

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЛЕСОВ В ЛЕСОУСТРОЙСТВЕ ЕВРОПЕЙСКИХ СТРАН

The purpose of this article is to briefly describe the present directions of techniques and methods for the combination of data sources from the National Forest Inventory of some European countries which actively exploit satellite image data, digital map data, in addition to ground measurements and their model-based updating

В Скандинавских странах, Германии, Австрии, Франции и других учет и статистику о лесных ресурсах получают на основе выборочных методов лесоинвентаризации. В лесоустроительной практике выборочная инвентаризация леса представляет собой оперативную систему сбора и анализа сведений о лесных ресурсах страны, оценке состояния и тенденций в изменении лесных экосистем.

В настоящее время существуют большое количество источников данных дистанционного зондирования Земли. Качество поставляемых ими данных различное и характеризуется в основном числом спектральных каналов и пространственным разрешением. В последние годы появился ряд систем пространственное и спектральное разрешение которых вполне может удовлетворять задачам лесного хозяйства: IKONOS (1–4 м), SPOT (10–20 м), ASTER (15–90 м), Landsat ETM (15–90 м) [1, 2].

Система государственной выборочной лесоинвентаризации в Финляндии направлена на активное использование различных источников информации. Помимо данных таксации древостоев на пробных площадках, используются космические многозональные снимки, система связанных цифровых топографических карт, изготовленных на основе геоданных и АФС, наложенных на единую топооснову масштаба 1:20 000 с размером одного пиксела 2×2 м, цифровые карты категорий земель в растровом формате (размер пиксела 25×25 м) [3, 5–7]. Материалы дистанционного зондирования и данные цифровых карт в системе лесоинвентаризации в Швеции и Финляндии используются для разделения различных категорий земель, а также для получения растровых тематических карт пространственного распределения лесопокрытой площади (по преобладающим породам, классам условий произрастания, классам возраста, среднему диаметру, среднему запасу преобладающих пород, величине прироста по запасу и пр.) [3, 4, 7].

При обработке данных, получаемых в процессе проведения выборочной лесоинвентаризации, первоначально формируются следующие четыре (или пять) файла входных данных: 1) база данных по круговым пробным площадкам (КПП), каждой площадке соответствует определенный пиксел размером 25×25 м космического снимка с искусственного спутника земли, центр которого географически близок к центру пробной площадки (ground truth data, ASCII-FILE); 2) многозональный космический снимок, полученный с Landsat 7 ETM+; 3) цифровая карта категорий земель в растровом формате (размер пиксела 25×25 м); 4) матрица высот (DEM) (цифровая модель рельефа) с шагом 25×25 м (разрешение 10 см) в растровом формате, которая также учитывает угол солнечной иллюминации для рельефной местности; 5) если необходимо, файл содержащий маску облачности [5, 7].

В основном используются космические многозональные снимки (multispectral images), которые были получены с американских спутников серии Landsat Thematic Mapper (преимущественно снимки с Landsat 7 ETM+), а также с индийских спутников серии Indian Remote Sensing (IRS). Главным образом используются снимки, полученные с Landsat 7 ETM+ (спектральные зоны 1, 2, 3, 4, 5, 7 (0,45–0,52, 0,52–0,60, 0,63–0,69, 0,76–0,90, 1,55–1,75, 2,09–2,35 мкм, пространственное разрешение 30 м). Установленная на спутнике Landsat 7 ETM+ съемочная аппаратура – сканирующий радиометр Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), который является усовершенствованным вариантом сканеров серии

TM (Thematic Mapper), обеспечивает съемку земной поверхности в шести каналах с разрешением 30 м, в одном ИК канале – с разрешением 60 м, и одновременную панхроматическую съемку с разрешением 15 м при ширине полосы обзора для всех каналов около 185 км. Отличительной особенностью ETM+ является наличие панхроматического канала высокого (15 м) разрешения (0,52–0,90 мкм), наличие теплового ИК-канала, а также 5-процентная погрешность абсолютной калибровки.

Главным образом используются снимки, полученные с Landsat 7 TM, один снимок Landsat покрывает большую территорию, нежели Spot, что важно в условиях повышенной облачности [5–7]. При неудовлетворительном качестве снимков Landsat TM (наличие облаков более 30% области снимка) используются космические многозональные снимки, с разрешением 20 метров в точке, которые были получены при помощи датчика LISS-3, установленного на борту индийских спутников серии Indian Remote Sensing (IRS).

В настоящее время заказ космических снимков Landsat для целей выборочной лесоинвентаризации в Финляндии производится не из глобального архива геологической службы США, а через финскую компанию Novosat, которая покупает снимки для потребителей внутри страны по специальным заказам со шведской станции приема космической информации Kiruna. Помимо данной станции, в Европе принимают космические снимки с искусственных спутников серии Landsat немецкая станция Neustrelitz, испанская Maspalomas и станция Matera, расположенная в Италии. В Швеции заказ космических снимков Landsat производится непосредственно с космической станции Kiruna, расположенной в северной части страны.

Выбор снимков, их подбор для целей текущей выборочной лесоинвентаризации осуществляется на основе интерактивных интернет-каталогов на официальных веб-сайтах. Чтобы найти изображение интересующей территории на всех сайтах, которые предоставляют доступ к «catalogue search and visualisation of digital quicklooks» (в режиме предварительного просмотра), реализован схожий принцип – необходимо указать либо географические координаты (широта, долгота), либо «координаты» центров получаемых снимков, т. е. код WRS1 (2) – path/row, центры снимков Landsat для территории Финляндии имеют WRS2 path 195–185, WRS2 row 11–18; для территории Беларуси WRS2 path 187–180, WRS2 row 21–24, либо на основе базовой карты указать интересующую территорию, на которую осуществляется поиск снимков, условие наличия облаков (не больше какого-то значения) и интервал времени съемки. После этого предоставляется список сцен, удовлетворяющих критериям запроса, и далее можно уточнить их свойства, точное географическое положение, посмотреть картинку с уменьшенным изображением, а также весь снимок.

Первичной вычислительной единицей при обработке космических снимков является мельчайший элемент снимка – пиксел. Размер пиксела в 25 метров применяется при обработке космических снимков, полученных с искусственных спутников земли серии Landsat TM. При обработке материалов дистанционного зондирования удобнее принимать в расчет средний запас в расчете на единицу площади, нежели объем учтенных деревьев в отдельности [4, 7]. Величина прироста для учтенных деревьев на уровне каждой пробной площадки рассчитывается на основе регрессионных уравнений, так как измерение кернов древесины для установления величины прироста у учетных деревьев при проведении выборочной лесоинвентаризации не производится.

По времени их получения используются снимки, полученные в течение полевого сезона проведения наземных лесоинвентаризационных работ. Снимки, полученные в июне, наиболее оптимальны для сайт-классификации, а также для распознавания древесных пород. Для целей последующей обработки важно, что бы снимок покрывал площадь лесного массива, на которой было заложено не менее 2000 пробных площадок [7].

С помощью системы Erdas Imagine 8.4 осуществляется весь комплекс работ по геометрической коррекции и трансформации космических снимков в географическую проек-

цию, т. е. по приведению координат снимка (lin, col) к системе прямоугольных координат (x, y). Система Erdas Imagine используется для решения задач геометрической коррекции и преобразования в заданную проекцию растровых данных дистанционного зондирования, поддерживает проекции Меркатора, Ламберта, Полярную стереографическую, Альберса, Гаусса – Крюгера, UTM, а также содержит средства для выполнения трансформации и произвольную проекцию, подготовленную пользователем.

Данная система содержит не только средства трансформации, но и модуль просмотра результатов, а также модуль подготовки опорных точек (GCP Tool) для выполнения последовательных коррекций растра в интерактивном режиме и сохранения координат полученных опорных точек (координаты контрольных точек записываются в отдельный файл с расширением .gcs).

В качестве опорных (контрольных) точек выбираются хорошо заметные ориентиры на космическом снимке, на базовой растровой цифровой топографической карте, которая содержит пункты триангуляции, элементы гидрографии, населенные пункты, автомобильные и железные дороги, административные границы (в целом при обработке используется система связанных цифровых карт, изготовленных на основе геоданных и АФС, наложенных на единую топооснову масштаба 1:20 000, размер одного пиксела 2×2 м), на цифровой карте категорий земель в растровом формате (в процессе корректировки используется только для ориентирования, размер пиксела 25×25 м) [6, 7].

Результаты трансформации сохраняются в растровом формате с сохранением географической привязки, т. е. с передачей координатной информации, к примеру, в формате наиболее распространенных ГИС (ArcInfo, ArcView, MapInfo), предназначенном для дальнейшей обработки и дешифрирования изображений либо без координатной информации, к примеру, растровые изображения в формате, воспринимаемом стандартными графическими программами для последующего вывода на твердые копии в неискаженном виде (например, в форматах 256 Color Bitmap BMP, True Color Bitmap BMP).

Для «нескорректированной» части космического снимка, т. е. для координат снимка (lin, col), применяется полином второго порядка как функция прямоугольных координат базовой цифровой топографической карты в растровом изображении [5, 7].

В течение проведения выборочной лесоинвентаризации измеряют и оценивают более 100 различных характеристик. При оценке различных параметров, получаемых при проведении девятой выборочной лесоинвентаризации, в Финляндии (the multi-source national forest inventory) в процессе обработки материалов космической съемки применяется метод «knn-оценки» (a k-nearest neighbour classification method), который в несколько измененном виде нашел широкое применение и при обработке данных дистанционного зондирования в шведской системе лесоинвентаризации.

Уникальное свойство данного метода заключается в том, что все параметры для уровня одного пиксела размером 25×25 м могут быть оценены одновременно [4, 6, 7].

При обработке снимка используется так называемая мультиспектральная классификация изображений с обучением [1, 7]. Процедура классификации изображений заключается в поиске аналогичных по спектральным характеристикам пикселей изображения и группировке их в классы, основанные на значениях спектральных яркостей. Классификация с обучением основана на предварительном внесении информации об эталонах, отображенных на снимке [1]. Эталонами являются пикселы, центры которых географически близки к пробным площадкам выборочной лесоинвентаризации (ground truth data). Группа пикселей, представляющих эталон, указывается в программе, производится оценка их качества по статистическим показателям, осуществляется классификация всего изображения. Создав систему эталонов, учитывающую, например, типы лесорастительных условий, возможна автоматическая генерация лесных тематических электронных карт [1, 7].

При обработке космического снимка, т. е. при оценке каждого пиксела в исследуемой

области программа «a k-nearest neighbour classification method» (Финляндия), написанная на языке Fortran сотрудниками Metla, обращается к файлу ASCII-FILE и ищет к «ближайшим» пикселям, имеющих наиболее близкую характеристику (спектральную интенсивность (spectral value) для всех спектральных зон съемки, которая в числовом выражении может быть представлена 0–255)) и которым соответствует ground truth data, т. е. пиксели, центры которых географически близки к пробным площадкам выборочной лесоинвентаризации (проецируются на пробную площадку). Таксационная характеристика (the entire ground data vectors), соответствующая к «ближайшим» пикселям, будет добавлена к свойствам данного отдельно взятого пикселя [7].

Метод «древовидной кластеризации» (объединения) используется при формировании «схожих пикселей» и оценке расстояния между ними. Наиболее прямой путь вычисления расстояний между пикселями при kpp-оценке в многомерном пространстве состоит в вычислении евклидовых расстояний. Евклидово расстояние между оцениваемым пикселем и k-ближайшими по своей характеристике пикселями в данном случае не является реальным геометрическим расстоянием между объектами (пикселями) в пространстве. Алгоритм объединения допускает, что «предоставленные» для этого расстояния не буквально настоящие, а являются некоторыми другими производными мерами расстояния. Максимальное расстояние от 40 до 100 км в географическом пространстве в горизонтальном направлении принимается во избежание использования пробных площадок из разных лесорастительных районов, а также в вертикальном направлении на основе высотной матрицы (DEM) максимальная высота над уровнем моря принимается от 50 до 100 м [5, 7].

Площадь водных территорий и нелесных земель оценивается для каждой вычислительной единицы на основе данных цифровых карт, покупаемых у государственной службы землеустройства (Швеция, Финляндия). Для этого количество пикселей, принадлежащих определенной категории земель, умножается на площадь пикселя ( $625 \text{ м}^2$ ). Последовательный расчет и анализ всех таксационных характеристик основывается на данных таксации леса на КПП и «веса» каждой пробной площадки для каждой страты. В результате совместной обработки формируются растровые тематические лесные карты (по породам, классам возраста и др.).

В соответствии с эмпирическими расчетами стандартная ошибка оценки среднего запаса уменьшается с 50–60% для уровня одного пикселя до 20% для уровня площади в 100 га и 5% на уровне площади одного муниципалитета [7]. Фактически для площади более 100 тыс. га оценка основных параметров (площадь, запас и т. п.) дается с достаточной степенью надежности на основе только данных таксации на КПП.

В настоящее время разрабатывается статистический метод оценки надежности получаемых результатов в процессе обработки материалов в системе «многоисточниковой выборочной лесоинвентаризации» (multi-source national forest inventory) [6]. Разработан уникальный метод актуализации планово-картографических материалов на основе материалов дистанционного зондирования и данных цифровых карт [5].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лопатин Е. В. К вопросу об автоматизированной актуализации информации о лесном фонде по космическим снимкам // Труды Сыктывкарского лесного института. – Сыктывкар: СЛИ, 2002. – Т. 3. – С. 414–418.
2. Baath, H., Gallerspang, A., Hallsby, G., Lundstrom, A., Lofgren, P., Nilsson, M., Stahl, G. Remote sensing, field survey, and long-term forecasting: an efficient combination for local assessments of forest fuels. *Biomass & Bioenergy* 22, 2002. – P. 145–157.

3. Halme, M., Tomppo, E. Improving the accuracy of multi-source forest inventory estimates to reducing plot location error - a multi-criteria approach. *Remote Sensing of Environment* 78(3), 2001. - P. 321-327.
4. Holmstrom, H., Kallur, H., Stahl, G. Cost-plus-loss analyses of forest inventory strategies based on kNN-assigned reference sample plot data. *Silva Fennica* 37, 2003. - P. 381-398.
5. Katila, M., Tomppo, E. Selecting Estimation Parameters for the Finnish Multi-Source National Forest Inventory. *Remote Sensing of Environment* 76(1), 2001. - P. 16-32.
6. Katila, M., Heikkinen, J., Tomppo, E. Calibration of small-area estimates for map errors in multisource forest inventory. *Canadian Journal of Forest Research* 30, 2000. - P. 1329-1339.
7. Tomppo, E. Application of remote sensing in Finnish National Forest Inventory. In: Kennedy, P.J. Application of Remote Sensing in European Forest Monitoring. International Workshop, Vienna, Austria, 14th - 16th October 1996. Proceedings. European Commission, 1997. - P. 375-388.