

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Факультет среднего профессионального образования**

**ПЦК экономических и профессиональных дисциплин**

## **Самостоятельная работа № 8**

**по дисциплине «Выполнение полевых и камеральных  
работ по созданию геодезических сетей специального  
назначения »**

**на тему: «Современные технологии определения  
местоположения пунктов геодезических сетей на основе  
спутниковой навигации»**

**Специальность 21.02.19 Землеустройство**

**очной формы обучения**

Оренбург, 2025

## **СОДЕРЖАНИЕ**

1.1 Основные принципы работы спутниковых систем координатных определений современных технологий	3
1.2 Особенности проектирования геодезических сетей, создаваемых спутниковыми методами, включая редуцирование и уравнивание таких сетей с использованием современных технологий	6
1.3 Применение спутниковых систем при решении широкого круга геодезических задач с помощью современных технологий	11
1.4 Перспективы дальнейшего развития спутниковых методов в геодезии и навигации	18
Библиографический список	24

# **1.1 ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ КООРДИНАТНЫХ ОПРЕДЕЛИНИЙ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Основные принципы работы спутниковых систем координатных определений современных технологий включают:

-использование принципа беззапросных дальномерных измерений, потребителю в составе навигационного сигнала передаётся информация о координатах спутников. Одновременно производятся измерения дальностей до навигационных спутников.

-измерение расстояний по скорости и времени распространения радиоволн, если измерить дальности до трёх спутников, то, зная их координаты, методом линейной засечки можно определить координаты точки стояния приёмника.

-использование фазового метода, определяемым параметром при расчёте координат точки является время распространения магнитной волны от спутника до точки. Его измеряют фазовым методом, основанном на доплеровском эффекте.

-применение дифференциального режима определений, используется один или более базовых приёмников, размещённых в точках с известными координатами. Они одновременно с приёмником потребителя осуществляют приём сигналов одних и тех же спутников.

Современные спутниковые системы позволяют определить координаты объектов на земле с сантиметровой и даже миллиметровой точностью.

К новому поколению измерительных систем, в частности, относятся приборы (измерительные станции), определяющие координаты X, Y и высоту H точки по сигналам со специальных спутников, вращающихся вокруг Земли по строго определенным орбитам [4].

В настоящее время используются две спутниковые системы определения координат: российская система ГЛОНАСС (Глобальная Навигационная Спутниковая Система) и американская система NAVSTAR GPS (навигационная система определения расстояний и времени, глобальная система позиционирования).

Обе системы состоят из 21 действующего спутника и трех запасных. Орбиты спутников практически круговые и расположены на расстоянии около 20180 км над поверхностью Земли. Такое количество спутников и их расположение обеспечивает одновременный прием сигналов как минимум от четырех спутников в любой части Земли.

Каждая из систем включает три главных сегмента: наземного контроля и управления (НКУ), созвездия спутников (космических аппаратов - КА) и аппаратуры пользователей (АП).

Наземный сегмент состоит из сети станций слежения за спутниками, службы точного времени и центра управления (главной станции). Наземные станции собирают информацию об орбитах спутников, обрабатывают ее и передают на спутники прогноз их координат на определенное время (эфемериды), а также другие данные. Спутники принимают и хранят информацию с наземных станций, а также непрерывно излучают для пользователей измерительные радиосигналы, данные о системном времени, свои координаты и другие сведения. Сегмент пользователя включает совокупность аппаратно-программных средств, реализующих определение местоположения спутниковых приемников на поверхности Земли.

Для спутниковых определений установлены свои геодезические системы координат, представляющие собой пространственную, прямоугольную систему X, Y, Z с началом в центре масс Земли, ось которой направлена к северному полюсу, оси X и Y лежат в плоскости экватора; причем ось X совпадает с плоскостью Гринвичского меридиана, а ось Y - ей перпендикулярна. Для NAVSTAR принята система координат WGS-84, для "ГЛОНАСС" - "ПЗ-90".

Определение местоположения на поверхности Земли с помощью спутников основано на измерении расстояний (дальностей) от спутников до приемника по скорости и времени распространения радиоволн. Если измерить дальности до трех спутников, то, зная их координаты, методом линейной засечки можно определить координаты точки стояния приемника. В силу разных по точности "часов" на спутнике и в приемнике и некоторых других причин определенное до спутника расстояние будет содержать ошибки. Такое ошибочное расстояние получило название "псеводальности". Чтобы правильно вычислить координаты пункта по псевододальностям, надо их измерять не до трех спутников, а, как минимум, - до четырех.

Методы определения местоположений с помощью GPS можно разделить на абсолютные и относительные. В результате применения абсолютного метода координаты пользователя определяются в общеземной системе координат в лучшем случае с ошибкой 1 м.

Для геодезических работ, включая и топографическую съемку, применяют относительный метод, для которого необходимо иметь не менее двух спутниковых приемников. Один из них устанавливается на пункте с известными координатами (базовая станция), другой (или другие) - на точках, координаты которых определяются. Наблюдая в течение некоторого времени одновременно с двух станций одни и те же спутники, можно получить приращения координат относительно базовой станции с ошибкой 0,5 - 2,0 см

Точность относительных определений зависит в основном от времени наблюдений, поэтому различают три основные методики: статическую, кинематическую и динамическую.

Спутниковые приемники различного класса и назначения выпускает ряд зарубежных фирм: "Аштек" и "Тримбл" США, Германия, "Тошсон" Япония, "Лейка" Швейцария, "Геотроникс" Швеция, "Серсель" Франция и др. Один из наиболее точных и простых в обращении спутниковых приемников 460 LS фирмы "Тримбл" имеет приемную антенну диаметром 18 см, принимающую сигналы одновременно с нескольких спутников, истроенную ЭВМ,

обеспечивающую автоматическую регистрацию и разделение сигналов со спутников, и их первичную обработку. Окончательная обработка результатов измерений производится на персональном компьютере по специальной программе [2. с 180].

## **1.2 ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ, СОЗДАВАЕМЫХ СПУТНИКОВЫМИ МЕТОДАМИ, ВКЛЮЧАЯ РЕДУЦИРОВАНИЕ И УРАВНИВАНИЕ ТАКИХ СЕТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Некоторые особенности проектирования геодезических сетей, создаваемых спутниковыми методами:

Выделение каркаса. Это необходимо для высокоточного геодезического обоснования сети и её связи с государственной сетью. В каркасе выделяют не менее трёх пунктов, на которых выполняют спутниковые измерения, обеспечивающие взаимное положение пунктов с повышенной точностью.

Использование максимального количества одновременно работающих спутниковых приёмников. Это позволяет за счёт избыточных измерений повысить точность и надёжность результатов наблюдений.

Совмещение пунктов. Их стараются совместить с сохранившимися пунктами городской триангуляции, основными узловыми пунктами городской полигонометрии и высокоточных сетей специального назначения.

Закладка новых пунктов. Её производят в необходимых случаях для обеспечения требуемой плотности сети. Центры пунктов по возможности делают глубокого заложения для надёжного хранения высоты.

При редуцировании результатов наблюдений их редуцируют в местную систему координат. Затем анализируют и минимизируют расхождения на совмещённых пунктах, готовят предложения и согласовывают параметры изменения «ключа» местной системы координат, проводят совместное уравнивание городских геодезических сетей работ разных лет, составляют каталог в цифровой и традиционной форме и сдают материалы.

При уравнивании геодезической сети, построенной методом относительных ГНСС-измерений, используют метод наименьших квадратов. Он основывается на главном критерии: сумма квадратов поправок к измеренным величинам должна быть минимальна. После уравнивания сети координаты определяемых пунктов получаются как наилучшие из решений, возможных по имеющимся измерениям [1].

В общем процессе обработки топографо-геодезической информации принято выделять следующие уровни или этапы первичная обработка; - предварительная обработка; - окончательная обработка. К первичной обработке относят вычисления, выполняемые непосредственно в процессе измерений. Этот этап позволяет контролировать правильность полученных отсчетов и точность единичных измерений.

В случае спутниковых измерений первичная обработка выполняется непосредственно в полевых контроллерах, а контролем является наличие видимости неба, наличие необходимого числа спутников и допустимость геометрического фактора в процессе измерений, определение координат в навигационном режиме. Следующим этапом является предварительная обработка, которая выполняется с целью оперативной оценки качества измерений в ходе, сети или на отдельном объекте.

По результатам предварительной обработки может быть сделан вывод о пригодности полевых материалов для окончательной обработки и получения готовой продукции, либо о необходимости переделки брака. Оперативное, до выезда бригады из района работ, выполнение предварительной обработки позволяет повысить качество полевых материалов путем отсеивания

недопустимых результатов измерений и сократить затраты, связанные с полевой переделкой или дополнительными измерениями (если отбракованы исходные данные или изменена конфигурация сети).

Предварительная обработка выполняется, как правило, с использованием программ, входящих в комплект спутниковых приемников. Окончательная обработка предназначена для получения готовой продукции — каталогов координат и высот и может быть выполнена после завершения полевых работ и выезда бригад с объекта. Окончательная обработка может выполняться как с использованием программ, входящих в комплект спутниковых приемников, так и с использованием специально разработанных программ. Первичная обработка спутниковых измерений, производимая в приемнике В процессе проведения спутниковых наблюдений в приемном устройстве производится не только регистрация отсчетов измеряемых величин, но и их первичная обработка. Такая необходимость возникает не только при использовании кинематического режима, когда координаты движущегося объекта должны вычисляться в реальном масштабе времени, т. е. непосредственно в приемнике, но и при статических режимах работы с целью не только формирования компактного, сглаженного массива данных, предназначенных для последующей обработки, но и для получения текущей информации, отображаемой на экране дисплея приемного устройства, на основе которой оператор может следить за процессом выполняемых измерений, а в случае необходимости и корректировать этот процесс. Неотъемлемой частью спутниковых приемников является процессорный блок, который не только управляет по заданной программе режимом работы приемника, но и выполняет первичную обработку результатов измерений. При этом обработка подвергается как информация, передаваемая в составе навигационного сообщения, так и результаты измерений, используемые для вычисления псевдодальностей на основе кодовых сигналов и точных значений расстояний между спутником и приемником, базирующихся на фазовых измерениях несущих колебаний.

При обработке передаваемого со спутника навигационного сообщения производится его декодирование, т. е. восстановление информации о текущих эфемеридах спутника, о поправках к показаниям его часов, об ионосферных поправках, об альманахе и о других вспомогательных показателях. Эта информация используется как для формирования файла навигационного сообщения, используемого в дальнейшем при камеральной обработке (пост-обработке), так и для оперативной корректировки показаний часов приемника и для вычисления целого ряда параметров, отображаемых на экране дисплея приемника (приближенные координаты точки стояния, номера наблюдаемых спутников и их расположение на небосводе, геометрический фактор и т. д.).

В процессе обработки, производимой в приемнике, вычисляются также значения псевдодальностей на основе определения времени прохождения кодовыми сигналами расстояний между спутником и приемником. При этом основным источником ошибок, обусловливающим недопустимо большие уклонения в значениях измеряемых расстояний, является сравнительно низкая стабильность частоты опорных 210 кварцевых генераторов, характеризуемая относительной погрешностью на уровне МО<sup>9</sup>. Для минимизации отмеченного влияния используется более стабильное опорное время, передаваемое со спутника в момент начального захвата приемником излучаемых спутником радиосигналов, которое получило название системного времени (GPS или ГЛОНАСС). При этом основная проблема решения такой задачи связана с необходимостью введения в это опорное время задержки, возникающей на участке прохождения сигналом расстояния между спутником и приемником.

С этой целью учитывается тот факт, что отмеченные временные задержки для используемых орбит заключены в диапазоне от 65 до 85 мс. За счет комбинирования псевдодальномерных измерений при многократном использовании спутников удается уточнить значение системного времени, относящееся к приемнику. При этом остаются только те ошибки в измерении расстояний, которые характерны для конкретно определяемого значения псевдодальности.

Для системы GPS такая погрешность применительно к С/А-коду оценивается величиной около 40 м. Вычисляемые на стадии первичной обработки значения псевдодальнестей вводятся в состав файла наблюдаемых данных, используемого при проведении камеральной обработки (пост-обработки). Кроме того, на их основе с применением получаемых из навигационного сообщения эфемерид спутников вычисляются координаты точки стояния приемника на навигационном уровне точности (т. е. с погрешностью в несколько десятков метров).

При выполнении фазовых измерений одно- или двухчастотными приемниками отсчеты в долях фазового цикла производятся на одной или двух несущих частотах с интервалами, исчисляемыми десятыми долями секунды. В результате при проведении сеансов наблюдений, длительность которых может достигать нескольких часов (а иногда и суток) накапливается огромный массив данных, для хранения которого требуются устройства памяти чрезвычайно большой емкости. Для преодоления таких технических трудностей непосредственно в приемнике производится уплотнение регистрируемых данных. Такой процесс часто называют также компрессией. В процессе его реализации вычисляются осредненные значения производимых выборок с интервалами, задаваемыми оператором на стадии подготовки приемника к наблюдениям. Как уже отмечалось, такой интервал чаще всего выбирается равным 10-15 с. Наряду с уплотнением непосредственно в приемнике осуществляется фильтрация данных на основе использования фильтра Калмана.

Обработанная в приемнике информация используется для формирования файла наблюдаемых данных, а также файла навигационного сообщения, на основе которых производится дальнейшая обработка. Наиболее наглядную структуру такие файлы имеют при отображении их в формате RINEX. Каждый из файлов состоит из заголовка и основного массива записанных данных. В заголовке к файлу результатов наблюдений содержится следующая основная информация: - версия формата и показатели, идентифицирующие файл; - дата и время начала сеанса наблюдений; - условное название пункта; - информация о

наблюдателе и его организации; - тип приемника и антенны; 212 - приближенные координаты пункта в системе WGS-84; - величины, характеризующие вынос фазового центра относительно закрепленной на местности марки; - система отсчета фазовых измерений (в циклах или полуциклах); - номера спутников, содержащихся в файле; - вид наблюдений (кодовые или фазовые наблюдения, к какому коду и к какой несущей частоте они относятся); - время записи первого наблюдения, а также некоторая другая вспомогательная информация.

Следующий за заголовком массив записанных в рассматриваемый файл данных включает в себя: - данные, характеризующие эпоху наблюдений (год, месяц, число, а также часы, минуты, секунды); - количество спутников в записанной эпохе и их номера; - уход показаний часов приемника (в секундах); - значения определенных псевдодальностей с использованием С/А-кода и Р-кода (в метрах); - результаты фазовых измерений (для эпохи, начиная со второй, приводятся приращения фазы относительно предыдущей эпохи в долях циклах с соответствующим знаком).

В другом файле, получившем название файла навигационного сообщения, приводятся версия формата и идентификация файла, дата и время начала наблюдений, значения коэффициентов к ионосферной модели, поправки к показаниям часов на спутнике, а также записи, относящиеся к каждой эпохе и содержащие точное системное время, соответствующее моменту посылки со спутника данного сообщения, и значения целого ряда поправок для вычисления эфемерид возмущенной орбиты спутника в заданный момент времени [5.с 250].

### **1.3 ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ПРИ РЕШЕНИИ ШИРОКОГО КРУГА ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Один из методов ослабления отмеченного влияния базируется на выборе повышенной длительности сеанса наблюдений (от одних суток и более). Наряду с этим повышенного внимания заслуживают следующие специализированные методы:

-ослабление влияния многопутности за счет использования на пунктах наблюдения нестандартных экранирующих приспособлений;

-более строгий учет влияния тропосферной рефракции за счет применения радиометров водяных паров;

-организации специализированных методов вычислений, позволяющих определять тропосферные задержки в процессе обработки результатов измерений.

При изучении смещений земной поверхности в городах особое место отводится территориям тех крупных городов, которые расположены в зонах с повышенной тектонической активностью. Примером такого города может служить Красноярск. На его территории в 1999 г. МИИГАиКом совместно с Красноярским АГП начаты работы по созданию геодинамической сети, которая в перспективе позволит отслеживать возникновение опасных деформаций приповерхностных геологических структур. Аналогичные работы начаты в 2000 г. Верхневолжским АГП в г. Казани.

Высокая точность современных спутниковых координатных определений на линиях различной протяженности в сочетании с возможностью проведения измерений в самых разнообразных физико-географических условиях создали предпосылки для эффективного использования спутниковых методов при решении широкого круга задач прикладной геодезии. В последние годы такие методы стали все чаще использоваться при строительстве тоннелей, сооружении мостов, проложении магистральных трубопроводов, создании и дальнейшей эксплуатации линейных ускорителей заряженных частиц и других крупных инженерных сооружений.

Специфика использования спутниковых методов на вышеупомянутых видах работ состоит не только в оперативном определении координат замаркированных точек с высокой точностью, но и в разработке методов определения ориентирных направлений. При этом измерения приходится, зачастую, проводить в условиях частичной экранировки поступающих от спутников радиосигналов различными видами конструкций создаваемых объектов. Отмеченные особенности обуславливают целесообразность разумного сочетания наземных и спутниковых методов геодезических измерений, объединяющих в себе спутниковую приемную аппаратуру с такими традиционными геодезическими инструментами, как теодолиты, тахеометры, нивелиры и створные лазерные системы.

Применительно к строительству тоннелей с использованием спутниковых методов последние применяют с целью построения наземных высокоточных геодезических сетей, перекрывающих всю площадь между входными порталами и устанавливающих связь с опорными сетями соответствующего класса. При создании тоннелей в сложных рельефных условиях преимущество спутниковых методов становится наиболее ощутимым. Накопленный к настоящему времени опыт на такого вида работах свидетельствует о том, что при расстоянии между порталами до 10 км спутниковые методы обеспечивают точность на уровне около 1 см. Отработанные на их основе специализированные методы определения ориентирных направлений обеспечивают разрешающую способность на уровне около одной угловой секунды при взаимном расстоянии между пунктами не менее 400 м .

При создании различного рода дамб возникает необходимость проведения геодезических работ не только в процессе строительства, но и при дальнейшей их эксплуатации с целью идентификации и анализа возникающих деформаций и смещений элементов конструкции, находящихся под большим внешним давлением. Для достижения повышенной точности получаемой информации и ее объективности спутниковые методы во многих случаях объединяют с наземными методами, базирующимися на использовании тахеометров и

высокоточных нивелиров. Совместное использование перечисленных выше технических средств и методов позволяет своевременно и достаточно надежно выявлять опасные деформации и смещения.

Примером описанного подхода может служить Сергиево-Посадская гидроаккумулирующая электростанция. На этом объекте для слежения за деформациями и смещениями наиболее ответственных компонентов конструкции гидроузла использованы в комплексе наземные и спутниковые геодезические методы. При этом пункты, ответственные за величину изучаемых деформаций, закреплены непосредственно на компонентах конструкции гидроузла, а опорные пункты, относительно которых определяются деформации и смещения, размещены на окружающей территории за пределами электростанции. Полученные результаты исследований свидетельствуют о том, что разрешающая способность использованных комплексных методов соответствует нескольким миллиметрам как в плановой плоскости, так и по высоте.

При выполнении геодезических работ на таких крупных инженерных сооружениях, как современные линейные ускорители заряженных частиц, основные особенности связаны с тем, что замаркированные пункты располагаются практически на одной прямой.

При использовании наземных методов, основанных на измерении углов и расстояний, возникает необходимость в организации дополнительных пунктов с целью улучшения геометрии сети, что неизбежно приводит к неоправданным дополнительным технико-экономическим затратам и другим осложнениям. В отличии от наземных методов спутниковые методы не столь критичны к геометрии расположения пунктов и оказываются вполне пригодными для обеспечения требуемой точности координатных определений на пунктах, расположенных вдоль прямолинейной трассы.

На ускорителях рассматриваемого типа в местах стыковки необходимо обеспечить миллиметровый уровень точности как в плане, так и по высоте. Для удовлетворения столь высоких требований так же, как и в предыдущем случае,

возникает необходимость в комплексном использовании наземных и спутниковых технических средств. На основе анализа спутниковых измерений на упомянутом ускорителе в Стэнфорде установлено, что в горизонтальной плоскости размеры больших полуосей эллипсов стандартных уклонений не превышают 3 мм. Для оценки точности вертикального компонента было выполнено сравнение разностей высот над выбранным референц-эллипсоидом (что характерно для спутниковых измерений) с разностями нивелирных высот. Полученное расхождение оказалось равным 5 мм, что объясняется недостаточно строгим учетом наклона поверхности квазигеоида.

Для выверки створности установки элементов конструкции линейного ускорителя была применена створная лазерная система, позволяющая определять уклонения от оси линейного базиса, имеющего длину около 3 км, с точностью лучше, чем 0,1 мм. Использование для этих целей векторных решений, основанных на применении GPS, обеспечило расхождения, не превышающие  $\pm 1$  мм.

Круг задач, решаемых в прикладной геодезии с применением спутниковых технологий, не ограничивается приведенными выше примерами. Об этом свидетельствуют многочисленные публикации, посвященные затронутым вопросам.

Характерная особенность решения задач, относящихся к морской геодезии и базирующихся на использовании спутниковых технологий, состоит в том, что в отличии от задач, связанных с судовождением, местоположения специализированных плавсредств определяются на более высоком уровне точности (единицы метров, а иногда и десятые доли метров). При этом все измерения выполняют в реальном масштабе времени, а получаемые результаты согласовывают с другими техническими средствами, используемыми для определения тех величин, которые, в конечном счете, интересуют потребителей.

Возможные области применения спутниковых методов в морской геодезии принято разделять на две условные группы, исходя из требований, предъявляемых к уровню точности.

К первой группе, для которой требования к уровню точности ограничиваются несколькими метрами, могут быть отнесены такие сферы применения, как:

- промерные работы на акваториях гаваней, в прибрежных водах ина внутренних водоемах;

- картирование морского дна в территориальных зонах экономического развития или в научных целях;

- определение мест нахождения тех или иных подводных датчиков и соответствующих технических средств, используемых при морских изысканиях полезных ископаемых;

- выполнение гидрографических работ;

- проведение точных гравиметрических и сейсмических съемок. При решении перечисленных задач преимущественное распространение

получил дифференциальный метод спутниковых измерений, базирующийся на использовании кодовых сигналов. При таком режиме работы референцная станция располагается, как правило, на берегу в точке с известными координатами, а мобильная станция на борту используемого плавсредства. Для реализации дифференциального режима измерений поправки, определяемые на референцной станции, передаются по радиоканалу на бортовую мобильную станцию, где и производятся оперативные вычисления уточненного местоположения плавсредства. Отмеченные поправки представляют собой, как правило, поправки к измеренным до соответствующих спутников расстояниям, а не поправки к координатам референцной станции. Такой подход позволяет оперировать с информацией, относящейся к одним и тем же спутникам, наблюдаемым с референцной и мобильной станций. Для иллюстрации на рис.8.4 отображен принцип организации дифференциального режима работы спутниковой аппаратуры потребителей.

Передача дальномерных поправок с референцной станции на мобильную осуществляется с использованием стандартизированного формата, разработанного Радиотехническим комитетом морской службы (RTCM). Этот формат предусматривает возможность передачи по радиоканалу достаточно широкого набора данных, в том числе и приведенных на рис.8.4 дальномерных поправок.

В качестве референцных станций при решении задач морской геодезии могут быть использованы также и постоянно действующие радиомаяки, основанные на применении спутниковых систем типа GPS или ГЛОНАСС.

Ко второй группе, охватывающей области применения спутниковых технологий в морской геодезии, которые требуют обеспечения наиболее высокого уровня точности, могут быть отнесены:

- работы, связанные с обслуживанием береговых инженерных сооружений;
- контроль за положением расположенных на морской поверхности платформ, используемых при проведении работ, связанных с добычей нефти, газа и других полезных ископаемых;
- управление драгами, ведущими дноочистительные работы на акваториях гаваней, в устьях рек и на других видах водоемов;
- изучение геодинамических процессов на акваториях морей и океанов.

Обеспечение требуемого высокого уровня точности на таких видах работ достигается, как правило, за счет использования фазовых методов спутниковых измерений, которые рационально сочетаются с псевдодальномерными (кодовыми) методами. Основная трудность реализации таких комбинированных методов сводится к необходимости надежного и оперативного разрешения неоднозначностей характерных для фазовых измерений в условиях установки мобильной станции на движущемся объекте. Для решения отмеченной проблемы в последние годы разработаны достаточно эффективные оперативные методы, базирующиеся на рациональном совместном использовании фазовых и кодовых измерений.

Наряду с описанной выше проблемой при выполнении характерных для морской геодезии работ приходится учитывать и тот факт, что плавсредство, на котором устанавливается мобильная станция, может подвергаться из-за волнений морской поверхности разного рода разворотам и качкам, что, в свою очередь, приводит к непредсказуемым изменениям в пространстве замаркированной точки отсчета. Для учета таких изменений используют модернизированные методы спутниковых измерений, позволяющие определять азимутальные положения судна, а также его продольные и поперечные качки. Один из подходов к решению такой задачи состоит в использовании спутниковых приемников с несколькими разнесенными на небольшие расстояния антенными системами. Антенны могут располагаться по треугольнику, вершина которого находится в носовой части судна, а основание - поперек его кормовой части. Проведенные в этой области исследования свидетельствуют о том, что упомянутые подходы позволяют определять ориентировку положения судна с точностью около  $\pm 1^\circ$ , а продольную и поперечную качку - на уровне около  $\pm 0,25$  мрад.

Одна из дополнительных задач, характерная для морской геодезии, состоит в необходимости разработки метода пересчета положения точек, ответственных за местоположение судна, к тем исходным точкам, от которых производятся измерения другими техническими средствами (как, например, промерные измерения глубин, выполняемые с помощью эхолотов или гидролокаторов бокового обзора) [3.с 220].

## **1.4 ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ СПУТНИКОВЫХ МЕТОДОВ В ГЕОДЕЗИИ И НАВИГАЦИИ**

Прогресс в развитии высокоточного координатно-временного обеспечения (ВКВО) в последние десятилетия во многом связан с использованием глобальных навигационных спутниковых систем.

Применение методов космической геодезии позволило создавать так называемые спутниковые геодезические сети, что стало важным шагом в направлении повышения точности координатновременного и навигационного обеспечения (КВНО).

Спутниковые (пространственные) геодезические сети принято выделять в противовес классическим (плановым, высотным, планово-высотным). Классические сети создавались методами астрономических определений, полигонометрии, триангуляции, трилатерации, геометрического и тригонометрического нивелирования.

Спутниковые – методами космической геодезии, в частности, с помощью таких ГНСС, как GPS и ГЛОНАСС. Современные государственные геодезические сети трех уровней (фундаментальная астрономо-геодезическая сеть – ФАГС, высокоточная геодезическая сеть – ВГС, спутниковая геодезическая сеть первого класса – СГС-1) являются пространственными (спутниковыми) сетями. Наиболее важное отличие спутниковых геодезических сетей от классических заключается не только в способе их создания, но и в их точности и однородности.

Спутниковая сеть – однородное построение в трехмерном пространстве, а классическая планово-высотная сеть – это совмещение двух разнородных геодезических построений разной точности – двумерного планового и одномерного высотного. Для пунктов классических сетей плановое положение определено относительно референц-эллипсоида, а высотное – относительно квазигеоида (аппроксимации уровенной поверхности поля силы тяжести Земли, проходящей через условное начало счета высот – «нуль» Балтийского футштока). Координаты пунктов спутниковой сети определяются непосредственно в земной геоцентрической системе отсчета. Поэтому классические и спутниковые геодезические сети имеют качественное различие, не связанное с тем, установлено ли на их пунктах какое-либо оборудование. В то же время, принято разделять активные и пассивные наземные сети.

В пассивных геодезических сетях пункты выступают лишь в роли физических Вестник СГУГиТ, Том 23, № 1, 2018 8 носителей координат, а пункты активных сетей оснащаются автоматическим измерительным оборудованием. Активные сети имеют широкий спектр назначений, одним из которых является реализация исходной координатной основы при выполнении геодезических работ. Типичный пример активных сетей широкого применения – сети постоянно действующих базовых станций ГНСС. В настоящее время в России существует более тысячи постоянно действующих БС, принадлежащих к различным активным сетям. Значительная часть из них была создана в течение последних 20 лет в условиях недостаточно качественного нормативно-технического и правового регулирования со стороны государства. Сейчас вся совокупность сетей БС представляет собой подобие лоскутного одеяла, различные фрагменты которого создавались в разное время различными государственными и частными организациями в соответствии с их собственными представлениями о том, как это лучше делать [4].

Качество функционирования большинства БС зависит только от их собственников, что неприемлемо для выстраивания на базе БС спутниковых геодезических сетей. В последнее время наметилась тенденция к объединению этих станций в рамках таких систем, как HIVE. Пока объединение идет в большей мере на уровне обмена данными, однако это является лишь первым этапом. Дальнейшее развитие единой системы координатно-временного и навигационного обеспечения России связано с интеграцией БС в единую геодезическую сеть и ее уравниванием. Последнее крайне важно, так как именно в результате уравнивания геодезическая сеть становится полноценной целостной системой.

Под уравниванием в геодезии понимается согласование на основе статистических методов всей доступной априорной информации и результатов геодезических измерений, относящихся к геодезической сети, результатом чего является каталог координат и скоростей пунктов и оценка их точности. Идеальным вариантом достижения наивысшей точности сети была бы

поэтапная интеграция определенной части российских БС в Международную земную отсчетную основу International Terrestrial Reference Frame (ITRF). Однако это сопряжено с рядом сложностей правового, технического и организационного характера, рассмотренных в данной статье. Преодолеть эти сложности, на наш взгляд, возможно лишь совместными усилиями государственных органов власти, научного и профессионального сообщества, в том числе самих операторов сетей БС. Базовые станции России и ITRF: современное состояние На основе информации о различных сетях БС ГНСС, расположенных на территории России, включая станции ФАГС, Международной ГНСС.

Расположение постоянно действующих базовых станций Одной из проблем сегодня является то, что координаты БС на территории России определены в разных координатных системах отсчета, с разной точностью, на разные (зачастую не известные) эпохи. Согласно определению в ст. 3 Федерального закона № 431-ФЗ «геодезическая сеть – совокупность геодезических пунктов, используемых в целях установления и (или) распространения предусмотренных настоящим Федеральным законом систем координат». По сути, существующая совокупность постоянно действующих БС ГНСС геодезической сетью не является, так как она никогда не уравнивалась в единой системе координат [1].

Создание на основе БС высокоточной координатной основы является на сегодняшний день одной из наиболее важных задач, связанных с развитием КВНО в Российской Федерации. Координатная основа (реализация системы координат) – более широкое понятие по отношению к геодезической сети. Это понятие включает систему координат (ее декларативное описание), совокупность физических носителей координат (геодезических пунктов) и модель движения пунктов (в виде каталога координат и скоростей).

Очевидная выгода от интеграции сетей БС заключается в возможности работать в единой высокоточной реализации системы координат на всей территории страны, не заботясь о том, от какой БС получены данные. Кроме

того, такая единая геодезическая сеть должна стать источником информации о движении блоков земной коры, что необходимо для обеспечения высокой точности взаимосвязи между кинематическими отсчетными основами (ITRF, ПЗ-90.11, WGS84, ГСК-2011), в которых точки земной поверхности движутся, и статическими (СК-42, СК-95), в которых земная поверхность считается неподвижной. К статическим можно отнести также реализации местных систем координат, необходимых для ведения кадастра, генеральных планов городов и т. д. Обеспечение высокой точности преобразования между кинематическими и статическими реализациями систем координат на всей территории России является важным условием практического внедрения передового метода высокоточного автономного местоопределения (ВАМО, англ. – Precise Point Positioning, PPP).

Интеграция максимального количества БС на территории России в сеть ITRF выгодна по следующим причинам. Во-первых, это дало бы профессиональному сообществу более широкий доступ к наиболее точной наземной координатной основе для выполнения геодезических работ. Во-вторых, это упростило бы процесс и повысило точность установления связи будущих государственных отсчетных основ России с ITRF. В-третьих, большее количество станций ITRF означало бы увеличение объема и пространственного разрешения данных, собранных на территории страны, используемых международным научным сообществом для уточнения геофизических моделей и других информационных продуктов, которые могут применяться в интересах российских пользователей. В частности, это способствовало бы повышению точности моделирования состояния ионосферы, тропосферы и движения блоков земной коры для территории России.

Технические возможности интеграции российских базовых станций в ITRF Требования, предъявляемые к станциям IGS, непрерывно повышаются. Несмотря на то, что количество БС в России за последние годы многократно возросло, наш вклад в ITRF постепенно уменьшается. Если в составе координационной сети Геодезия и маркшейдерия 11 натной основы IGS08 российских станций было

12, в новейшей координатной основе IGS14 – всего 8. Некоторые ранее включенные в сеть пункты современным требованиям уже не соответствуют. Например, один из пунктов, не вошедших в IGS14, – NVSK (Ключи, Новосибирск) – показан на рис. В 2006 году на нем была обновлена аппаратура, однако при современных требованиях к установке антенн он не смог бы войти в сеть IGS.

Антenna станции IGS NSKV С одной стороны, соответствие российских станций требованиям, предъявляемым IGS [ позволило бы ожидать от них наивысшего качества и точности результатов измерений, а также стабильности положения пунктов. С другой стороны, современный список требований является избыточным и подавляющее число российских БС ему не соответствует. Например, в требованиях IGS указано, что оператором станции должна быть геодезическая служба, космическое агентство, научно-исследовательский институт или подобная организация, действующая в общественных интересах.

В России операторами значительной части БС являются коммерческие структуры. Кроме того, установка антенн на сооружениях и крышах зданий, согласно действующим требованиям, допускается лишь в исключительных случаях, которые должны оговариваться предварительно с центральным бюро IGS.

В России подавляющее число БС установлено на зданиях, так как зачастую только так возможно обеспечить их сохранность. Эти обстоятельства делают нереалистичным интеграцию большей части российских БС в сеть IGS/ITRF в обозримом будущем. В то же время, интеграция в ITRF и соответствие по уровню точности должны быть ориентирами в развитии отечественной координатной [5. с 250].

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Свободный сайт Энциклопедия Википедия[Электронный ресурс] URL:<https://ru.wikipedia.org/wiki> (дата обращения 14.02.2025).
2. . Павлов, Н.А. Геодезия: история и современность / Н.А. Павлов. – Москва: Научный мир, 2023. – 180 с. – (Научные исследования). ISBN 978-5-89355-448-1. Текст: электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. – URL:<https://urait.ru/btcde/893894> (дата обращения 14.02.2025).
3. Сидоров, А.Р. Геодезия: практический курс / А.Р. Сидоров. – Екатеринбург: УрФУ, 2021. – 220с.- ( Профессиональное образование ) ISBN 978-5-7996-0950-6. Текст: электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. – URL: <https://urait.ru/btcde/469428> (дата обращения 15.02.2025).
4. Официальный сайт Хабр [Электронный ресурс]URL:<https://habr.com/ru/articles/235283/>(дата обращения 15.02.2025).
5. Макаров, К.Н. Инженерная геодезия: учебник для вузов / К.Н. Макаров. – 3-е изд., переработ. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2024. – 250 с. – (Высшее образование). ISBN 978-5-534-17493-9. – Текст: электронный // Образовательная платформа 9 Юрайт [сайт]. – URL: <https://urait.ru/btcde/533194> (дата обращения 16.02.2025).