

М. А. Ильчук, нач. отдела приема и обработки космической информации;  
С. С. Цай, инженер отдела приема и обработки космической информации (РУП «Белгослес»);  
А. А. Пушкин, ст. преподаватель; К. Н. Бусел, аспирант

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ GPS-ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ КООРДИНАТНОЙ ПРИВЯЗКИ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

In the article the questions of using GPS-survey methods for geodesic referencing of remote sensing data are considered. The detailed description is given of developed technology. The developed technology allows to create a geodesic net of the coordinate points for fulfilling geodesic referencing and geometric transformation of the remote sensing data. The accuracy assessment is accomplished of autonomous GPS positioning by receivers of navigation and geodetic classes. The results showed that positioning data of autonomous surveying by geodetic GPS receiver have sufficient accuracy for aim of construction the digital vector forest map. Scopes of technology for the decision of these problems are specified.

**Введение.** Заинтересованность в использовании материалов дистанционного зондирования, получаемых с космических летательных аппаратов, среди отраслей народного хозяйства растет с каждым годом. В особенности, это касается лесного и сельского хозяйства, МЧС, организаций, занимающихся разведкой и добычей полезных ископаемых, научно-исследовательских учреждений, осуществляющих экологический мониторинг состояний природных объектов (растительных, водных), ряда других организациях.

Использование материалов дистанционного зондирования в лесном хозяйстве, в особенности для целей картографирования поврежденных лесных участков, немыслимо без геометрической коррекции получаемых материалов и выполнения их геодезической привязки. Одним из способов решения этих достаточно сложных задач является использование геодезической сети пунктов, чьи координаты известны с достаточной точностью. Государственные геодезические сети 1–3 классов точности характеризуются весьма разреженным расположением пунктов, расстояния между которыми могут достигать до 10 км и более, особенно для обширных лесных районов и сельской местности, что является недостаточным для решения указанных задач. Поэтому возникает необходимость в сгущении существующих государственных сетей на территории лесохозяйственных предприятий. Использование GPS-измерений в процессе создания сети координатных точек позволит существенно снизить затраты по сравнению с традиционными способами закладки сети (использование теодолитной и тахеометрической съемок).

Целью данного исследования являлась разработка технологии создания координатной сети опорных пунктов на территориях лесохозяйственных предприятий (лесхозов) с использованием методов GPS-измерений, которая бы могла использоваться для целей геодезической привязки и геометрического трансформирования материалов дистанционного зондирования, получаемых с искусственных спутников Земли.

Успешное решение этой задачи расширит возможность использования данных дистанционного зондирования (космической съемки высокого разрешения, материалов АФС), будет способствовать совершенствованию методов их обработки для разнообразных лесохозяйственных задач, позволит формировать на основе материалов дистанционного зондирования (ДЗ) точные цифровые лесохозяйственные картографические материалы.

**Основная часть.** В настоящее время для целей позиционирования (определения координат) в мире используются 2 глобальные навигационные спутниковые системы: российская система ГЛОНАСС и американская NAVSTAR GPS. Анализ ряда литературных источников позволяет сделать вывод, что лесной отрасли Беларуси следует ориентироваться на использование американской NAVSTAR GPS, т. к. ГЛОНАСС по оценкам многих российских экспертов еще около 5 лет будет находиться в стадии комплектации. Для целей позиционирования пунктов сети нами была выбрана спутниковая система позиционирования NAVSTAR GPS.

Сеть опорных твердоопознанных пунктов представляет собой совокупность хорошо просматриваемых на материалах аэрофотосъемки (АФС) и космической съемки (КС) объектов местности, чье положение с течением времени не изменится достаточно длительный период времени. Координаты этих пунктов должны быть определены с требуемой точностью.

Для нахождения точности определения координат можно ориентироваться на точность накола на аналоговые АФС опорных точек, которая составляет примерно 0,3 мм, что в масштабе 1:15 000 – 4,5 м. Таким образом, ошибка определения координат GPS-приемником должна находиться в пределах 2 м.

Если ориентироваться на материалы космической съемки, которые в перспективе планируется получать с белорусского спутника, то данные дистанционного зондирования в этом случае будут иметь следующие характеристики: пространственное разрешение в панхромат-

тическом режиме – 2,5 м; в мультиспектральном режиме – 10 м. Программно можно улучшить 10-метровое разрешение (в мультиспектральном режиме) до 2,5 м, используя панхроматическое изображение. Если принять, что итоговая погрешность (с учетом погрешности опознания опорной точки на снимке) составит 5 м, то ошибка определения координат GPS-приемником не должна превышать 2,5 м.

Разумеется, в любом случае погрешность определения координат в процессе GPS-съемки желательно минимизировать настолько это возможно, поскольку итоговая дисперсия погрешности определения координат на уже привязанных к топооснове материалах ДДЗ будет включать в себя сумму дисперсий погрешностей всех составляющих ее элементов, и чем меньше они будут, тем меньше будет погрешность итоговая. Кроме того, следует учитывать и тот факт, что в настоящее время рынок данных дистанционного зондирования интенсивно развивается, появляются новые спутниковые системы дистанционного зондирования с еще более высокими спектральными и пространственными характеристиками (разрешением 1 м и менее, с увеличенным числом спектральных каналов), которые в ближайшем будущем могут быть использованы для целей лесного хозяйства. Поэтому при создании сети координатных пунктов целесообразно учитывать и эти соображения.

С учетом вышеизложенного целесообразно выполнять позиционирование пунктов сети с точностью около 1–2 м.

Указанной выше точности отвечает большинство GPS-приемников позиционирования геодезического и ГИС-класса (Trimble R3, серия Trimble GeoExplorer CE – 3 СКО < 3 м) в автономном и тем более в дифференциальном режиме. При использовании приемников геодезического и ГИС-класса в автономном режиме представляется возможность получать координаты с ошибкой около 2–3 м при условии отсутствия помех для радиосигналов. Использование режима дифференциальной коррекции предполагает использование базовой станции, установленной на точке с известными координатами. Такими точками могут служить пункты государственной геодезической сети 1–3 класса точности.

При необходимости получения координат с точностью не хуже 1 м следует использовать GPS-приемники, осуществляющие фазовые измерения (Trimble R3, GeoExplorer CE XT). Этим целям отвечают 2 основных метода измерений: статическая и кинематическая съемка. Оба вида предполагают использование базовой станции, как и в случае с дифференциальным методом.

Для целей точной привязки АФС не требуется получение координат в реальном масштабе времени, поэтому для привязки АФС можно ис-

пользовать съемку в режиме кинематики в постобработке (ППК) либо быстрой статике (RS).

Точность определения координат в плане при использовании данных режимов по паспортным данным 1 см + 1 ppm (СКО) и 0,5 см + 1 ppm соответственно. В связи с тем, что кинематические методы не такие требовательные к времени наблюдения, предпочтение следует отдавать им в случае позиционирования на открытой местности. При наличии некоторого затенения от полога леса (при работе на пересечениях просек или вблизи стен леса) целесообразно использование статического режима съемки и приемников, использующих технологии подавления переотраженных сигналов (например, приемники с технологиями Trimble EVEREST или Максвелл).

**Планирование структуры сети.** Структура сети была запланирована с использованием следующих материалов: аэрофотоснимки масштаба 1:15 000 на район работ, план накидного монтажа, космический снимок Landsat 7 ETM+, топографические карты масштаба 1:100 000, а также векторная карта Скидельского лесхоза.

Целью планирования явилось создание проекта координатной сети.

Расположение точек сети было запланировано в ее узлах, расстояние между которыми 10 км (в благоприятных условиях, когда лесные территории чередуются с открытой местностью) и 5 км (в районах, где лесные массивы весьма значительны по протяженности).

На тестовом полигоне (территория Скидельского лесхоза) была запроектирована сеть с длиной стороны 5 км. Для этого в программе ArcView 3.3 был создан проект, содержащий космический снимок и векторные карты ГЛХУ «Скидельский лесхоз». В этом же проекте были созданы 2 векторных линейных картографических слоя, один из которых содержал вертикальные линии, а другой горизонтальные линии, проведенные через 5 км. На основе линейных слоев при помощи программного модуля «Intersect lines», был создан точечный векторный слой, 98 элементов которого располагались на пересечении вертикальных и горизонтальных линий координатной сетки. Из них 61 точка находилась непосредственно на территории лесхоза.

При помощи космического снимка и материалов АФС выполнялся перенос (смещение) первоначально запроектированных пунктов сети в пункты местности, которые хорошо различимы на материалах ДЗ. В качестве таких точек использовались углы капитальных зданий, пересечение дорог, просек, пересечение мелиоративных каналов и т. д. Объекты должны хорошо дешифрироваться на АФС, КС высокого пространственного разрешения, их состояние не должно изменяться максимально долго. В случае если в районе приблизительного

местоположения точки хорошо опознаваемых объектов не оказывалось, то допускалось отклонение от запланированной схемы на расстояние до 1,0–1,5 км. Эта работа выполнялась при помощи ГИС Arc View 3.3. План созданной сети опорных точек представлен на рис. 1.



Рис. 1. План координатной сети опорных пунктов на территории Скидельского лесхоза

После определения местоположения точки ее характеристики вносились в ведомость опорных точек. Каждой опорной точке присваивался порядковый номер, строился поясняющий абрис или изображение (фрагмент АФС), поясняющий ее местоположение. Эта ведомость использовалась для отыскания на местности опорных пунктов в процессе полевых работ по позиционированию пунктов сети.

**Полевые работы.** При создании сети использовались следующие приборы и материалы: 2 GPS-приемника Trimble R3, Garmin GPSmap 60С, Garmin eTrex VENTURE CX, аэрофотоснимки масштаба 1:15 000, план накидного мон-

тажа, топографические карты масштаба 1:100 000, ведомость твердоопознанных точек.

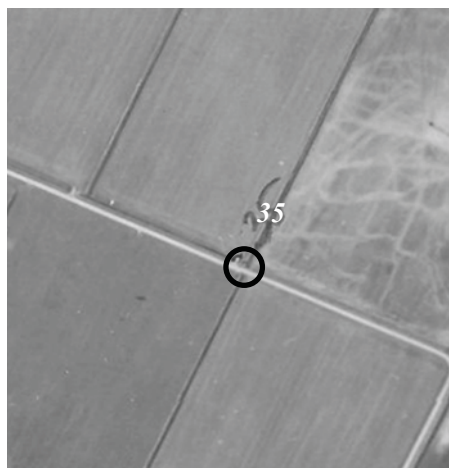


Рис. 2. Фрагмент АФС, поясняющий расположение опорного пункта № 35

Перед началом съемки во встроенном программном обеспечении приемника Trimble R3 Digital Fieldbook был создан рабочий проект, где в качестве системы координат была установлена СК-42. Позиционирование велось автономно в режиме РРК (Post Processed Kinematic – кинематика в постобработке) продолжительностью 20 эпох по 5 с, т. к. этот метод отвечает требованиям точности и экономии времени [1–7, 9–14]. Рекомендуемые производителем установки маски возвышения, отношения сигнал/шум и граничного значения PDOP не изменялись. Перед началом съемки приемник устанавливался на точку, и после ожидания в течение 1–2 мин для того, чтобы приемник получил устойчивый сигнал от возможно большего числа доступных в данной местности спутников (не менее 4), а фактор PDOP принял как можно меньшее значение, приступали к позиционированию. Следует отметить, что в некоторых случаях в лесных условиях выполнить вышеупомянутые требования было практически невозможно в связи с неблагоприятным пространственным расположением космических аппаратов (КА).

Наряду с оборудованием фирмы Trimble, для координирования точек сети были задействованы приемники Garmin GPSmap 60С и eTrex VENTURE CX. Поскольку встроенное программное обеспечение данного оборудования не поддерживает систему СК-42, позиционирование выполнялось в геодезической системе координат WGS 84.

В процессе выполнения полевых работ вносились коррективы в запланированное положение опорных пунктов в случае, если объекты (ориентиры для дешифрирования опорных пунктов на КС) либо отсутствовали на местно-

сти, либо имели недостаточно четкую контурную выраженность и были непригодны для дешифрирования пункта на материалах дистанционного зондирования.

**Пересчет координат.** Координаты точек сети, полученные с использованием приемников Garmin, представлены в системе WGS-84 в отличие от координат, полученных с применением оборудования фирмы Trimble. Для сравнения точности позиционирования приборов необходимо пересчитать координаты из WGS-84 в СК-42. При экспортировании координат точек из приемников Garmin в текстовый формат была использована программа MapSource версии 6.11.6. Для передачи данных из приемника Trimble R3 была задействована программы Microsoft ActiveSync и утилита Trimble Data Transfer.

Пересчет координат из одной системы координат в другую выполнялся с использованием ПО Trimble Geomatics Office.

**Сравнение точности приемников Trimble R3 и Garmin.** При определении координат твердоопознанных точек сети использовались приемники 2 различных производителей Trimble и Garmin, поэтому представляет интерес сравнение точности позиционирования этих приборов. Сравнению подвергались значения координат, полученные различными приборами. Приемник Trimble R3 относится к приборам геодезического класса (точность автономного позиционирования обычно менее 3 м при вероятности 3 СКО), поэтому координаты, полученные с его помощью, принимались за эталон сравнения.

При позиционировании приемником Garmin GPSmap 60C отклонения составили от 0,2 м до 29,8 м. В 25% случаев отклонение от эталона превышает 4 м. При позиционировании приемником Garmin eTrex VENTURE CX отклонения в сравнении с эталоном находились в пределах от 0,6 до 43,6 м. В 36% случаев отклонение от эталона превышает 4 м. Следует отметить, что точность позиционирования приемниками Garmin согласуется с результатами, полученными в работе [1, 10, 12–14].

Значительные отклонения в координатах при использовании приемников Garmin (Garmin GPSmap 60C и eTrex VENTURE CX) могут быть частично объяснены экранированием сигнала пологом леса, т. к. в ряде случаев позиционирование выполнялось под пологом древостоев со значительной сомкнутостью.

Анализ отклонений, которые получены при работе с приемниками Garmin GPSmap 60C и eTrex VENTURE CX, позволяет сделать вывод о недопустимости их использования для целей определения координат опорных пунктов сети, а также для выполнения лесных съемок. Погрешности в определении координат, возникающие при их использовании, в большинстве случаев значительно превышают погрешность простран-

ственного разрешения АФС и КС, а также требований по проведению лесных съемок.

**Оценка точности создания опорной сети.** Оценка точности создания сети выполнялась с использованием ГИС ArcView следующим образом. Векторная карта лесхоза привязывалась с использованием пунктов опорной сети и с помощью ГИС определялись отклонения между координатами опорного пункта (который не использовался для привязки или трансформирования карты), полученного в результате GPS-позиционирования, с координатами точки определенными с помощью ГИС, где этот пункт должен находиться в соответствии с его первоначально запроектированным местоположением (пересечение просек или до-рог и т. д.).

Следует отметить, что результирующая погрешность будет состоять из погрешности непосредственно GPS-позиционирования, а также погрешности самой векторной карты.

Трансформация исходной векторной карты была выполнена в модуле ShapeWarp 2.1 для ArcView GIS 3.3 с использованием трансформации по первому порядку полиномиального преобразования по опорным точкам.

Отклонения в координатах для контрольных пунктов определялись дважды: до трансформирования карты и после него. Полученные отклонения в координатах контрольных пунктов (при использовании исходной векторной карты до трансформации) имели систематическое северо-восточное направление и составили от 8,5 до 18,3 м (таблица). Среднеквадратическое отклонение (СКО) составило  $\pm 13,6$  м. Данный факт говорит о том, что отклонение векторной карты лесхоза от опорной сети помимо постоянной компоненты, вероятно, имеет некоторую изменяющуюся в зависимости от лесничества составляющую.

Таблица

**Отклонения в контрольных пунктах (до и после проведения трансформации векторной карты)**

№ пункта	Отклонение, м	
	до трансформации	после трансформации
1	8,5	1,0
2	10,6	3,5
3	15,3	1,0
4	17,0	3,6
5	11,2	5,1
6	18,3	3,7
7	11,4	1,5
СКО	$\pm 13,6$	$\pm 3,1$

После преобразования векторной карты лесхоза отклонение уменьшилось и составило от 1 до 5,1 м. Среднеквадратическое отклонение составило  $\pm 3,1$  м.

Для увеличения точности позиционирования пунктов целесообразно использование методов относительных измерений или дифференциальной коррекции (съемка с использованием базовой станции с опорой на элементы государственной геодезической сети). В этом случае при позиционировании подвижным приемником можно использовать режим съемки РРК либо Fast Static (быстрая статика).

**Выводы и рекомендации.** Для выполнения трансформирования материалов дистанционного зондирования целесообразно закладка сети опорных пунктов на территории лесохозяйственных предприятий. Узлы координатной сети опорных пунктов целесообразно располагать по сетке 5×5 км. Точность позиционирования опорных пунктов должна быть не более 2 м.

Координатная сеть опорных точек может использоваться для решения следующих задач:

1) геометрическая коррекция космических снимков. Элементы опорной сети дешифрируются на КС, после чего производится трансформация снимка. Трансформированные по опорным точкам КС могут использоваться в дальнейшем для целей создания векторных картографических материалов;

2) координатная привязка аэрофотоснимков при создании картографических материалов лесоустройства [15, 16];

3) координатная привязка проектов фотограмметрической обработки аэрофотоснимков в программном комплексе Photomod для получения ортофотопланов и точной цифровой картографической основы [8, 15, 17];

4) коррекция координатных привязок векторных карт лесхозов.

Скорректированные картографические материалы будут характеризоваться более высокой точностью отображения контуров лесных участков и лучше соответствовать целям лесохозяйственного проектирования.

### Литература

1. Comparison of GPS receiver accuracy and precision in forest environments. Practical recommendations regarding methods and receiver selection: Shaping the Change XXIII FIG Congress Munich, Germany, Oct. 8–13, 2006 / Rodríguez-Pérez J. R. [et al.]. – Munich, 2006.

2. Deckert, C. Forest canopy, terrain, and distance effects on global positioning system point accuracy / C. Deckert, P. V. Bolstad // *Photogramm. Eng. Rem. Sens.* – 1996. – Vol. 3. – P. 317–321.

3. Holden, N. M. A method for relating GPS performance to forest canopy cover / N. M. Holden [et al.] // *Int. J. For. Eng.* – 2000 – Vol. 2. – P. 51–56.

4. Liu, C. J. Using differential GPS for forest traverse surveys / C. J. Liu, R. Brantigan // *Can. J. For. Res.* – 1995. – Vol. 11. – P. 1795–1805.

5. Liu, C. J. Effects of selective availability on GPS positioning accuracy / C. J. Liu // *Southern Journal of Applied Forestry.* – 2002. – Vol. 3. – P. 140–145.

6. Naesset, E. Point accuracy of combined pseudorange and carrier phase differential GPS under forest canopy / E. Naesset // *Can. J. For. Res.* – 1999. – Vol. 29. – P. 547–553.

7. Naesset, E. Assessing point accuracy of DGPS under forest canopy before data acquisition, in the field and after postprocessing / E. Naesset, T. Jonmeister // *Scand. J. Forest. Res.* – 2002. – Vol. 4. – P. 351–358.

8. Photomod 4.1. Введение: руководство пользователя. – М.: Пакурс, 2006. – 59 с.

9. Piedallu, C. Effects of forest environment and survey protocol on GPS accuracy / C. Piedallu, J. Gegout. // *Photogramm. Eng. Rem. Sens.* – 2005. – Vol. 9. – P. 1071–1078.

10. Positioning precision and sampling number of DGPS under forest canopies / I. Sawaguchi [et al.] // *J. For. Res.* – 2003. – Vol. 8. – P. 133–137.

11. Sigrist, P. Impact of forest canopy on quality and accuracy of GPS measurements / P. Sigrist, P. Coppin, M. Hermy // *Int. J. Rem. Sens.* – 1999. – Vol. 18. – P. 3595–3610.

12. Tachiki, Y. Effects of polyline simplification of dynamic GPS data under forest canopy on area and perimeter estimations / Y. Tachiki [et al.] // *J. For. Res.* – 2005. – Vol. 10. – P. 419–427.

13. Wing, M. G. Consumer-grade Global Positioning System (GPS) accuracy and reliability / M. G. Wing, A. Eklund, L. D. Kellogg // *J. For.* – 2005. – Vol. 4. – P. 169–173.

14. Yoshimura, T. Comparing the precision and accuracy of GPS positioning in forested areas / T. Yoshimura, H. Hasegawa // *J. For. Res.* – 2003. – Vol. 8. – P. 147–152.

15. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов: утв. приказом Комзема 24.06.03. – Минск: Белницзем, 2003. – 78 с.

16. Краткая технологическая схема выполнения работ по созданию планово-картографических материалов лесоустройства в программном комплексе Formod 1.9: утв. приказом ген. директора РУП «Белгослес» 12.04.07. – Минск, 2007. – 36 с.

17. Кулагин, А. П. Методические аспекты по разработке технологии обработки аэрофотоснимков с использованием цифровых фотограмметрических методов при создании лесных карт / А. П. Кулагин, М. А. Ильючик, И. Б. Страшко // *Труды БГТУ. Сер. I, Лесн. хоз-во.* – 2007. – Вып. XV. – С. 46–49.