

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» / Russian journal of resources, conservation and recycling <https://resources.today>

2017, Том 4, №1 / 2017, Vol 4, No 1 <https://resources.today/issues/vol4-no1.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/03RRO117.pdf>

DOI: 10.15862/03RRO117 (<http://dx.doi.org/10.15862/03RRO117>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Бойков В.В., Пересадко Е.С. О применении спутниковых методов позиционирования в экологическом мониторинге природных ресурсов и объектов // Отходы и ресурсы, 2017 №1, <https://resources.today/PDF/03RRO117.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
DOI: 10.15862/03RRO117

For citation:

Bojkov V.V., Peresadko E.S. (2017). On the application of satellite positioning methods in the ecological monitoring of natural resources and objects. *Russian journal of resources, conservation and recycling*, [online] 1(4). Available at: <https://resources.today/PDF/03RRO117.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/03RRO117

УДК 574.2, 520.87, 64.011.322

Бойков Владимир Васильевич

ОАО «Научно-производственная корпорация «РЕКОД», Россия, Москва¹
Главный специалист
Доктор технических наук, профессор
Лауреат Государственной премии
E-mail: bojkov234@yandex.ru

Пересадко Евгений Степанович

ОАО «Научно-производственная корпорация «РЕКОД», Россия, Москва
Ведущий специалист
Кандидат технических наук
E-mail: esperes38@mail.ru

**О применении спутниковых методов
позиционирования в экологическом мониторинге
природных ресурсов и объектов**

Аннотация. Статья посвящена вопросам координатного обеспечения мониторинга природных ресурсов и объектов с использованием спутниковых методов. Рассмотрены ресурсы и объекты, требующие при экологическом мониторинге координатной привязки к местности. Приведены преимущества использования спутниковых методов позиционирования перед традиционными геодезическими методами. Выполнен обзор основных методов координатных определений (навигационные определения, дифференциальный метод с использованием базовой станции, спутниковые системы высокоточного позиционирования). Приведены достигнутые точности каждого из методов. Рассмотрены основные положения технологии спутниковых координатных определений. Авторами приведены результаты исследований по применению технологии PPP (Precise Point Positioning). Абсолютный метод координатных определений в технологии PPP обеспечивает точность в режиме реального времени в статике на уровне средних квадратических ошибок 3-5 см, в динамике – 10 см. Рассмотрено применение различных методов спутниковых координатных определений в зависимости от требований по точности мониторинга природных ресурсов и объектов (на метровом, дециметровом,

¹ 127018, г. Москва, 3-й проезд Марьиной Рощи, дом 40, корпус 6, строение 1

сантиметровом и миллиметровом уровнях), а также используемая в методах аппарата пользователей).

Ключевые слова: экологический мониторинг; координатные определения; спутниковая система высокоточного позиционирования; базовая станция; технология Precise Point Positioning; критически важные объекты; режим реального времени; постобработка

Введение

Наступающий 2017 год, как известно, объявлен Годом экологии, а экологическое направление, как приоритетное, заложено в недавно утверждённую Стратегию научно-технологического развития России². Одним из важнейших практических действий долгосрочного прогнозирования качества окружающей среды являются контроль её состояния и определение тенденций ее изменения. Эти действия подразумевают оценку состояния окружающей среды в конкретном месте и в конкретное время, что означает координатно-временную привязку контроля. Целью статьи являются популяризация и продвижение в практику мониторинга природных ресурсов и объектов современных спутниковых методов позиционирования. Под координатно-временной привязкой в пространстве и времени понимается определение на конкретный момент времени плановых координат объектов в заданных системах отсчета. К ресурсам, требующим координатно-временной привязки их границ, относятся, прежде всего:

- земли, занятые промышленными объектами и объектами инфраструктуры;
- лесные ресурсы промышленного значения;
- водные ресурсы – воды, используемые для орошения, источники водоснабжения, водоёмы, водохранилища;
- ресурсы сельскохозяйственного назначения (почвенно-земельные – земля и ее верхний слой – почва, площади, занятые различными сельскохозяйственными культурами, кормовые ресурсы);
- минеральные ресурсы (карьеры, природные строительные материалы, полезные ископаемые);
- ресурсы, изымаемые из природной среды (ареалы распространения диких животных, представляющих объекты промысловой охоты; лекарственного сырья естественного происхождения; ресурсы рекреационного хозяйства, заповедных территорий и др.).

Координатно-временной привязке подлежат отходы производства и потребления, такие как свалки мусора, отвалы горных пород, терриконы. Она необходима при выполнении работ по выявлению и ликвидации последствий аварийных ситуаций и техногенных катастроф, связанных с природной или человеческой деятельностью (обвалы, сели, лавины, землетрясения, наводнения, разливы нефти, заражение местности отравляющими веществами и т. д.).

Исключительное значение координатно-временная привязка имеет для мониторинга состояния «критически важных объектов» (КВО), под которыми понимаются объекты, нарушение (или прекращение) функционирования которых приводит к потере управления

² Заседание Госсовета об экологическом развитии России в интересах будущих поколений. 27.12.2016.
URL: <http://www.putin-today.ru/archives/39164>.

экономикой субъекта, ее необратимому негативному изменению (или разрушению) или существенному снижению безопасности жизнедеятельности населения, проживающего на данной территории, на длительный период времени. В состав КВО входят инженерные сооружения, здания, предназначенные для массового скопления людей, другие крупные объекты, подверженные природно-техногенным опасностям. Задачей мониторинга КВО является реализации мер по своевременному прогнозированию, выявлению и предупреждению угроз и кризисных ситуаций в отношении объектов.

Спутниковые методы координатно-временной привязки объектов (позиционирование) по сравнению с традиционными геодезическими методами, основанными на применении наземных измерительных средств (тахеометр, дальномер, нивелир), имеют ряд преимуществ, обеспечивающих их приоритетное применение, например:

- применение основано на использовании глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), обладающих более высокой надежностью и оперативностью, которые базируются на применении исключительно радиоэлектронных устройств, имеющих высокий уровень автоматизации.
- они способны непрерывно функционировать в любое время суток и года, независимо от погодных и климатических условий, с минимальным участием человека, предоставляя результаты с практически любой оперативностью. Эти результаты содержат плановые и высотные смещения объекта мониторинга (по трем осям координат).
- обладают более высокой объективностью в том смысле, что не зависят в такой степени от структуры исходной геодезической основы, как системы, основанные на традиционных измерительных средствах. Исходные пункты в спутниковых технологиях могут находиться на удаленностях, гарантирующих их стабильное положение.

Методы спутникового позиционирования

1. Метод навигационных определений

Спутники ГНСС непрерывно излучают навигационные сигналы, а установленный на земной поверхности спутниковый приемник пользователя (рисунок 1а) их принимает и преобразует в дальномерные и фазовые измерения. Одновременно принимается так называемая эфемеридно-временная информация (координаты наблюдаемых спутников в фиксированный момент времени). В вычислителе спутникового приёмника решается навигационная задача – пространственная засечка с вычислением координат точки стояния приемника с точностью на уровне средних квадратических ошибок (СКО) порядка нескольких метров в системе координат навигационных спутников.

Достоинством метода является применение относительно дешевых пользовательских приёмников, недостатком – низкая точность позиционирования, впрочем, достаточная для многих приложений экологического мониторинга.

2. Дифференциальный метод

В нём с двух точек (рисунок 1б, в): выполняются одновременные наблюдения одних и тех же навигационных спутников, при этом одна из точек принимается за исходную (с известными координатами). Поскольку влияние внешних факторов на измерения при ограниченном расстоянии между точками примерно одинаково, то при решении задачи по

полученным одновременным измерениям можно существенно уменьшить ошибку взаимного положения этих точек. Положение второй точки относительно первой можно получить на сантиметровом уровне точности. Достоинством метода является высокая точность. Но это достигается рядом условий:

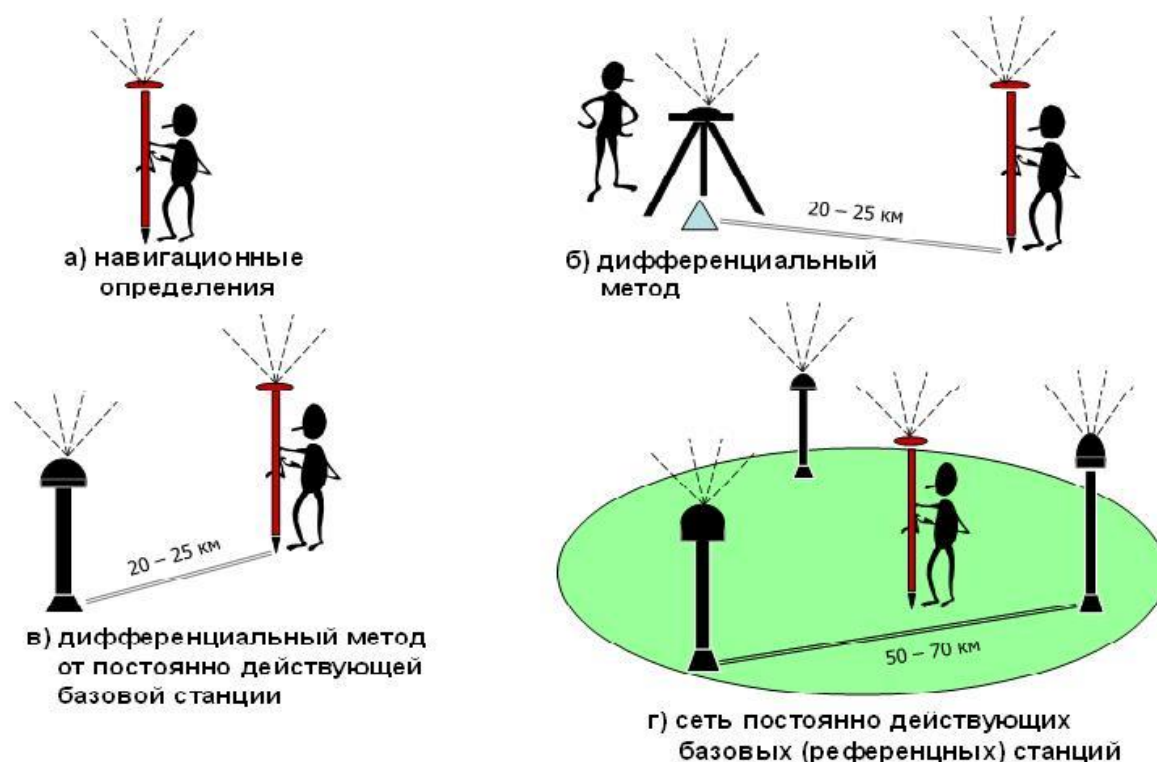


Рисунок 1. Методы спутниковых координатных определений (рисунок составлен авторами)
Figure 1. Methods of satellite coordinate definitions

- для работы нужны два спутниковых приемника, как правило, двухчастотных, стоимость каждого из которых находится в пределах 1 млн. рублей;
- для выполнения работы необходимо участие, как минимум, двух исполнителей;
- сбор и обработка информации со всех приемников осуществляется, как правило, после выполнения наблюдений (режим постобработки).

Несмотря на более высокую цену позиционирования по сравнению с методом навигационных определений дифференциальный метод применяется для координирования точек в задачах, требующих высокой точности. Недостаток метода – позиционирование выполняется на ограниченном расстоянии от базовой станции, причём, с удалением от неё точность понижается.

3. Метод постоянно действующих базовых (референчных) станций

Заключается в создании сети таких станций (рисунок 1г). Главным назначением сети референчных станций (РС) и основным преимуществом перед другими методами является позиционирование с высокой точностью в режиме реального времени. Создаваемую систему в составе сети РС, вычислительного центра (ВЦ), каналов связи между РС и ВЦ, ВЦ и пользователями принято называть спутниковой системой высокоточного позиционирования (СВТП). Структурная схема построения СВТП приведена на рисунке 2. Сеть РС образует жесткий геодезический каркас с ошибкой относительного положения РС на уровне нескольких миллиметров.

В состав референционной станции входит двухчастотный спутниковый приёмник геодезического класса точности с антенной, установленной на капитальном здании. Для антенны обеспечивается свободный горизонт приёма сигналов с навигационных спутников. РС работает круглосуточно в автоматическом режиме, передавая по каналам связи измерительную информацию в ВЦ. В качестве каналов связи используется интернет.

В состав ВЦ входит каналообразующая аппаратура, сервер-архив информации с функцией организации интернет-связи, несколько персональных компьютеров среднего класса, специальное программное обеспечение.

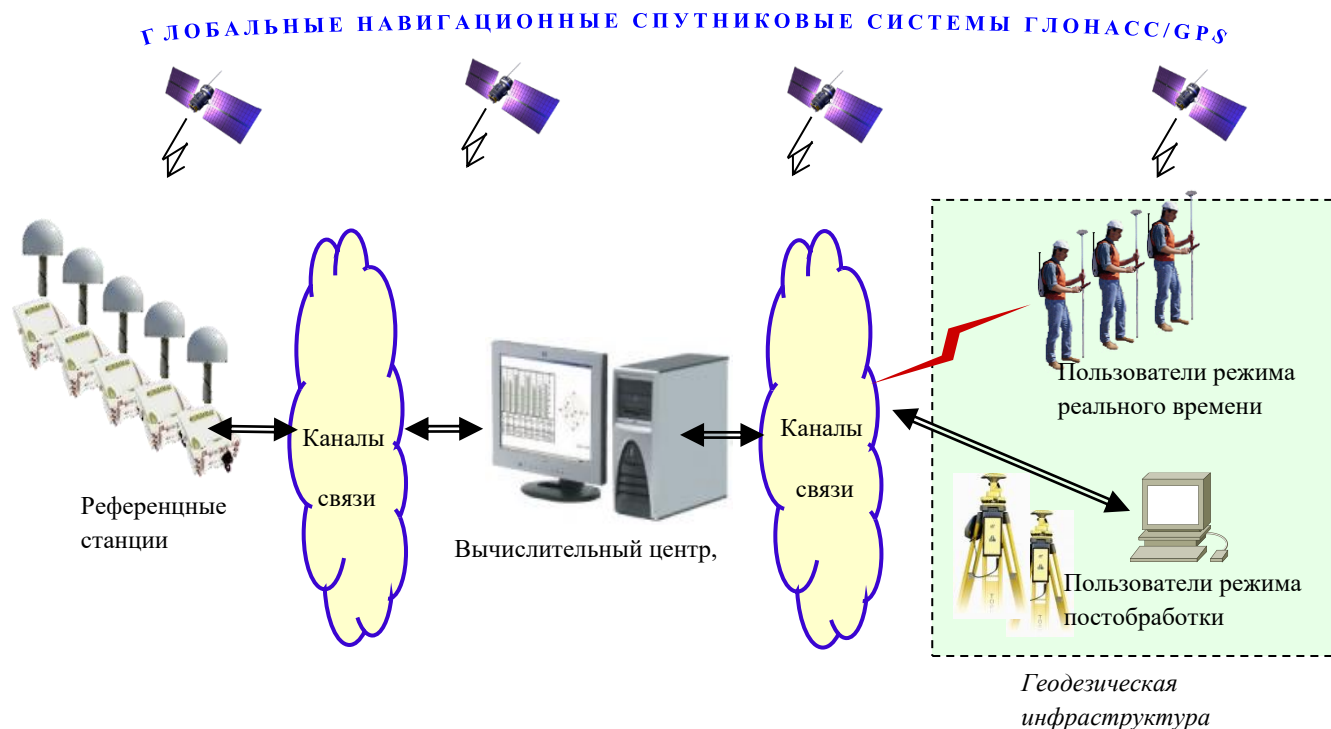


Рисунок 2. Структурная схема построения спутниковой системы высокоточного позиционирования (рисунок составлен авторами)
Figure 2. Block diagram for constructing satellite system of high accuracy positioning

Пользователь имеет переносный спутниковый приёмник и осуществляет позиционирование в режиме реального времени или в режиме постобработки.

В состав геодезической инфраструктуры входят государственная и местные системы координат, используемые в регионе, параметры преобразований между системами координат, цифровые модели местности.

Технология работы СВТП в режиме реального времени состоит в следующем:

- РС принимают информацию и передают в режиме реального времени в ВЦ кодовые и фазовые измерения по всем видимым спутникам;
- ВЦ принимает информацию со всех РС, ее архивирует и выполняет обработку данных с уточнением локальных параметров орбит спутников, параметров тропосферы и ионосферы, ухода бортовой и наземной шкал времени, многолучевости. Рассчитываются корректирующие данные для точных определений (поправки в кодовые и фазовые измерения применительно к РС, а

также градиенты их изменения) и передаются по каналу GSM (GPRS) пользователям;

- пользователи со спутниковыми приемниками на определяемой точке принимают измерительную информацию со спутников ГНСС и корректирующую информацию из ВЦ и вычисляют свои координаты с точностью на уровне СКО 1-2 см.

Весь процесс выполняется в автоматическом режиме.

При постобработке пользователь с любым спутниковым приемником выполняет на заданной точке необходимый объем наблюдений, записывает их на магнитный носитель. В отложенное время, используя свои измерения и измерения с РС, выполняет постобработку с вычислением координат точки в необходимой системе координат. В зависимости от времени наблюдений на точке постобработка обеспечивает сантиметровую и миллиметровую точность определения координат.

Другими преимуществами СВТП, кроме реализации режима реального времени, являются:

- пользователь работает только с одним приемником;
- потенциальная точность определения координат пользователем сопоставима с точностью координат РС;
- высокая надежность и производительность;
- используется единая система координат для ареала обслуживания СВТП;
- точность позиционирования одинакова в любой точке внутри зоны обслуживания СВТП.

Существенным недостатком метода СВТП является высокая стоимость создания непрерывного навигационного поля на больших по площади территориях. Для сетей с числом РС до 15, расстояния между ними не должны превышать 50 км, более 15 РС – 70 км. Это приводит к высокой стоимости создания и эксплуатации подобных сетей. Поэтому понятно стремление разработчиков систем высокоточного позиционирования увеличить расстояние между станциями и удешевить создание сетей. Это особенно актуально для России с её огромной территорией.

В 2016 году ОАО «НПК «РЕКОД» провёл испытания усовершенствованной технологии высокоточного позиционирования с использованием отечественной Системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ), предоставляющей ультрабыстрые эфемериды и поправки часов спутников ГЛОНАСС и GPS. Исследования выполнены на СВТП Воронежской области (5 РС) с увеличенными расстояниями между РС (в среднем 100 км). Точность определения координат (СКО) в режиме реального времени в статике (неподвижного стояния на точке) и в динамике (при движении автомобиля со скоростью 30 км/час) находится на уровне первых единиц сантиметров. При большем числе РС в сети расстояния между станциями могут быть увеличены до 200 км. Однако и это решение для территории России нельзя признать исчерпывающим. Решение лежит в применении новой технологии PPP (Precise Point Positioning), которая используется рядом компаний, в том числе NovAtel (Канада), Trimble (США), Leica (Швейцария). Принципиальная схема реализации технологии PPP NovAtel³ показана на рисунке 3. Она использует систему TerraStar, которая включает 80 наземных

³ TerraStar PPP на NovAtel CORRECT. ГНСС плюс, Новости, 08.04.2014. URL: <http://www.gnssplus.ru/news/118-terrastar-ppp-na-novatel-correct.html>.

станций, рассредоточенных по всему миру, ведущих непрерывные наблюдения спутников всех ГНСС, 4 диспетчерских пункта, собирающих эту информацию и вычисляющих ультрабыстрые эфемериды и поправки часов спутников, закладывая их на 7 стационарных спутников, через которые эфемеридно-временная информация доводится до потребителей.

Проведенные ОАО «НПК «РЕКОД» испытания показали, что точность определения координат (СКО) в режиме реального времени в статике составила 3-5 см, в динамике – 10 см.

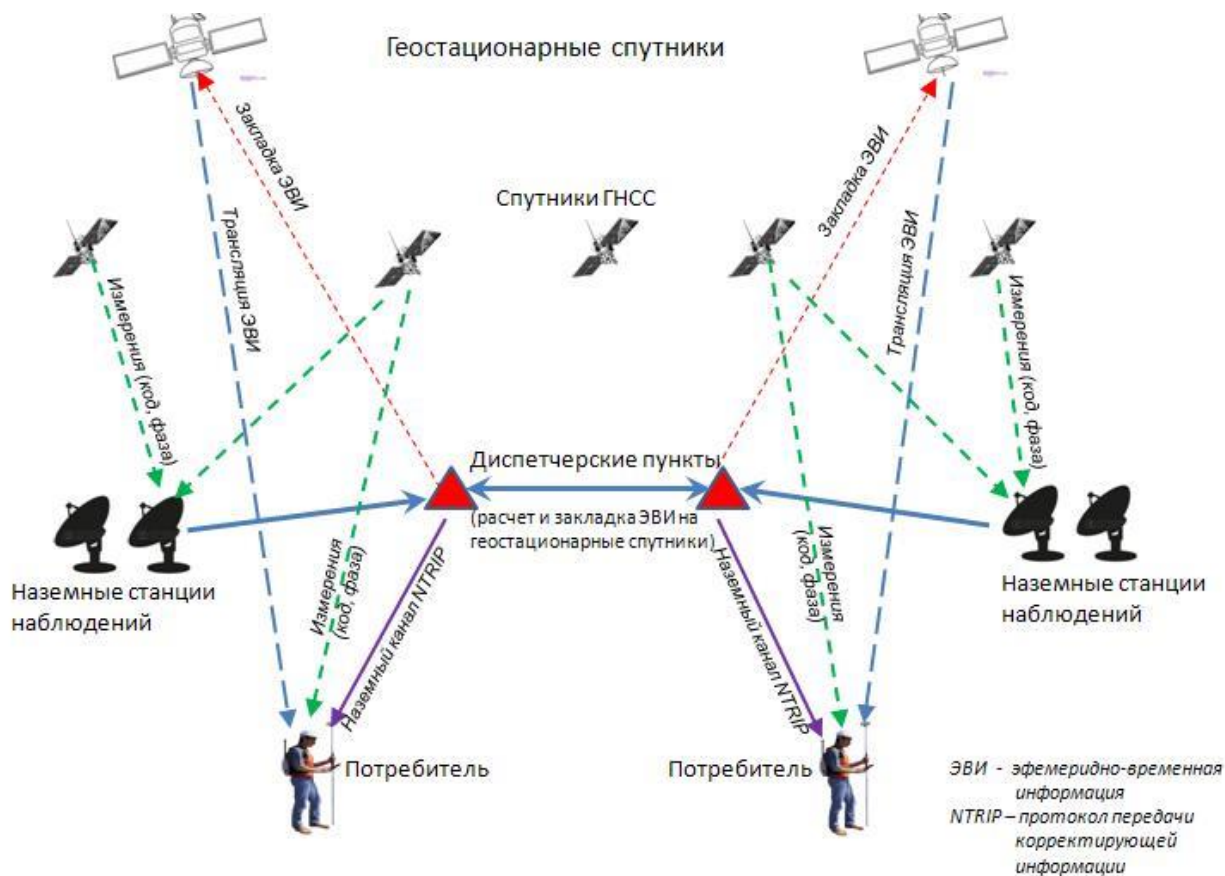


Рисунок 3. Принципиальная схема реализации технологии PPP NovAtel с использованием системы TerraStar (рисунок составлен авторами)
Figure 3. Schematic diagram for implementation of PPP NovAtel technology using the TerraStar system

Технология PPP не требует использования плотной сети станций, что резко снижает стоимость позиционирования и упрощает всю систему обслуживания пользователей.

В России по заказу Госкорпорации «Роскосмос» разрабатывается подобная система, которая на заданном уровне точности может использоваться для экологического мониторинга природных ресурсов и объектов.

Использование спутникового метода для мониторинга природных ресурсов и объектов

Мониторинг может выполняться для неподвижных точек (объектов) закрепленных на местности или для объектов, изменяющих своё местоположение. В зависимости от требований к точности позиционирования применяются различные методы. Так для позиционирования на уровне метровой точности используется метод навигационных определений. Имеется большой спектр приборов пониженной точности (Garmin, Magellan Navigation и других трекеров), определяющих: широту, долготу и высоту точки; точное время; ориентацию по сторонам света;

текущую скорость, пройденное расстояние, среднюю скорость; направление на точку с координатами, заданными пользователем; текущее положение на электронной карте местности). Некоторые приборы оснащены средствами оперативной передачи информации по каналам связи в центр, выполняющий сбор и анализ данных.

При требованиях дециметрового уровня позиционирования используется дифференциальный метод от базовой станции или работа с СВТП. Как правило, для этого применяются одночастотные спутниковые приёмники.

Навигационный и дифференциальный методы обеспечивают:

- экологический мониторинг природно-техногенных явлений при штатной эксплуатации объектов, в аварийных ситуациях и при ликвидации последствий аварийного воздействия объектов на окружающую среду в интересах Системы экологического обеспечения эксплуатации объектов и Министерства чрезвычайных ситуаций;
- мониторинг окружающей среды и объектов при выполнении геологических, лесоустроительных, гидрологических и сельскохозяйственных работ;
- мониторинг свалок мусора, отвалов горных пород, терриконов;
- отыскание скрытых под землей или под снегом объектов подземных коммуникаций.

Сантиметровый и миллиметровый уровень мониторинга обеспечивает работа с СВТП. При этом в качестве датчиков применяются двухсистемные двухчастотные спутниковые приемники геодезического класса. Кроме экологического мониторинга на сантиметровом уровне точности СВТП обеспечивает:

- производство геодезических и картографических работ:
 - создание высокоточных геодезических сетей;
 - создание и обновление топографических карт и планов;
 - высокоточное определение координат центров фотографирования при аэрофотосъемке;
- производство кадастровых и землеустроительных работ:
 - определение и уточнение границ земельных участков;
 - инвентаризация земель, создание и ведение кадастра объектов недвижимости;
- производство работ по территориальному планированию:
 - разработка генеральных планов развития территорий субъектов РФ и муниципальных образований;
 - разработка проектов планировки территорий;
- инженерные изыскания и строительство:
 - обеспечение процессов изысканий и строительства на этапах проектирования, непосредственного строительства, а также эксплуатации инженерных сооружений и объектов;
 - вынос проектов в натуру;
 - исполнительные съёмки;

- высокоточное позиционирование транспорта (железнодорожного подвижного состава, парковки самолетов, спецтранспорта, милиции, медслужбы, ремонтных бригад);
- разработка и ведение геоинформационных систем:
 - создание электронных баз пространственных данных, цифровых карт;
 - решение прикладных задач с использованием геоинформационных систем.
- коммунальное и складское хозяйство.

Исключительной возможностью СВТП является определение с миллиметровой точностью:

- деформаций фундаментов сооружений;
- горизонтальных отклонений верха высотных башен, зданий, вышек и определение их крена;
- состояния плотин, дамб и других гидрологических сооружений;
- профилей аэродромных взлетно-посадочных полос (отклонений от горизонтальной плоскости);
- деформаций мостов и эстакад;
- состояния железнодорожного и автомобильного полотна;
- движения горных пород и геодинамических процессов в районах расположения важных объектов, в том числе подземных;
- метрологических параметров измерительных средств.

На объектах мониторинга, требующих точность определения смещений на сантиметровом и миллиметровом уровнях, могут быть организованы два вида наблюдений в статике:

- непрерывный во времени без снятия приёмника (датчика) с передачей измерительной информации в Центр обработки по каналам связи в режиме on-line;
- периодический с заданными интервалами наблюдений и с перерывами между ними со снятием датчика.

В заключение отметим, что реализованные спутниковые методы координатных определений обеспечивают мониторинг природных ресурсов и объектов, как с метровой точностью (метод навигационных определений), так и с повышенной сантиметровой и миллиметровой точностью (дифференциальный метод от постоянно действующей базовой станции, сеть базовых станций). При этом наиболее удобным и производительным для пользователей методом является работа со спутниковыми системами высокоточного позиционирования в режиме реального времени. Перспективным является метод работы с использованием технологии PPP, которая не требует использования плотной сети станций, что снижает стоимость позиционирования и упрощает всю систему обслуживания пользователей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алакоз В.В., Бойков В.В., Монахова М.А., Пересадько Е.С. О проблемах геодезического обеспечения кадастра недвижимости // Геопрофи. 2012. №4. С. 11-15.
2. Баринов М.Ф. Экологический мониторинг окружающей среды как основополагающий фактор предупреждения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2013. Выпуск №3. С. 66-72.
3. Бобылев С.Н. Гармонизация экономического развития и устойчивого использования природных ресурсов // Монография Устойчивое природопользование: постановка проблемы и региональный опыт / под ред. В.М. Захарова. – Институт устойчивого развития / ЦЭПР Москва. 2010. С. 7-48.
4. Безбородов В.Г., Бойков В.В., Булаева Е.А. Опыт спутникового мониторинга плотины Нижнекамской ГЭС // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2012. №4. С. 72-75.
5. Бойков В.В., Булаева Е.А., Монахова М.А. Возможности Спутниковой системы по высокоточному определению координат объектов. Геодезия и картография. 2006. №8. С. 5-10.
6. Бойков В.В., Пересадько Е.С. Опыт эксплуатации Спутниковой системы межевания земель (проект «Москва») // Геопрофи. 2005. №6. С. 58-61.
7. Жаворонков А.С., Жаворонков С.С. Экологический менеджмент и системный подход к организации цивилизованного предпринимательства XXI века // Российское предпринимательство. 2004. №4 (52). С. 94-97.
8. Федюнина М.В. Эколого-экономическая модель аграрного природопользования // Российское предпринимательство. 2010. №5 Вып. 1 (158). С. 101-104.
9. K. Sheridan, P. Toor, D. Russell, C. Rocken, L. Mervart. TerraStar-C. A global GNSS service for cm level precise point positioning with ambiguity resolution // Unit A03. Сайт gnss.co.jp. URL: http://gnss.co.jp/wp-content/uploads/2016/04/FP_ENC-037.pdf (Дата обращения 25.01.2017).

Bojkov Vladimir Vasil'evich

Scientific and production corporation «REKOD», Russia, Moscow
E-mail: bojkov234@yandex.ru

Peresadko Evgeny Stepanovich

Scientific and production corporation «REKOD», Russia, Moscow
E-mail: esperes38@mail.ru

On the application of satellite positioning methods in the ecological monitoring of natural resources and objects

Abstract. The article is devoted to the issues of coordinate support for monitoring of the natural resources and objects using satellite methods. The resources and objects that require a coordinate referencing to the terrain during ecological monitoring were considered. The advantages of using satellite positioning methods over the traditional geodetic ones are given. A review of the main methods of coordinate definitions (navigation definitions, differential method with the use of a base station, satellite systems of high-precision positioning) was done. The available accuracies of each of methods are shown. The conceptual issues of technology of the satellite coordinate determinations are considered. The authors give the results of research on the use of PPP technology (Precise Point Positioning). The absolute method of coordinate determinations in the PPP technology provides accuracy in the real-time mode under static conditions at the level of root-mean-square errors of 3-5 cm and during dynamics – 10 cm. The application of various methods of satellite coordinate determinations depending on the accuracy requirements for monitoring natural resources and objects (at the meter, decimeter, centimeter and millimeter levels), as well as the user equipment utilized in the methods.

Keywords: ecological monitoring; coordinate definitions; satellite system of high accuracy positioning; base station; Precise Point Positioning technology; critically needed objects; real-time mode; post processing

REFERENCES

1. Alakoz V.V., Boikov V.V., Monakhova M.A., Peresad'ko E.S. (2012). On the problems of geodetic support of the real estate cadaster. *Geoprofi*, №4, pp. 11-15. (in Russian).
2. Barinov M. (2013) Ecological monitoring of environment as the main factor of prevention emergency situations of natural and man-made disaster. *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoi zashchity*, №3, pp. 66-72. (in Russian).
3. Bobylev S.N. (2010). Garmonizatsiya ekonomicheskogo razvitiya i ustoichivogo ispol'zovaniya prirodnykh resursov. [*Harmonization of economic development and sustainable use of natural resources.*] Moscow: TsEPR, pp. 7-48. (in Russian).
4. Bezborodov V.G., Boikov V.V., Bulaeva E.A. (2012). The experience of satellite monitoring of the dam of the Nizhnekamsk hydropower plant. *Izvestiya VUZov. Geodeziya i aerofotos"emka*, №4, pp. 72-75. (in Russian).
5. Boikov A.V., Bulaeva E.A., Monakhova M.A. (2006). The possibilities of the satellite system by the precise determination of the objects position. *Geodesy and Cartography*, 8, pp. 5-10. (in Russian).
6. Boikov V.V., Peresad'ko E.S. (2005). Operational experience of the satellite land surveying system (the "Moscow" project). *Geoprofi*, №6, pp. 58-61. (in Russian).
7. Zhavoronkov A.S., Zhavoronkov S.S. (2004). Ecological management and a system approach to the organization of civilized enterprise of the XXI century. *Russian Journal of Entrepreneurship*, 4(52), pp. 94-97. (in Russian).
8. Fedyunina M.V. (2010). Ecological and economic model of agricultural nature management. *Russian Journal of Entrepreneurship*, 1(158), pp. 101-104. (in Russian).
9. K. Sheridan, P. Toor, D. Russell, C. Rocken, L. Mervart. TerraStar-C. (2017). A global GNSS service for cm level precise point positioning with ambiguity resolution. *Unit A03. Caïm gnss.co.jp*, [online]. Available at: http://gnss.co.jp/wp-content/uploads/2016/04/FP_ENC-037.pdf. [Accessed 25.01.2017].