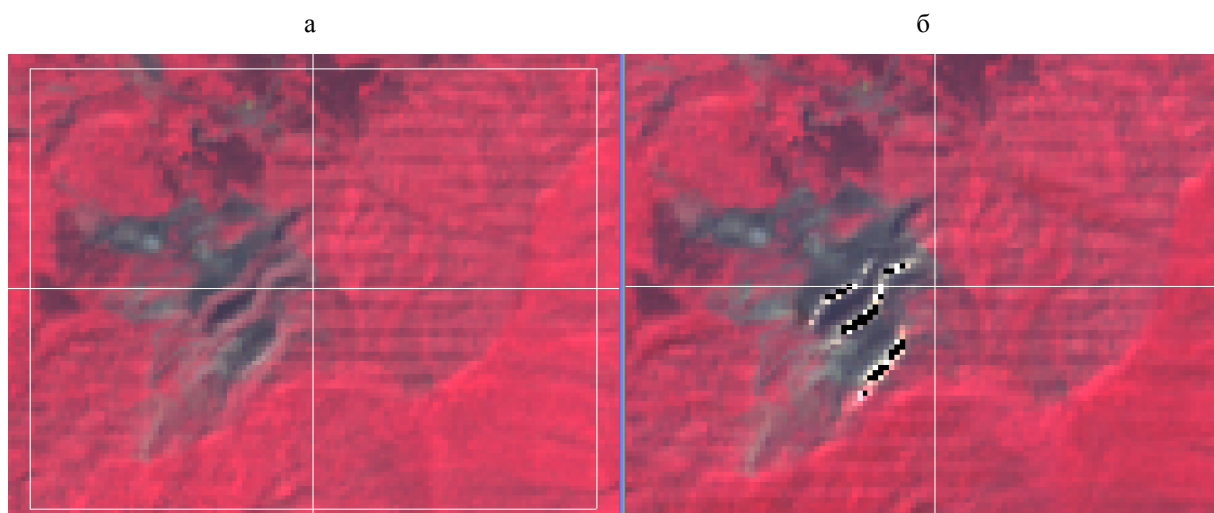


Рис. 6. Топографическая коррекция спутникового снимка ALOS методом регрессии двойного разделения (а) и методом Миннарта (б).

соответственно. Спутниковый снимок после проведения топографической коррекции ме-

тодом регрессии двойного разделения и методом Миннарта показан на рис. 6.

Контролируемая классификация. В контексте решаемой задачи по оценке запасов древесины насаждений суги общий лесной покров выделялся на снимках методом первичной классификации, а насаждения суги из состава лесного покрова выделялись при вторичной классификации непараметрическим методом. При контролируемой классификации используются два подхода – параметрический и непараметрический. В данной

работе классификация осуществлялась методом максимального правдоподобия (Maximum Likelihood Classifier) и методом расстояний Махаланобиса (Mahalanobis Distance Method) в качестве параметрического подхода, а многоуровневого расслоения (Multilevel Slice Classifier) – непараметрического.

Рассчитана общая точность трех методов. В результате при первичной классификации методом максимального правдоподобия до-

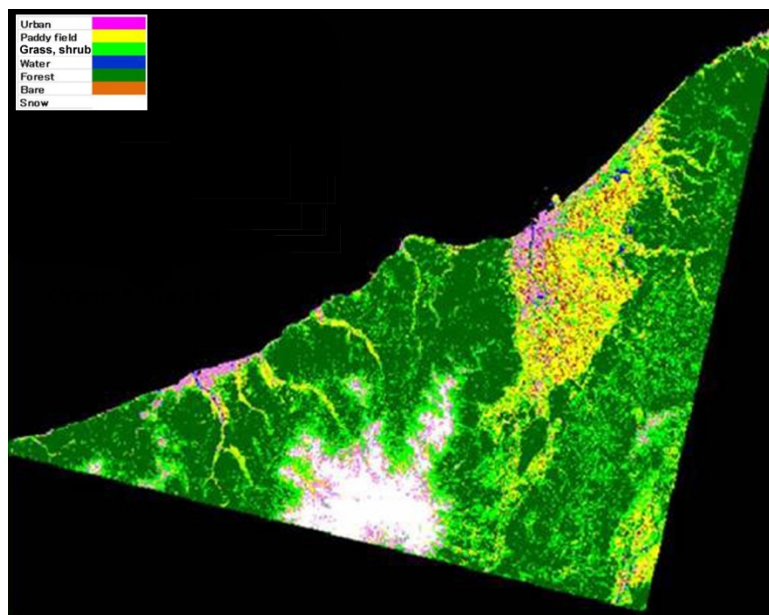


Рис. 7. Разделение изображения со спутника методом первичной классификации по уровням спектральной яркости, соответствующим различным категориям земель: Urban – территории городской застройки; Paddy field – рисовые поля; Grass, shrub – травяно-кустарниковая растительность; Water – водные поверхности; Forest – леса; Bare – пустоши; Snow – снежники на вершинах гор.

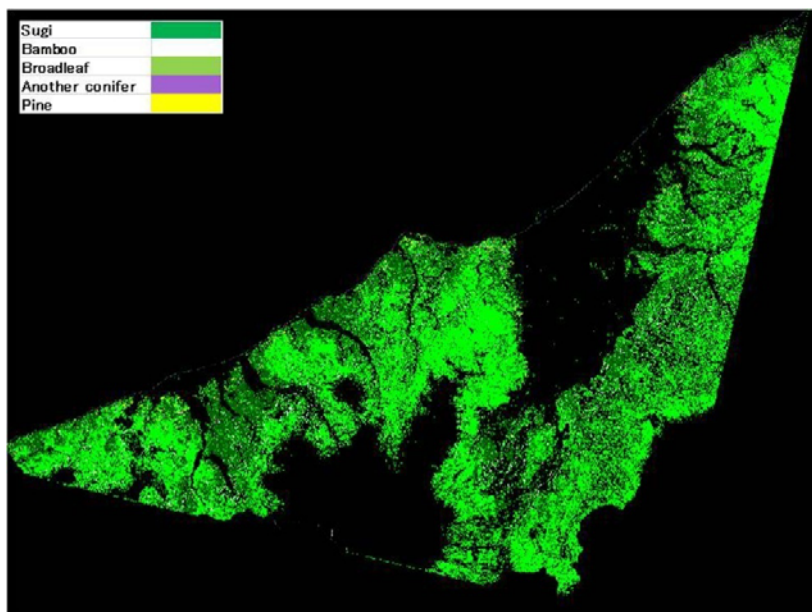


Рис. 8. Разделение изображения, полученного со спутника, методом вторичной классификации по уровням спектральной яркости, соответствующим различным типам насаждений: Sugi – суги; Bamboo – бамбука; Broadleaf – широколиственных пород; Another conifer – других хвойных пород; Pine – сосны.

стигнута максимальная точность классификации пикселей на уровне 94 % и получен коэффициент подобия – каппа-статистика (k) = 0.87 (Lillesand, Kiefer, 2000). При вторичной классификации методом расстояний Махаланобиса показатель точности разделения пикселей общего лесного покрова составил 89 %, а для насаждений суги – 68 % и $k = 0.61$ соответственно. Следовательно, в дальнейшем при первичной классификации использовали метод максимального подобия, а при вторичной – способ расстояний Махаланобиса.

Результаты выполнения первичной и вторичной классификации пикселей лесных изображений на спутниковых снимках ALOS показаны на рис. 7 и 8, а площади различных категорий земель и типов лесной растительности, достоверно разделенных отмеченными выше способами по уровням спектральной яркости, представлены в табл. 2 и 3. Общая лесная площадь района исследований, отображенная в табл. 2 и 3, составила 110 975 га.

Расчет регрессионных уравнений для оценки древесного запаса насаждений суги.

С целью анализа и подбора уравнений регрессии цифровых данных спутниковой съемки и запасов насаждений суги использованы данные измерений на ПП для долгосрочного мониторинга лесов, старовозрастных насаждений, временных ПП, заложенных для уточнения запаса древесины для лесного реестра, а также данные координатных таксационно-дешифровочных ПП, заложенных нами в текущем году для проведения исследования. Всего для расчета уравнений использованы данные измерений на 58 ПП.

Для решения задачи требовалось установить усредненные цифровые показатели спектральной яркости для каждой ПП. Для этого использовался программный комплекс ERDAS (ESRI, 2009), в котором имеется инструмент наращивания области (Region Growing Tool) для определения усредненных значений спектральных сигнатур. При использовании данного инструмента задается фиксированное количество пикселей и порог однородности выделяемой области в виде предельного значения стандартного отклонения. В нашем случае усредненные значе-

Таблица 2. Категории земель, разделенные по спектральной яркости методом первичной классификации

Категория земель	Площадь, га (%)
Леса	110 975 (52.4)
Травяно-кустарниковая растительность	46 909 (22.1)
Рисовые поля	27 932 (13.2)
Снежники на вершинах гор	12 069 (5.7)
Территории городской застройки	11 571 (5.4)
Пустоши	1 274 (0.6)
Водные поверхности	658 (0.6)
Всего	211 388 (100)

Таблица 3. Типы древесных насаждений, разделенные по спектральной яркости методом вторичной классификации

Тип древесных насаждений	Площадь, га (%)
Широколиственные древесные породы	69 366 (62.5)
Суги	35 991 (32.4)
Бамбук (<i>Bambusa metake</i>)	3 539 (3.23)
Другие хвойные породы (<i>Picea abies</i>)	1 581 (1.42)
Сосна (<i>Pinus Thunbergii</i> , <i>P. densiflora</i>)	498 (0.45)
Всего	110 975 (100)

ния спектральной яркости при фиксированном количестве 100 пикселей соответствовали 20 пикселям (рис. 9).

Таким образом, в дальнейшем для каждой ПП, размеры которой составляли 100×100 м $\sim 50 \times 50$ м, с учетом пространственного разрешения спутниковых снимков ALOS (10×10 м) принимали фиксированное количество 20 пикселей.

Для определения эффективных параметров уравнений связи запаса древесины насаждений на ПП с цифровыми значениями спектральных сигнатур ПП на снимках выполнялся многофакторный регрессионный анализ, в который были включены данные наземных измерений на всех принятых в учет ПП, а наиболее информативный спектральный диапазон определялся поэтапным способом (Stepwise Procedure) (SPSS, 2009).

Как следует из табл. 4, наиболее информативным спектральным диапазоном для определения запасов древесины по максимальному значению критерия Фишера ($F = 3.618$) является ближний инфракрасный 4-й диапазон (4-й канал AVNIR-2).

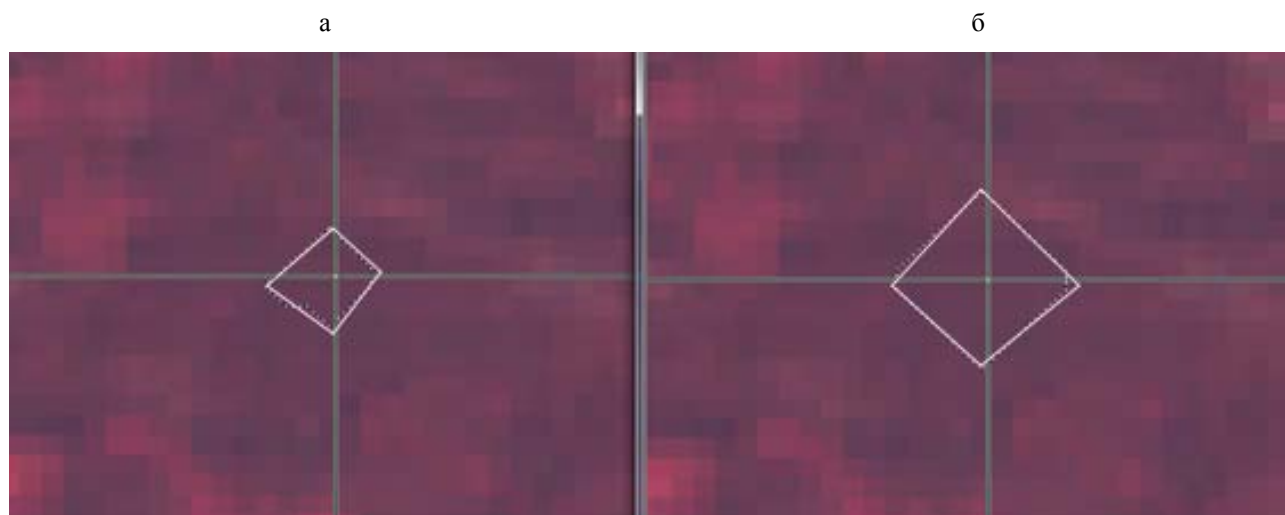


Рис. 9. Усредненные по спектральной яркости области выделения на спутниковом снимке ALOS, совпадающие при фиксированном количестве пикселей: а – 20; б – 100.

Известно, что нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) эффективно используется при анализе растительности. В случае, когда объем древесины насаждений определялся поэтапным способом как функция значений спектральных диапазонов 1–4 и NDVI, значимой переменной при уровне доверительной вероятности 5 % оказались только значения 4-го спектрального диапазона. Наибольшее значение коэффициента корреляции для данной регрессионной зависимости составило $r = 0.304$.

На рис. 10 представлено графическое отображение связи значений объемов древесины и величин 4-го спектрального диапазона, а в

табл. 5 – табулированные значения древесных запасов, рассчитанных по уравнению (1) (см. табл. 4) и разбитых на классы с учетом их площадей.

При сопоставлении объемов древесины, полученных расчетным путем по приведенному выше уравнению (1) (см. табл. 4), с данными, имеющимися в лесном реестре, выявили расхождения, в некоторых случаях – в сторону завышения объемов, а в некоторых – в сторону занижения.

Данное обстоятельство объясняется относительно небольшими размерами ПП при проведении учетов и значительным варьированием объемов стволов в связи с неравно-

Таблица 4. Параметры уравнений для определения объема древесины (V) насаждений суги на ПП при различных спектральных диапазонах (СД), полученные при множественном регрессионном анализе поэтапным способом

Регрессия / уравнения	Сумма квадратов отклонений	Степень свободы	Средняя сумма квадратов отклонений	F	Уровень значимости
$V = 1010.823 - 7.297 \text{ СД } 4 \quad (1)$					
Регрессия	280 668.51	1	280 668.51	3.618	0.062
Остатки	4 421 442.4	57	77 569.16		
Итого	4 702 110.91	58			
$V = 945.494 - 7.521 \text{ СД } 4 + 1.239 \text{ СД } 3 \quad (2)$					
Регрессия	282 280.16	2	141 140.079	1.788	0.177
Остатки	4 419 830.7	56	78 925.549		
Итого	4 702 110.86	58			
$V = 1180.662 - 7.659 \text{ СД } 4 + 2.529 \text{ СД } 3 - 2.702 \text{ СД } 1 \quad (3)$					
Регрессия	286 535.417	3	95 511.806	1.19	0.322
Остатки	4 415 575.46	55	80 283.19		
Итого	4 702 110.88	58			
$V = 1671.485 - 15.130 \text{ СД } 4 - 11.503 \text{ СД } 3 - 24.003 \text{ СД } 1 + 37.970 \text{ СД } 2 \quad (4)$					
Регрессия	326 182.000	4	81 545.5	1.006	0.412
Остатки	4 375 928.88	54	81 035.720		
Итого	4 702 110.88	58			

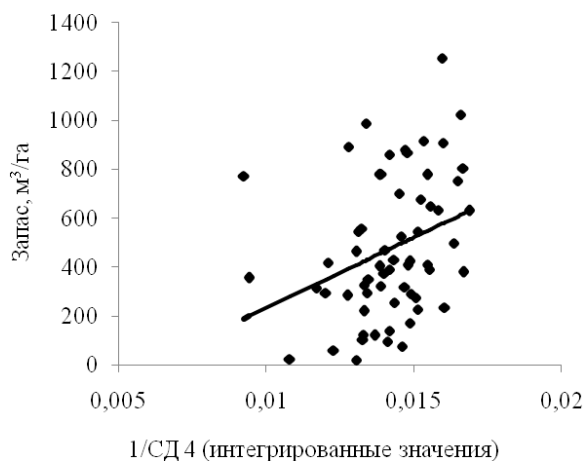


Рис. 10. Связь между объемами древесины и значениями 4-го спектрального диапазона по спутниковым снимкам ALOS AVNIR-2.

мерностью роста разных деревьев в пределах ПП, что никак не отражается в данных лесного реестра, где приводятся усредненные значения для каждого лесного участка (рис. 11).

В предыдущих работах, посвященных исследованию лесных территорий с использованием материалов космической съемки (Abe, Ishida, 2004; Riva, Abe, 2006), мы имели дело с относительно небольшими по площади водосборами. В данной работе мы обсуждаем возможность оценки запасов древесины насаждений суги по полномасштабным спутниковым снимкам ALOS, охватывающим территорию площадью более 2000 км².

Во многих предшествующих исследованиях предпринимались попытки оценить запасы древесины лесных насаждений по космическим снимкам Landsat с использованием 1, 2, 3 и 4-го спектральных диапазонов. Так, в работе С. В. Puhr и Donoghue (2000) отмечена связь между суммой площадей поперечных сечений стволов и цифровыми значениями определенных спектральных диапазонов спутникового аппарата Landsat-TM. Авторами выявлено, что значимая корреляционная связь имеется для 3, 5 и 7-го спектральных диапазонов, а для 4-го такая связь отсутствует.

В публикациях J. Franklin (1986) и J. Ardo (1992) также отмечается слабая связь между древесным запасом и 4-м спектральным диапазоном. С. В. Puhr и Donoghue (2000) объясняют причину низкой корреляции тем, что

Таблица 5. Распределение объемов древесины насаждений суги по классам запасов и их площадям

Объем древесины по классам запасов, м ³ /га	Площадь, га (%)
Менее 200	0.21 (0)
201~300	187.6 (0.5)
301~400	10 149 (28.2)
401~500	8 041 (22.3)
501~600	7 843 (21.8)
601~700	6 598 (18.3)
701~800	2 762 (7.7)
Более 800	410.19 (1.2)
Всего	35 991 (100)

влияние рассеянного света в режиме SWIR (Short Wavelength Infra Red – коротковолновая инфракрасная область спектра) существенно меньше, чем при использовании 4-го спектрального диапазона сенсора TM (Thematic Mapper – тематический картограф).

Однако опубликовано большое количество работ, в которых приводятся данные, свидетельствующие о более высокой корреляционной связи объемов древесины насаждений со значениями 4-го спектрального диапазона TM по сравнению с другими диапазонами.

С. М. Trotter et al. (1997) отмечают, что только 3-й и 4-й спектральные диапазоны пригодны для определения запасов древесины поэтапным способом (Step-Wise Method), но коэффициент корреляции при этом не превышает значения 0.3 ($r \leq 0.3$). В работе F. J. Aherm et al. (1991) приводятся данные о величине коэффициента корреляции $r = 0.8$ для связи значений текущего годичного прироста по объему и запаса живой части елово-пихтовых насаждений с отражательной способностью 4-го спектрального диапазона.

М. А. Spanner et al. (1990) приводят результаты, которые показывают тесную корреляцию запасов насаждений с низкими значениями индекса листовой поверхности (Leaf Area Index – LAI) и величинами 3-го и 5-го спектральных диапазонов, а для насаждений с высокими значениями LAI – тесную связь с 4-м спектральным диапазоном.

Критерии выделения не покрытых лесной растительностью земель с использованием нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI).

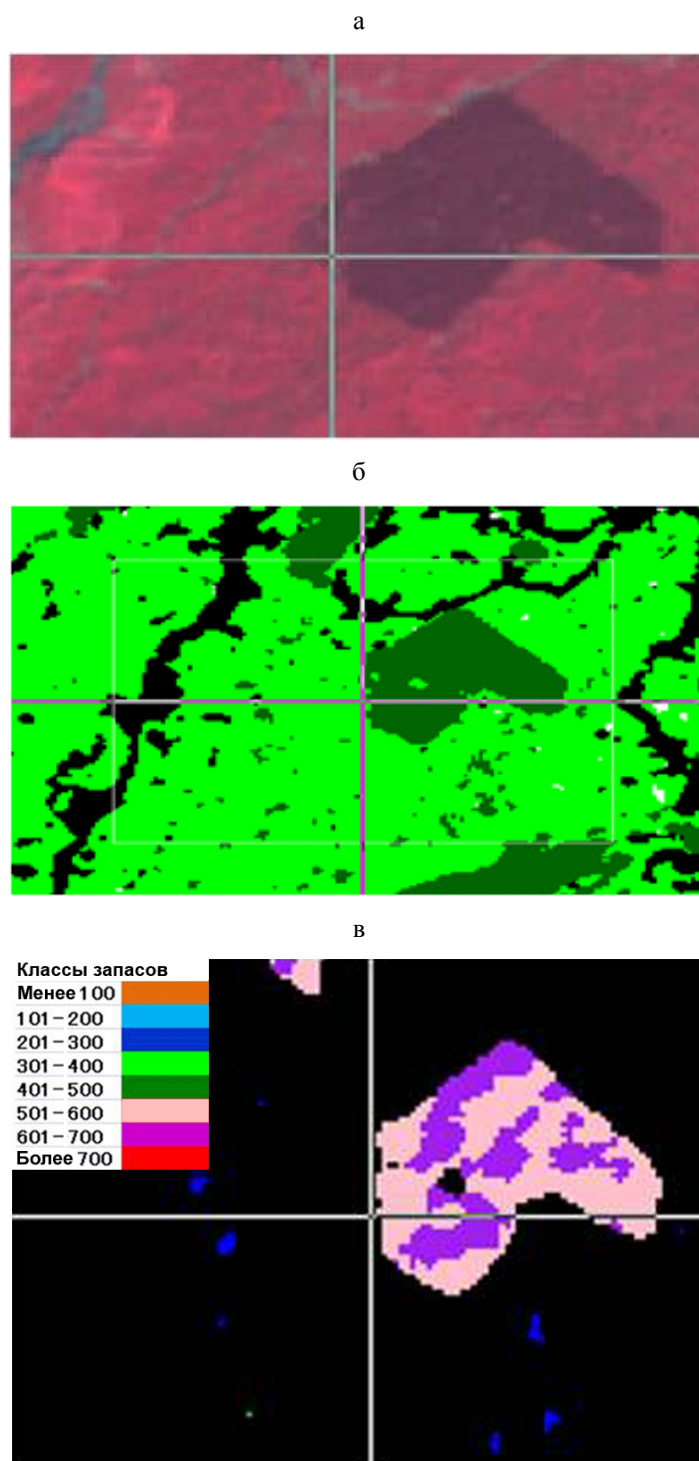


Рис. 11. Варьирование объемов древесины в пределах ПП № 7, рассчитанных по уравнению и отображенных на спутниковом снимке ALOS: а – исходный снимок AVNIR-2; б – снимок, разделенный по спектральной яркости; в – картосхема, составленная на основе спутниковых изображений, ранжированная по классам запасов. Примечание. Усредненное значение объема древесины по лесному реестру для данной ПП составляет 389.5 м³/га.

В табл. 6 представлены площади насаждений суги по данным лесного реестра, соответствующие различным значениям NDVI.

В статье R. Riva, N. Abe (2006) коэффициенты корреляции значений объемов стволов

для 4-го и 5-го спектральных диапазонов оказались очень близкими – 0.735 и 0.766 соответственно.

В правой части рисунка (12, б) красным цветом отображены территории, покрытые

Таблица 6. Площади насаждений суги по данным лесного реестра, классифицированные по показателям NDVI

Показатель NDVI	Площадь насаждений суги по данным лесного реестра, га
Менее 0.053	604.09
– 0.052~0	3198.7
0.0001~0.00856	1096.5
0.00087~0.0444	5287.9
0.0445~0.0856	6176.9
0.0857~0.1344	6611.1
0.1345~0.1941	7663.7
Более 0.1942	2664.6

лесной растительностью, что соответствует положительным значениям NDVI, а слева (12, а) синим цветом показаны участки, не покрытые лесом (лесные дороги, пустоши, прогалины и др.), что соответствует отрицательным значениям NDVI.

При более подробном анализе изображений, полученных прибором AVNIR-2, идентифицированы участки, окрашенные (в ложных цветах) голубым цветом. Наземная валидация показала, что данные участки относятся к не покрытым лесом территориям.

Цифровые значения ALOS для покрытых лесом участков при анализе данных территорий имели следующие показатели: СД 1 (голубой) – 150; СД 2 (зеленый) – 142; СД 3 (красный) – 143; СД 4 (ближний инфракрасный) – 71. Индекс NDVI во всех случаях имел отрицательное значение –0.33 (рис. 13).

J. Ardö (1992) отмечает, что корреляция между значениями объемов стволов и спектральных диапазонов теснее в насаждениях с меньшими запасами по сравнению с более продуктивными.

F. Gemmel (1995) приводит более низкие коэффициенты корреляции для насаждений с запасом более 400 м³/га.

Определенно можно утверждать, что на степень корреляции значений запасов древесины и спектральных диапазонов космических снимков большое влияние оказывают лесорастительные условия. В исследованиях, краткий обзор которых приведен выше, анализировались данные в широком географическом аспекте – от бореальных лесов (Ahern et al., 1991) до лесов южных широт, представленных, в частности, насаждениями со-

сны лучистой (*Pinus radiata* D. Don) (Trotter et al., 1997).

Очевидно, что точность определения запасов древесины насаждений с использованием различных спектральных диапазонов спутниковой съемки будет существенно различаться для разных древесных пород, характеристик подпологовой растительности (подроста и подлеска), типов леса, классов густоты и запаса древостоев. Эти и другие показатели необходимо принимать во внимание при проведении подобных исследований в будущем.

В нашей работе при использовании данных спутниковой съемки ALOS коэффициент корреляции для значений объемов древесины насаждений суги и 4-го спектрального диапазона оказался относительно невелик ($r = 0.3$), но статистически значим. Это обстоятельство объясняется большой площадью района исследований (около 2 165 км²) и учетом насаждений различных классов возраста, густоты и запасов, т. е. существенным варьированием основных таксационных показателей.

Коэффициенты вариации запасов насаждений, определенных в различных спектральных диапазонах спутниковой съемки ALOS, составили, %: для СД 1 – 3.24, СД 2 – 4.61, СД 3 – 6.74 и для СД 4 – 15.83, что оказалось существенно меньше, чем коэффициент вариации при определении интегрированного запаса древесины на 1 га (59.66 %).

Это различие объясняет относительно невысокие значения коэффициента корреляции между объемами стволов и 4-м спектральным диапазоном. Варьирование показателей древесного запаса на 1 га является по своей природе биологическим, а изменение цифровых значений спектральных диапазонов – варьированием физических показателей. Причиной относительно низкой корреляции значений объемов стволов и величин 4-го спектрального диапазона является то, что существенно более высокое биологическое варьирование запасов насаждений не отображается существенно более низким физическим варьированием параметров 4-го спектрального диапазона.

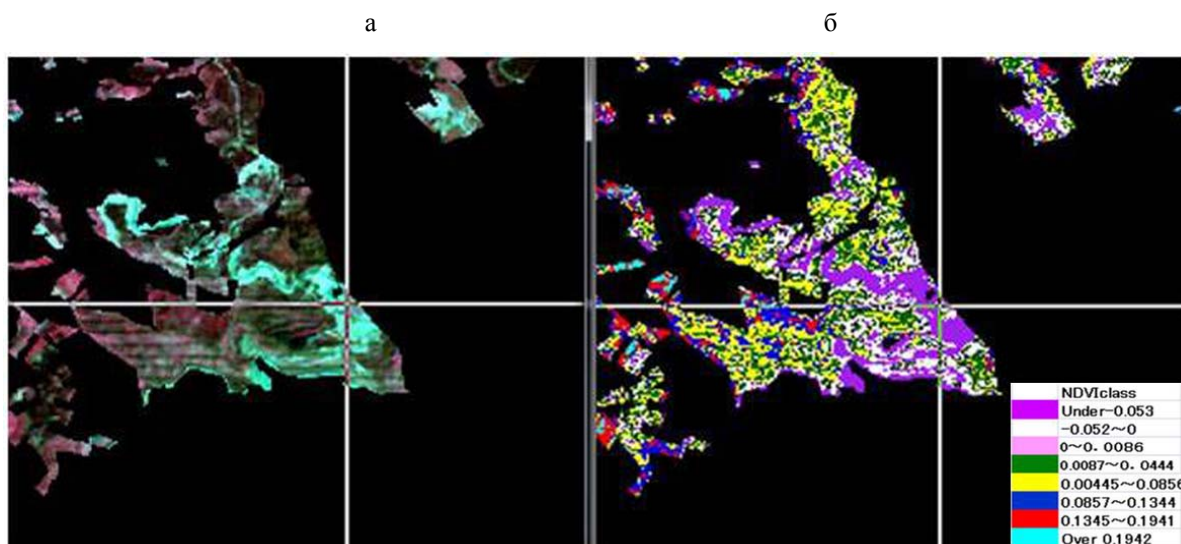


Рис. 12. Классификация лесных насаждений по показателям NDVI: а – насаждения суги по данным лесного реестра, отображенные в ложных цветах; б – те же насаждения, классифицированные по показателям NDVI.

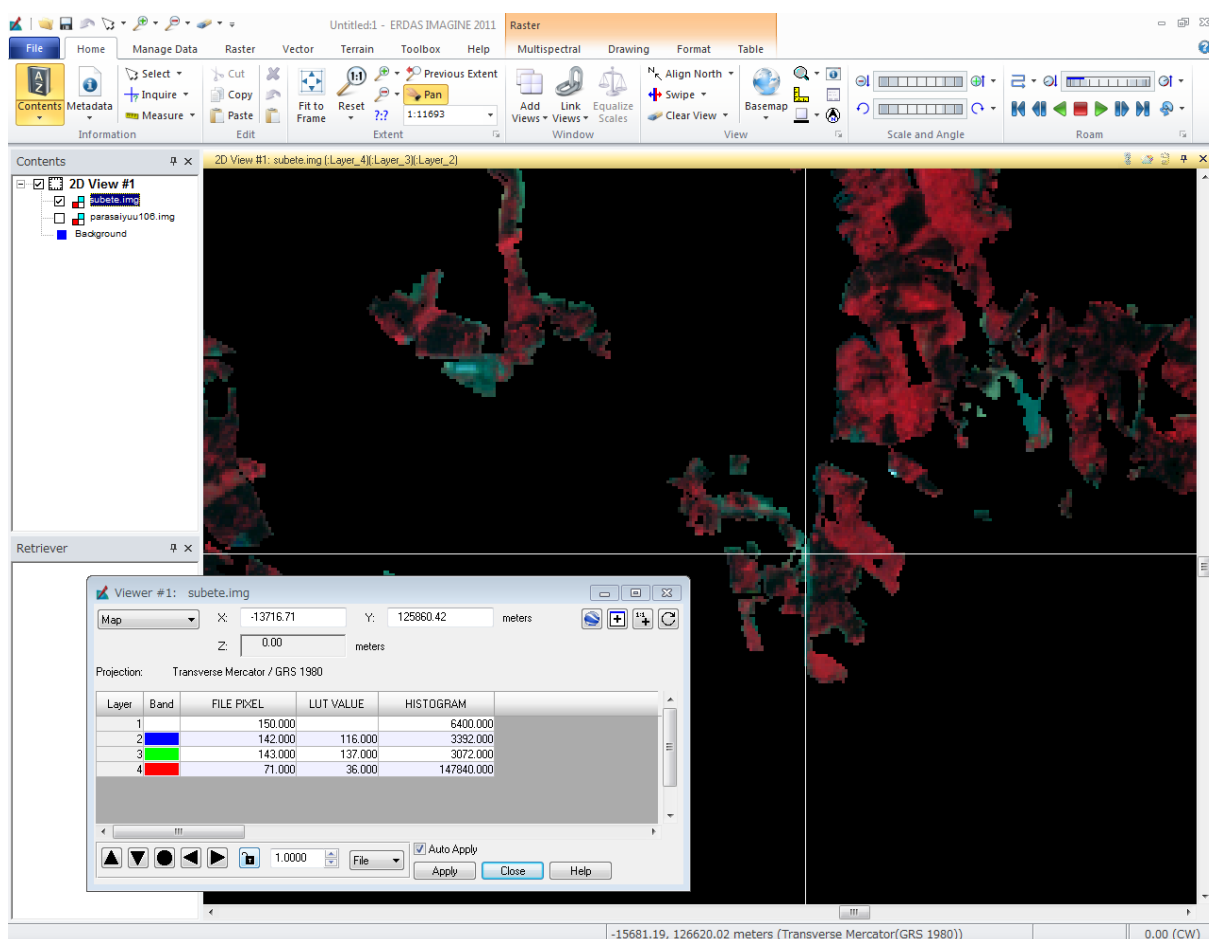


Рис. 13. Сопоставление изображения ALOS по данным приборов AVNIR-2 и улучшенной четкости (Pan-Sharpned) в различных спектральных диапазонах при отрицательном значении NDVI-0.33 для не покрытых лесом земель, отображенных на снимке синим цветом (в ложных цветах).

Природа этого явления и причины более низкого варьирования цифровых значений 4-го спектрального диапазона относительно показателей варьирования запасов требуют до-

полнительного изучения и могут быть прояснены при дальнейших исследованиях. В частности, С. В. Puhr и D. N. M. Donoghue (2000) отмечают, что размах варьирования

цифровых значений спектрального диапазона SWIR существенно больше варьирования таксационных показателей насаждений.

В работах, выполненных ранее (Abe, Ishida, 2004; Abe, Iida, 2009) и посвященных исследованию возможностей определения объемов древесины по различным спектральным диапазонам спутниковой съемки высокого разрешения, показано, что только 3-й спектральный диапазон имеет значимую корреляцию с запасом, что отличается от результатов, полученных при использовании спутниковых снимков ALOS. Пространственное разрешение снимков ALOS составляет 10 м, что имеет промежуточное значение по сравнению со снимками Landsat и снимками высокого разрешения Quick Bird (2.44 м – для многоспектрального режима съемки).

Соотношения между величинами запасов и спектральных диапазонов существенно различаются в зависимости от пространственного разрешения спутниковых снимков, используемых спектральных диапазонов, условий места произрастания, типов леса, породного состава основного яруса насаждений, подпологовой растительности и других факторов. Поэтому необходимо в каждом конкретном случае в обязательном порядке проводить наземную верификацию результатов дешифрирования спутниковой съемки и, по возможности, увеличивать количество наблюдений, повышая их статистическую достоверность, накапливая и формируя базу данных спутниковой съемки лесных территорий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Японии имеется общенациональная база данных лесных ресурсов в виде лесного реестра, однако таксационные характеристики насаждений в том виде, как они представлены в лесном реестре в настоящее время, не позволяют в полной мере и с приемлемой точностью учитывать текущие изменения в лесах и определять запасы древесины, что создает определенные трудности для лесопользования.

Отрицательные индексы NDVI являются достаточно надежными индикаторами для определения территорий, не покрытых лесом. Определено, что отрицательные значения NDVI соответствуют более высоким значениям 3-го спектрального диапазона по сравнению с 4-м. Известно, что 4-й спектральный диапазон имеет более высокие цифровые значения для покрытых лесом земель, а отрицательные значения NDVI соответствуют не покрытым лесом территориям – лесным дорогам, лесным складским и погрузочным площадкам, вырубкам, прогалинам и другим категориям, что, безусловно, должно быть учтено в лесном реестре при его актуализации.

Актуализация лесного реестра на основе периодического использования данных спутниковых съемок является важной задачей для практики лесного хозяйства и управления лесами на местном и общенациональном уровне.

В работе использованы данные, предоставленные управлением лесами префектуры Ниигата. Авторы выражают признательность сотрудникам отдела эрозионного контроля префектуры Ниигата за оказанное содействие в проведении исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Abe N., Iida K. Estimation of carbon stock in even-aged sugi forests using satellite image data // J. Integr. Field Sci. 2009. V. 16. P. 9–13.
- Abe N., Ishida T. Estimation of carbon stock in sugi plantations using high-resolution Quick Bird images // The role of forests for coming generations: philosophy and technology for forest resource management: Proc. int. symp. / Ed. by Kenji Naito. Tokyo, Japan: Jap. Soc. For. Plann. Press Publ., 2004. P. 221–229.
- Ahern F. J., Erdle T., Maclean D. A., Knepeck I. D. A quantitative relationship between forest growth rates and Thematic Mapper reflectance measurements // Int. J. Rem. Sens. 1991. V. 12. P. 387–400.
- Ardö J. Volume quantification of coniferous forest compartments using spectral radiance

- recorded by Landsat Thematic Mapper // *Int. J. Rem. Sens.* 1992. V. 13. P. 1779–1786.
- EORC/RESTEC PRISM/AVNIR-2Level 1B2 RPC Data set // Report about making RPC data and inspection accuracy of RPC. 2009. 1–21 p. http://www.alos-restec.jp/rpc_1b2_result_v1.pdf
- ESRI Japan Inc. // ERDAS IMAGINE Manual 9.1.2009.
- Forestry agency annual report on forest and forestry in Japan // Fiscal Year 2012. <http://www.rinya.maff.go.jp>
- Franklin J.* Thematic Mapper analysis of coniferous forest structure and composition // *Int. J. Rem. Sens.* 1986. V. 7. P. 1287–1301.
- Gemmel F.* Effects of forest cover, terrain, and scale on timber volume estimation with Thematic Mapper data in a Rocky Mountain site // *Rem. Sens. Environ.* 1995. V. 51. P. 291–305.
- Geospatial Information Authority of Japan. Digital Map. 2009.
- Lillesand T. M., Kiefer R. W.* Remote Sensing and Image Interpretation. Fourth Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc. Publ., 2000. 724 p.
- MSCIE (Meeting of Sugi Characteristics Investigation and Examination) // Sugi of Niigata Prefecture. Niigata Forestry Association for Improvement of Niigata Prefecture. 1995. Niigata (in Japanese).
- Puhr C. B., Donoghue D. N. M.* Remote sensing of upland conifer plantations using Landsat TM data: a case study from Galloway, south-west Scotland // *Int. J. Rem. Sens.* 2000. V. 21. P. 633–646.
- Riva R., Abe N.* Topographic correction effect on sugi (*Cryptomeria japonica* Don.) stand volume estimation using multi temporal Landsat TM and ASTER satellite images in mountainous Tsugawa Region, Niigata Prefecture // *J. For. Plan.* 2006. V. 12. P. 49–58.
- Sakamoto K., Nakayama D., Matsuyama H.* New topographic correction method of satellite image in the season of low solar elevation // *J. Jap. Soc. Rem. Sens.* 2009. V. 29. P. 472–484 (in Japanese with summary in English).
- Spanner M. A., Pierce L., Peterson D. L., Running S. W.* Remote sensing of temperate coniferous forest leaf area index. The influence of canopy closure, understory vegetation and background reflectance // *Int. J. Rem. Sens.* 1990. V. 11. P. 95–111.
- SPSS 15.0J for Windows, 2009.
- Trotter C. M., Dymond J. R., Goulding C. J.* Estimation of timber volume in a coniferous plantation forest using Landsat TM // *Int. J. Rem. Sens.* 1997. V. 18. P. 2209–2223.

The System for Assessment of the Japanese Cedar Forest Resources Using Space Image Data

N. Abe¹, M. Thukahara², F. Homma³, Y. Omomo³, T. Ishiyama³

¹ VTI Research Institute

Nishiku, 6860-39, Ikarashi, 1, Niigata, 950-2101 Japan

² Niigata Prefectural Forest Research Institute

2249-5, Unotoro, Murakami, Niigata, 958-0264 Japan

³Oris Co., Ltd., Toyano, 310, Chuoku, Niigata, 950-0951 Japan

E-mail: cebep@leaf.ocn.ne.jp, fumio_H@oris.co.jp, oomomo@oris.co.jp, takehiro@oris.co.jp

The volume of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L. f.) D. Don), «sugi» in Japanese) plantations was estimated by using the Japanese satellite ALOS (AVNIR-2, PRISM) to identify sugi plantations as a forest resource. We performed highly precise geometric corrections by locating ground control points (GCP) on the RPC (Rational Polynomial Coefficients) geometric correction image. DPR (Dual Partitioning Regression) was used for the topographic correction. The forest was extracted by primary classification and sugi stands by secondary classification. The overall accuracy of the primary classification was 94 % and that of the secondary classification was 89 %. Parameters effective for estimating volume per hectare were selected by multiple regression analysis between volume and average digital number of each band (band value) by a stepwise procedure. Regression equation using the reciprocal of band 4 (Near IR) value was significantly effective. We demonstrated that the area with a negative NDVI value is not a sugi forest. By identifying these areas using periodical satellite monitoring, the accuracy of the forest register can be increased and this helps facilitate the practical use of the sugi forest.

Keywords: Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L. f.) D. Don) forest resources, ALOS AVNIR-2, PRISM space image data, geometric correction, topographic correction, volume estimating equation, increase of forest register accuracy, Japan.