

На правах рукописи

РУДНИЦКАЯ НАДЕЖДА ИЛЬИНИЧНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КООРДИНАТНОЙ ОСНОВЫ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

Специальность 25.00.32 – Геодезия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК)» и в Белорусском Республиканском унитарном предприятии аэрокосмических методов в геодезии «Белаэрокосмогеодезия».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
кафедры высшей геодезии МИИГАиК
Лебедев Святослав Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой высшей математики МИИГАиК
Нейман Юрий Михайлович

кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой
инженерной геодезии и аэрофотогеодезии
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
профессионального образования
«Московская государственная академия
коммунального хозяйства и строительства»
Писаренко Владимир Кондратьевич

Ведущая организация: ФГУП Центральный научно-исследовательский
институт геодезии, аэрофотосъемки и картографии
(ЦНИИГАиК) им. Красовского,
гор. Москва

Защита состоится «19» апреля 2012 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета В.212.143.03 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК)» по адресу: 105064, Москва К-64, Гороховский переулок, д. 4, МИИГАиК, зал заседания Ученого Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского Государственного Университета Геодезии и Картографии.

Автореферат разослан «12» марта 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Климков Юрий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В соответствии с межгосударственными договоренностями между Российской Федерацией и Республикой Беларусь о едином координатном пространстве Указом Президента Республики Беларусь № 200 от 23 апреля 2007 года «О некоторых вопросах в области геодезии и картографии» установлено, что с 1 января 2010 года при выполнении геодезических и картографических работ на территории Республики Беларусь применяется государственная система геодезических координат 1995 года (СК-95); для вычисления геодезических координат применяется эллипсоид Красовского со следующими параметрами: большая полуось a – 6378245 м, малая полуось b – 6356863,019 м, сжатие α – 1:298,3 и с соответствующими значениями элементов внутреннего ориентирования относительно системы координат ПЗ-90.

К моменту принятия Указа были созданы пункт ФАГС Минск и ВГС, которые изначально рассматривались как составная часть единой спутниковой геодезической сети Республики Беларусь и Российской Федерации, СГС-1 была построена на трети территории Республики Беларусь. Оценка точности определения координат пунктов ФАГС и ВГС и результаты предварительного уравнивания созданных фрагментов СГС-1 в ITRS показали, что точность спутниковых геодезических сетей выше, чем точность астрономо-геодезической сети, реализующей СК-95.

Таким образом, стал очевиден конфликт: введение СК-95, полученной в результате уравнивания астрономо-геодезической сети, привело бы к потере точности и многомерности спутниковых геодезических сетей высшего ранга (ФАГС и ВГС) и СГС-1, и не позволило бы в будущем реализовать все возможности спутниковых технологий для решения фундаментальных и прикладных задач геодезии.

Необходимо было найти научно-техническое решение реализации СК-95 на территории Республики Беларусь, которое обеспечило бы возможность отнесения полученной координатной основы к СК-95, и в то же время обеспечивало сохранение точности государственной спутниковой геодезической сети при вычислении координат пунктов в СК-95 с сохранением размерности новой координатной основы государства.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является поиск научно-технического решения создания на территории Республики Беларусь современной высокоточной координатной основы, обеспечивающей эффективное использование глобальных навигационных спутниковых систем (Global Navigation Satellite System - GNSS) и других современных технологий, и сохранения единого координатного пространства с Российской Федерацией.

Цели и задачи

Цель диссертационной работы заключается в обосновании принципа реализации референцной системы координат, как производной от ITRS, близкой к СК-95 в пределах ее заявленной точности, в реализации этого принципа по предложенной в диссертации методике; в оценке полученных результатов по установлению новой государственной системы геодезических координат в Республике Беларусь.

Для реализации цели диссертационной работы решены основные задачи, которые включали в себя:

1) выбор основной системы отсчета для Республики Беларусь при создании опорной геодезической сети с использованием спутниковых технологий;

2) многовариантное уравнивание фрагмента СГС-1 с использованием различных наборов координат исходных пунктов с целью эмпирической проверки возможности реализации СК-95 без потери точности и трехмерности спутниковой сети через локальные параметры связи ITRS – СК-95 для территории Республики Беларусь;

3) оценку АГС на территории Республики Беларусь в отношении ее внутренней целостности, соответствия измерительной информации первоисточникам, отсутствия односторонних направлений в сети триангуляции и качества геодезических измерений;

4) оценку возможности использования высот квазигеоида над эллипсоидом Красовского в СК-95, полученных ЦНИИГАиК в 1993 году, для вычисления геодезических высот пунктов АГС в СК-95;

5) оценку возможности использования модели EGM2008 для получения высот квазигеоида над эллипсоидом Красовского для территории Республики Беларусь;

6) определение единых локальных параметров связи ITRS (ITRF2005) - СК-95 по совмещенным пунктам АГС и СГС-1 для территории Республики Беларусь.

В результате выполненных исследований была разработана методика реализации СК-95 на территории Республики Беларусь, вычислены единые для территории государства локальные параметры связи ITRS (ITRF2005) – СК-95. Точность полученных параметров - на уровне заявленной точности СК-95, что позволяет отнести полученную по ним координатную основу к СК-95 Республики Беларусь.

Научная новизна

Научная новизна заключается в использовании параметров связи ITRS (ITRF2005) – СК-95 Республики Беларусь как метода реализации референцной системы координат, производной от ITRS (ITRF), с сохранением точности и многомерности координатной основы, созданной с использованием GNSS.

Практическая значимость

Практическая ценность диссертационной работы заключается в том, что она выполнена в рамках решения задачи по введению новой государственной системы координат в Республике Беларусь. Реализация СК-95, как производной от ITRS, полностью осуществлена на практике. При этом решено несколько задач:

- создание современной координатной основы государства;
- сохранение единого координатного пространства с Российской Федерацией в пределах заявленной точности СК-95;
- обеспечение возможности интеграции Республики Беларусь в единое координатное пространство Европы и любое другое координатное пространство, созданное с использованием глобальных навигационных спутниковых систем;
- обеспечение развития спутниковых технологий по определению пространственного положения объектов, в том числе в режиме реального времени с использованием спутниковой системы точного позиционирования Республики Беларусь на основе сети постоянно действующих пунктов;
- созданы условия для повышения уровня координатного обеспечения территории Республики Беларусь за счет привлечения материалов, относящихся к созданным в МСК специальным геодезическим сетям.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Полученные соискателем научные результаты соответствуют п. 2 «Создание геодезических сетей различного назначения с использованием геодезических (наземных и космических), астрономических, гравиметрических и других методов измерений» и п. 7 «математическая обработка результатов измерений и информационное обеспечение топографо-геодезических работ» паспорта специальности 25.00.32 – Геодезия.

Основные результаты, выносимые на защиту

- методика реализации СК-95 на территории Республики Беларусь;
- обоснование необходимости принятия в качестве основной системы отсчета ITRS (ITRF);
- принцип реализации референцной системы координат, как производной от ITRS (ITRF) через локальные параметры связи, обеспечивающий сохранение единого координатного пространства Российской Федерации и Республики Беларусь в пределах заявленной точности СК-95.

Методика исследований

Методика исследований: анализ опыта решения подобных задач в Российской Федерации и других странах, теоретическое и экспериментальное обоснование основных положений разработанной методики.

Апробация работы

Апробация диссертационной работы выполнена в процессе реализации государственной системы геодезических координат 1995 года (СК-95) на территории Республики Беларусь. Все исследования выполнялись на действительной измерительной информации по построению ФАГС, ВГС, СГС-1 и АГС. За два года, прошедших со времени введения в действие СК-95 в Республике Беларусь, доказана высокая точность полученной координатной основы, обеспечивающей эффективное

применение спутниковых технологий для решения фундаментальных и прикладных задач геодезии.

Личный вклад соискателя: методика, выносимая на защиту, единые параметры связи ITRS (ITRF2005) – СК-95 Республики Беларусь и результаты исследований получены лично соискателем. Комплекс камеральных работ по оценке качества АГС Республики Беларусь и по ведению СК-95 выполнен под руководством и при личном участии соискателя.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения, приложений и библиографического списка. Работа изложена на 70 страницах, машинописного текста, содержит 6 таблиц, 16 рисунков, 2 приложения. Библиографический список включает 32 источника.

Особенностью данной работы является то, что она выполнена на очень большом объеме информации, подавляющая часть которой имеет гриф «секретно». Потому конкретная информация о координатах пунктов и параметрам связи не приводится.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, а также сформулированы цели и задачи.

Первая глава посвящена системам координат, их теоретическому определению и практической реализации.

Всегда следует различать теоретическое определение системы координат и ее практическую реализацию в виде совокупности закрепленных на физической поверхности Земли особым образом точек, которые являются носителями координат в этой системе отсчета. Практические реализации системы отсчета, основанные на одних и тех же исходных геодезических датах, могут иметь существенные различия. Это является следствием множества причин, в числе которых можно перечислить использование различных методов построения геодезических сетей и их математической обработки с использованием различных моделей.

Основным методом изучения поверхности Земли и методом создания опорных геодезических сетей долгие годы служил **астрономо-геодезический** метод. Для этого метода характерно раздельное определение плановых координат и высоты.

Опорные геодезические сети создавались на территории отдельных государств, содружеств государств или целых континентов. Но так как они не могли быть построены на поверхности мирового океана, то эти сети носили локальный фрагментарный характер для Земли в целом. Построение сетей растягивалось на десятилетия. При окончательной математической обработке использовались астрономические, геодезические и гравиметрические измерения, выполненные в различное время, которые трудно отнести к какой-то одной эпохе реализации. Точность опорной геодезической сети, созданной астрономо-геодезическим методом,

была недостаточной, чтобы обеспечить решение многих геодинимических задач, так как была сопоставима с величинами изучаемых явлений.

Принципиальное отличие между методами классической и **космической геодезии** состоит в том, что в классической геодезии измерения производятся относительно отвесной линии. В основе спутниковых методов лежит геометрический принцип, при котором измеряются расстояния, независимые от систем координат. Но носители координат в GNSS движутся в реальном гравитационном поле Земли, и поэтому в космических технологиях объединены и геометрический, и физический принципы.

Использование GNSS имеет существенные преимущества по сравнению с методами традиционной геодезии. Это:

- создание опорных геодезических сетей субсантиметровой точности при любых расстояниях между пунктами геодезической сети;
- определение пространственного положения объекта с одновременным определением плановых координат и высоты в режиме покоя, в движении, а также в режиме реального времени;
- высокая степень автоматизации и возможность выполнения непрерывных наблюдений, что позволяет осуществлять мониторинг деформаций сооружений и земной коры;
- осуществление детальной гравиметрической съемки материков и океанов Земли из космоса в единой системе координат;
- определение пространственного положения объектов в любое время суток и почти при любых погодных условиях без необходимости обеспечения прямой оптической видимости;
- осуществление реализации системы отсчета на определенную эпоху.

Теоретическое определение современной Земной системы отсчета предусматривает использование внутренне согласованной системы фундаментальных постоянных, определение ее связи с Землей (начало отсчета и ориентацию).

Система фундаментальных постоянных включает в себя угловую скорость вращения Земли и, например, геоцентрическую гравитационную постоянную с учетом атмосферы, параметры эллипсоида Нормальной Земли.

XXIV Генеральной Ассамблеей Международного Союза геодезии и геофизики (International Union of Geodesy and Geophysics - IUGG), прошедшей в 2007 г. в Перудже (Италия) для всех наук о Земле в настоящее время рекомендована ITRS (The International Terrestrial Reference System).

Ответственной за установление Международной Земной системы отсчета ITRS (International Terrestrial Reference System) в соответствии с принятой IUGG в Вене в 1991 г. Резолюцией № 2 в настоящее время является Международная служба вращения Земли и отсчетных систем IERS (International Earth Rotation and Reference System Service).

Исходные постулаты ITRS полностью удовлетворяют следующим условиям:

- начало системы отсчета относится к центру масс всей Земли, включая океаны и атмосферу (начало системы отсчета определяется динамическими методами космической геодезии: центр масс Земли совпадает с центром круговых орбит);
- единицей измерения длины является метр (масштаб выбран в соответствии с гравитационной постоянной Земли, скоростью света и релятивистской моделью);
- начальная ориентировка осей задана по данным Международного Бюро Времени на эпоху 1984.0;
- временная эволюция ориентировки такова, что отсчетная основа не имеет остаточного вращения по отношению к горизонтальному движению тектонических плит по всей Земле.

За начальный (нулевой) в ITRS принят отсчетный меридиан IERS, который соответствует Условному Земному полюсу (Conventional Terrestrial Pole), относящемуся к эпохе 1984 года.

ITRS реализуется Международной общеземной отсчетной основой ITRF, которая включает в себя набор трехмерных прямоугольных координат станций IGS вместе со скоростями их изменения и полной ковариационной матрицей. Современная процедура предполагает комбинированное решение с использованием технологий космической геодезии: VLBI, SLR, DORIS и GPS. В настоящее время известно 12 версий ITRF, относящихся к конкретной временной эпохе, последняя реализация - ITRF2008. Внутренняя согласованность ITRS, поддерживаемой IERS, на уровне нескольких сантиметров. На момент выполнения исследований по выбору основной системы отсчета при создании спутниковой опорной геодезической сети последней реализацией ITRS была ITRF2005.

Изучение мирового опыта по установлению современных национальных систем координат показывает, что именно ITRS принимается в качестве исходной, а национальные референсные системы координат являются ее реализацией на определенную эпоху, как например, ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989), которая принята в качестве единой системы отсчета в пределах географических границ Европы, - реализация ITRS на эпоху 1989 года. Опорные сети, созданные с использованием GNSS в соответствии с международными стандартами, рассматриваются как сгущение ITRF, и являются частью единой мировой геодезической сети, что создает предпосылки к качественно новому уровню решения фундаментальных задач геодезии и создания согласованной геопространственной информации в глобальном масштабе.

Теоретические принципы установления принятых в глобальных навигационных спутниковых системах GPS и ГЛОНАСС в качестве систем отсчета соответственно WGS-84 и ПЗ-90 те же самые, что и для ITRS. И если имеются какие-то не нулевые значения параметров связи, то это следствие разной точности реализации. Но и WGS-84, и ПЗ-90 в своих последних реализациях приближаются к ITRF. Например,

WGS-84 в последней своей реализации на неделю GPS G1150 совпадает с ITRF2000 на уровне 1-2 см. ПЗ-90.02 имеет по отношению к ITRF2000 только линейные смещения начала (+0,36 м по оси X, +0,08 м по оси Y, +0,18 м по оси Z). Существовавшие в реализации ПЗ-90 Космической геодезической сетью (КГС) масштабные искажения и разворот осей исчезли.

Система геодезических координат 1995 года (СК-95) получена в 1995 году в результате совместного уравнивания Космической геодезической сети (КГС), Доплеровской геодезической сети (ДГС) и астрономо-геодезической сети (АГС) Советского Союза и реализуется совокупностью пунктов АГС, построенной в соответствии с Основными положениями 1954-1961 годов методами традиционной геодезии. Связь СК-95 и ПЗ-90 определяется только линейными элементами смещения начала отсчета. Точность взаимного планового положения пунктов характеризуется среднеквадратическими ошибками 0,02-0,04 м. По результатам выполненных работ по построению ФАГС, ВГС и СГС-1 внутренние деформации СК-95 оцениваются на уровне 3-5 см для смежных пунктов АГС.

Реалии сегодняшнего дня таковы, что СК-95 не может в полной мере удовлетворять современным требованиям к координатной основе по многим параметрам, а именно:

1) заявленная точность реализации СК-95 ниже, чем точность реализации ITRS пунктами ФАГС, ВГС и СГС-1, вследствие чего точность спутниковых сетей будет утеряна при вычислении координат пунктов сетей в СК-95;

2) СК-95 является двухмерной системой координат. Исторически сложилось так, что плановые координаты и высота точки поверхности Земли определялись с использованием различных инструментов в разных системах координат и зачастую относились к разным временным эпохам. Две геодезические системы отсчета: система плановых координат и система высот, как и реализующие их плановые и высотные геодезические сети, развивались независимо друг от друга. Таким образом, значительное число геодезических пунктов, реализующих СК-95, не имеют ни нормальных, ни геодезических высот такого же порядка точности, что и плановые координаты, а пункты нивелирных сетей не имеют плановых геодезических координат. При использовании спутниковых методов в геодезии пространственное представление положений пунктов является стандартным, а во многих приложениях - обязательным;

3) требования, предъявляемые к современной координатной основе, устанавливают необходимость отнесения ее к конкретной временной эпохе. АГС, реализующая СК-95, строилась в течение многих десятилетий (например, на территории Республики Беларусь с 1912 по 1991 год), поэтому отнести реализацию СК-95 к какой-то эпохе состояния физической поверхности Земли и ее гравитационного поля достаточно проблематично;

4) СК-95 согласована с геоцентрической системой координат ПЗ-90, реализованной пунктами КГС. Связь же СК-95 и ПЗ-90.02 определяется не только линейными элементами смещения начала отсчета, но и угловыми элементами разворота осей и масштабом, к тому же, система координат ПЗ-90.02 и по сей день находится в стадии уточнения.

Выполненные исследования по выбору системы отсчета при создании современной высокоточной трехмерной координатной основы Республики Беларусь показали необходимость реализации ITRS пунктами ФАГС и ВГС и СГС-1 на эпоху, близкую по времени к введению СК-95 в качестве государственной референцной системы координат. В основание всей схемы реализации СК-95 на территории Республики Беларусь было положено определение координат пунктов ФАГС и ВГС и СГС-1 в ITRS с жесткой привязкой к ближайшим пунктам IGS, включенным в ITRF2005 в качестве опорных «фиксированных» пунктов, закрепляющих ITRS. Выполненные исследования показали также, что определение координат пунктов сети высшего ранга (ФАГС и ВГС) необходимо выполнить с соблюдением международных стандартов в отношении продолжительности кампании, характеристик спутниковой геодезической аппаратуры, использования абсолютных калибровок антенн, финальных продуктов IGS и соответствующего программного обеспечения. Это необходимо для того, чтобы созданную сеть высшего ранга (zero order) можно было бы при прохождении соответствующих процедур рассматривать как сгущение ITRF. Международные стандарты в отношении сетей нулевого ранга не противоречат требованиям, изложенным в Основных положениях о государственной геодезической сети 2006 года (ГОСТ 1653-2006, РБ, Минск).

Вторая глава диссертационной работы посвящена экспериментальному обоснованию методики реализации СК-95 Республики Беларусь.

Необходимость выбора ITRS в качестве основной системы отсчета при создании четырехмерной высокоточной координатной основы с использованием GNSS не исключала выполнение основной задачи по введению в качестве государственной системы геодезических координат для выполнения картографических и геодезических работ системы координат 1995 года (СК-95).

В качестве реализации СК-95 Российская Федерация передала Республике Беларусь:

- координаты пунктов АГС в СК-95 в проекции Гаусса-Крюгера в 6-ти градусной зоне;
- геодезические высоты над эллипсоидом Красовского и высоты квазигеоида над эллипсоидом Красовского в СК-95;
- «Программный комплекс для автономного уравнивания АГС большой протяженности. Москва, ГУГК» и сопряженную с программным обеспечением базу данных геодезических измерений по построению АГС методами традиционной геодезии.

Эта информация была использована для исследований, результаты которых легли в обоснование методики реализации СК-95 на территории РБ.

Поиск основного «инструмента» реализации СК-95 с сохранением точности и многомерности спутниковой геодезической сети включал в себя:

- многовариантное уравнивание фрагмента СГС-1 с использованием различных наборов координат исходных пунктов с целью эмпирической проверки возможности реализации СК-95 без потери точности спутниковой сети и ее трехмерности через локальные параметры связи ITRS – СК-95 для территории Республики Беларусь;

- оценку АГС на территории Республики Беларусь в отношении ее внутренней целостности, геометрии, соответствия измерительной информации первоисточникам, отсутствия односторонних направлений в сети триангуляции и качества геодезических измерений.

Уравнивание фрагмента СГС-1 выполнено в 4-х вариантах:

- 1) уравнивание фрагмента СГС-1 как свободной сети по внутренней сходимости для оценки качества векторов по базовым линиям сети;

- 2) уравнивание фрагмента СГС-1 в СК-42;

- 3) уравнивание фрагмента СГС-1 в СК-95. В качестве исходных приняты координаты совмещенных пунктов АГС и СГС-1 в проекции Гаусса-Крюгера, высота - нормальная в Балтийской системе высот 1977 года. Значения координат соответствовали координатам, переданным Республике Беларусь Российской Федерацией в качестве реализации СК-95. При уравнивании использовалась модель EGM96.

- 4) уравнивание фрагмента СГС-1 в СК-95. В качестве исходных приняты:

- а) трехмерные координаты совмещенных пунктов АГС и СГС-1 X, Y, Z , полученные трансформированием из ITRS в СК-95 по параметрам преобразования, опубликованным в Руководстве пользователя по выполнению работ в системе координат 1995 года (ГКИНП (ГНТА)–06-278-04, Москва, ЦНИИГАиК, 2004);

- б) координаты совмещенных пунктов АГС и СГС-1, полученные трансформированием из ITRS в СК-95 по параметрам преобразования, опубликованным в Руководстве пользователя по выполнению работ в системе координат 1995 года (ГКИНП (ГНТА)–06-278-04, Москва, ЦНИИГАиК, 2004), и перевычисленными на плоскость в проекции Гаусса-Крюгера. Высота - нормальная в Балтийской системе высот 1977 года. При уравнивании использовалась модель EGM96.

Результаты уравнивания приведены в таблице 1.

Уравнивание фрагмента СГС-1 в СК-42 носит чисто иллюстративный характер для отображения существующих деформаций.

Результаты многовариантного уравнивания фрагмента СГС-1

Вариант	Система координат	Средне-квадратические погрешности векторов (RMS) по результатам уравнивания, мм			Нормализованные RMS		
		N	E	U	N	E	U
1	Свободное уравнивание сети по внутренней сходимости	3,1	3,1	8,9	0,83	1,10	1,10
2	СК-42 x, y, H^y	67,9	49,5	76,0	16,22	17,44	9,89
3	СК-95 (по результатам уравнивания МАГП) x, y, H^y	23,7	18,9	85,7	4,32	4,85	8,87
4	а) СК-95 (трансформирование по приближенным параметрам преобразования WGS-84 –СК-95), X, Y, Z	3,3	3,3	8,5	0,83	1,11	0,99
	б) СК-95 (трансформирование по приближенным параметрам преобразования WGS-84 –СК-95 и перевычисление на плоскость в проекции Гаусса-Крюгера), x, y, H^y	4,0	4,1	85,7	0,79	1,11	8,87

Оценки векторов по базовым линиям сети, полученные в первом варианте при свободном уравнивании сети по внутренней сходимости, указывают на высокое качество фрагмента сети.

В третьем варианте, когда исходным пунктам присвоены значения координат в СК-95, переданные Республике Беларусь Российской Федерацией в качестве реализации СК-95, среднеквадратические погрешности плановых компонент векторов по результатам уравнивания превосходят по своей величине соответствующие значения, полученные в первом варианте в 6-8 раз. Это свидетельствует о том, что точность СК-95 ниже, чем точность спутниковой сети.

В четвертом варианте, когда координаты исходных пунктов получены трансформированием в СК-95 по единым параметрам, точность спутниковой сети не была утрачена. Это справедливо как в случае назначения координат в представлении X, Y, Z (4а), так и в преобразовании координат в координаты на плоскости в проекции Гаусса-Крюгера (4б).

На основании выполненных исследований был сделан вывод о том, что трансформирование координат пунктов спутниковой сети: ФАГС, ВГС и СГС-1 из

ITRS в СК-95 по единым для Республики Беларусь семи параметрам Гельмерта позволит сохранить точность и размерность спутниковой геодезической сети. Но значения параметров должны быть вычислены для территории Республики Беларусь, что потребует максимально возможного совмещения СГС-1 и АГС. Точность вычисленных параметров должна быть таковой, чтобы трансформированные по ним координаты совмещенных пунктов СГС-1 и АГС из ITRS в СК-95 отличались от значений, полученных по результатам уравнивания АГС 1995 года, в пределах заявленной точности СК-95. Только в этом случае полученную координатную основу можно отнести к СК-95 с оговоркой «СК-95 Республики Беларусь».

Анализ АГС был выполнен с целью априорной оценки результатов геодезических измерений по построению сети, чтобы оценить согласованность координат совмещенных пунктов СГС-1 и АГС, полученных трансформированием из ITRS по единым параметрам связи, и измерений в сети при последующем повторном уравнивании АГС.

При выполнении этого этапа исследований использовался программный комплекс для автономного уравнивания АГС большой протяженности (Москва, ГУГК) и сопряженная с ним База Данных геодезических измерений о построении АГС на территории РБ. Вся информация была проверена на соответствие первоисточникам, при обнаружении односторонних направлений в сети триангуляции отсутствующая информация вносилась в Базу Данных (за редким исключением она имела в архивных материалах). По завершении этого этапа работ была выполнена оценка точности угловых измерений по невязкам треугольников и полюсных условий, таблица 2.

Таблица 2

Оценка качества АГС Среднеквадратическая погрешность направления	По невязкам треугольников	По невязкам полюсных условий
1 класс	0.47" (342 треугольника)	0.60 " (138 полюсных условий)
2 класс	0.62" (6239 треугольников)	0.74" (7928 полюсных условий)
Из общего количества треугольников 1 и 2 класса – 6581 – только в 21 треугольнике получены недопустимые невязки, что составляет 0,3% от общего числа. Распределение положительных и отрицательных невязок треугольников и полюсных условий примерно равное.		

На основании полученных результатов исследования сделан вывод о высоком качестве АГС на территории Республики Беларусь, что позволило сделать оптимистичную оценку в отношении заявленной точности СК-95 и обоснованное предположение, что координаты совмещенных пунктов СГС-1 и АГС, вычисленные

трансформированием из ITRS по единым параметрам, не будут конфликтовать с измерениями в АГС.

Выполненные исследования легли в обоснование схемы реализации СК-95 на территории Республики Беларусь, включающей в себя:

- определение координат пункта ФАГС и пунктов ВГС в ITRS (ITRF2005) с жесткой привязкой к ближайшим опорным пунктам IGS;
- построение СГС-1 на всей территории страны с максимально возможным совмещением пунктов АГС и СГС-1;
- уравнивание СГС-1 единым блоком, с принятием в качестве исходных пунктов ФАГС и ВГС;
- вычисление параметров связи между ITRS (ITRF2005) и СК-95 по совмещенным пунктам АГС и СГС-1;
- трансформирование по единым параметрам координат пунктов СГС-1 из ITRS (ITRF2005) в СК-95;
- принятие координат совмещенных пунктов СГС-1 и АГС в качестве «жестких» при уравнивании триангуляции 1 и 2 классов Республики Беларусь;
- уравнивание геодезических сетей сгущения 3 и 4 класса с опорой на пункты АГС.

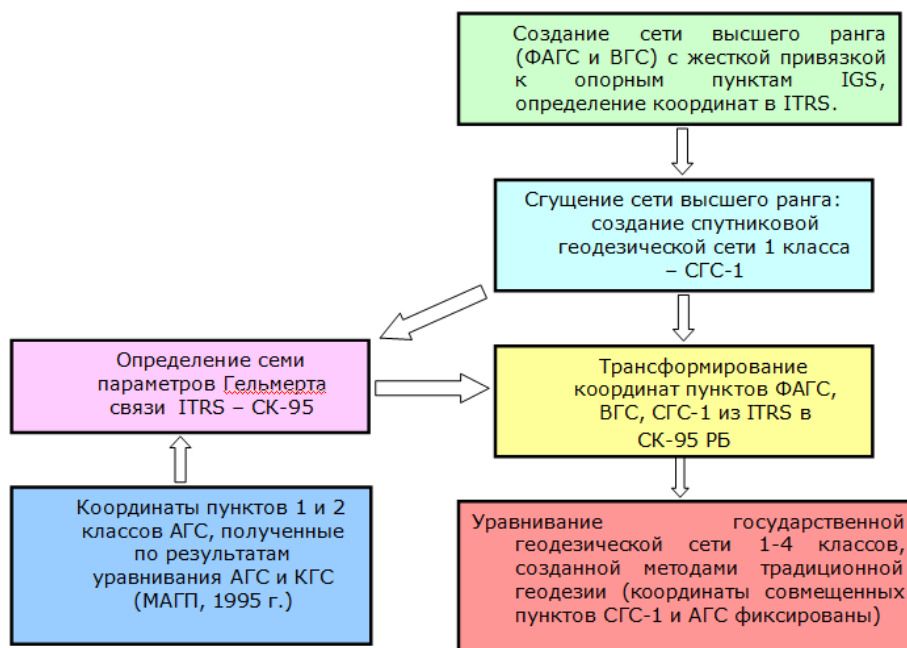


Рисунок 1 – Схема реализации СК-95 на территории Республики Беларусь

Эта схема обеспечивает:

- введение СК-95 с сохранением единого координатного пространства с Российской Федерацией в пределах заявленной точности СК-95;
- создание современной геодезической координатной основы высокой точности, реализующей на территории Республики Беларусь ITRS;

- сохранение точности и многомерности спутниковой геодезической сети всех классов при вычислении координат пунктов сети в СК-95;
- преемственность всей ранее накопленной геодезической информации по построению ГГС методами традиционной геодезии;
- интеграцию Республики Беларусь в единое координатное пространство Европы и любое другое координатное пространство, созданное с использованием GNSS;
- развитие спутниковых технологий по определению пространственного положения объектов на сантиметровом уровне точности, в том числе в режиме реального времени.

В предложенной соискателем схеме реализации СК-95 определение единых параметров связи ITRS-СК-95 для территории Республики Беларусь приобрело ключевое значение.

Третья глава посвящена практической реализации предложенной методики по введению СК-95 Республики Беларусь.

Исходной информацией для вычисления параметров связи ITRS (ITRF) – СК-95 для территории Республики Беларусь служили координаты одноименных пунктов в СК-95 и ITRS (ITRF2005).

Изначально пункт ФАГС Минск и девять пунктов ВГС были созданы как часть единой спутниковой сети Российской Федерации и Республики Беларусь. Первые определения координат пунктов относятся к 2001 году.

В соответствии с предложенной соискателем схемой в 2008 г. выполнены работы по повторному определению пространственного положения пунктов ФАГС и ВГС в ITRS (в реализации ITRF2005) с привязкой к девяти опорным пунктам IGS.

Вычисления выполнены с помощью программного обеспечения «BERNESE», версия 5.0, разработанного Астрономическим институтом Университета Берна (AIUB) на эпоху 23.04.2008. Продолжительность кампании по определению координат пункта ФАГС Минск составила 14 суток. При вычислениях координаты перечисленных пунктов IGS были ограничены, использованы абсолютные калибровки антенн, соответствующие ITRF2005, финальные продукты IGS: эфемериды, параметры вращения земли и поправки к часам спутников. Среднеквадратическая погрешность (RMS) вычисления координат пункта ФАГС Минск: 0.8 мм (N), 0.3 мм (E), 2.0мм (Up).

Координаты пунктов ВГС вычислены с ограничением координат опорных пунктов IGS и с ограничением координат пункта ФАГС Минск, так как кампания по вычислению координат пункта ФАГС по времени полностью перекрывала 5-ти суточную кампанию по определению пространственного положения пунктов ВГС Республики Беларусь в ITRS (ITRF2005). Среднеквадратическая погрешность (RMS) вычисления координат пунктов ВГС: 1.0 мм (N), 0.7 мм (E), 3.0мм (Up).

Среднеквадратическая погрешность взаимного положения пунктов ФАГС и ВГС - 3,1 мм. Среднеквадратическая погрешность определения координат по отношению к опорным пунктам IGS – 6,5 мм.

Координаты пунктов ФАГС и ВГС послужили исходными при уравнивании СГС-1 Республики Беларусь единым блоком. Уравнивание выполнено с помощью программного обеспечения «GeoLab», версия 2001.9.20., Microsearch Corporation, Canada. По результатам уравнивания получены следующие результаты:

- среднеквадратическая погрешность (RMS) определения планового положения пунктов: 2.2 мм (N), 1.6 мм (E). Из 817 пунктов СГС-1 лишь для 23 пунктов значение среднеквадратической погрешности определения планового положения равно или более 1 см, – 23 пункта;

- среднеквадратическая погрешность определения (RMS) высоты пунктов СГС-1 по результатам уравнивания: 4.2 мм (U). Количество пунктов, для которых погрешность определения высоты получена более 1 см, – 67 пунктов.

СГС-1 Республики Беларусь на 36% совмещена с АГС.

Таким образом, на территории Республики Беларусь геоцентрическая общеземная система отсчета в реализации координатной отсчетной основой ITRF2005, отнесенной к эпохе 23.04.2008, распространена с высокой степенью точности и закреплена пунктами ФАГС, ВГС и СГС-1.

В качестве реализации СК-95 Российская Федерация передала Республике Беларусь:

- информацию о координатах пунктов АГС в системах отсчета СК-42, СК-95 (в проекции Гаусса-Крюгера) и WGS-84 (в представлении X, Y, Z);

- информацию о высотах квазигеоида над эллипсоидом Красовского в СК-95, использовавшихся при пространственном уравнивании АГС, КГС (космической геодезической сети) и ДГС (доплеровской геодезической сети) для каждого пункта АГС;

Высоты квазигеоида получены по результатам астрономо-гравиметрического нивелирования, выполненного ЦНИИГАиК в 1993 году. Заявленная точность высот квазигеоида декларировалась на уровне ± 1 м. Все операции, связанные с преобразованием координат и вычислением параметров преобразования между системами координат, выполнялась с использованием программного обеспечения «Транскор», версия 2.0, CREDO и «Pinnacle», версия 1.0, Javad Positioning Systems, 1998.

Основная формула преобразования пространственных координат из системы «А» в систему «В», которая реализована в обоих программных продуктах:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B = (1+m) \begin{bmatrix} 1 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & +\omega_x \\ +\omega_y & -\omega_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_A + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где ΔX , ΔY , ΔZ (смещение начала одной системы координат относительно другой), m (масштаб), ω_x , ω_y , ω_z (углы разворота осей) - семь параметров преобразования Гельмерта. Так как в опубликованных параметрах связи ITRF1994 – ПЗ-90 значения углов разворота одноименных осей по отношению друг к другу малы, а связь СК-95 и ПЗ-90 определяется только линейными элементами смещения начала, то соискатель пришел к заключению, что использование этой упрощенной формулы в рамках поставленной задачи правомочно.

Вычисление прямоугольных декартовых координат пунктов в СК-95 выполнено по формулам:

$$\left. \begin{aligned} X &= (N + H) \cos B \cos L \\ Y &= (N + H) \cos B \sin L \\ Z &= [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$, $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}$, $H = H^r + \zeta$.

Геодезические координаты B и L перевычислены из плоских прямоугольных координат пунктов АГС в проекции Гаусса-Крюгера x , y , переданных Республике Беларусь Российской Федерацией. Как видно из приведенных выше формул, точность значений пространственных координат X , Y , Z напрямую зависит от точности значений высот квазигеоида при переходе от нормальной высоты к геодезической. Первоначально геодезическая высота вычислена как сумма нормальной высоты и высоты квазигеоида, использовавшейся при пространственном уравнивании АГС, КГС и ДГС.

При вычислении параметров преобразования между ITRS (спутниковая сеть РБ) - СК-95 (МАГП) были получены среднеквадратические остаточные не исключенные погрешности в координатах пунктов в представлении X , Y , Z : по $X = 0,38$ м, по $Y = 0,23$ м, по $Z = 0,58$ м.

При разложении остатков на план и высоту с помощью формул

$$\begin{bmatrix} E \\ N \\ U \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где

$$R = \begin{bmatrix} -\sin L & \cos L & 0 \\ -\sin B \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \\ \cos B \cos L & \cos B \sin L & \sin B \end{bmatrix}, \quad (4)$$

в представлении N , E , U среднеквадратические остаточные не исключенные погрешности составили: по $N = 0,05$ м, по $E = 0,04$ м, по $H = 0,7$ м.

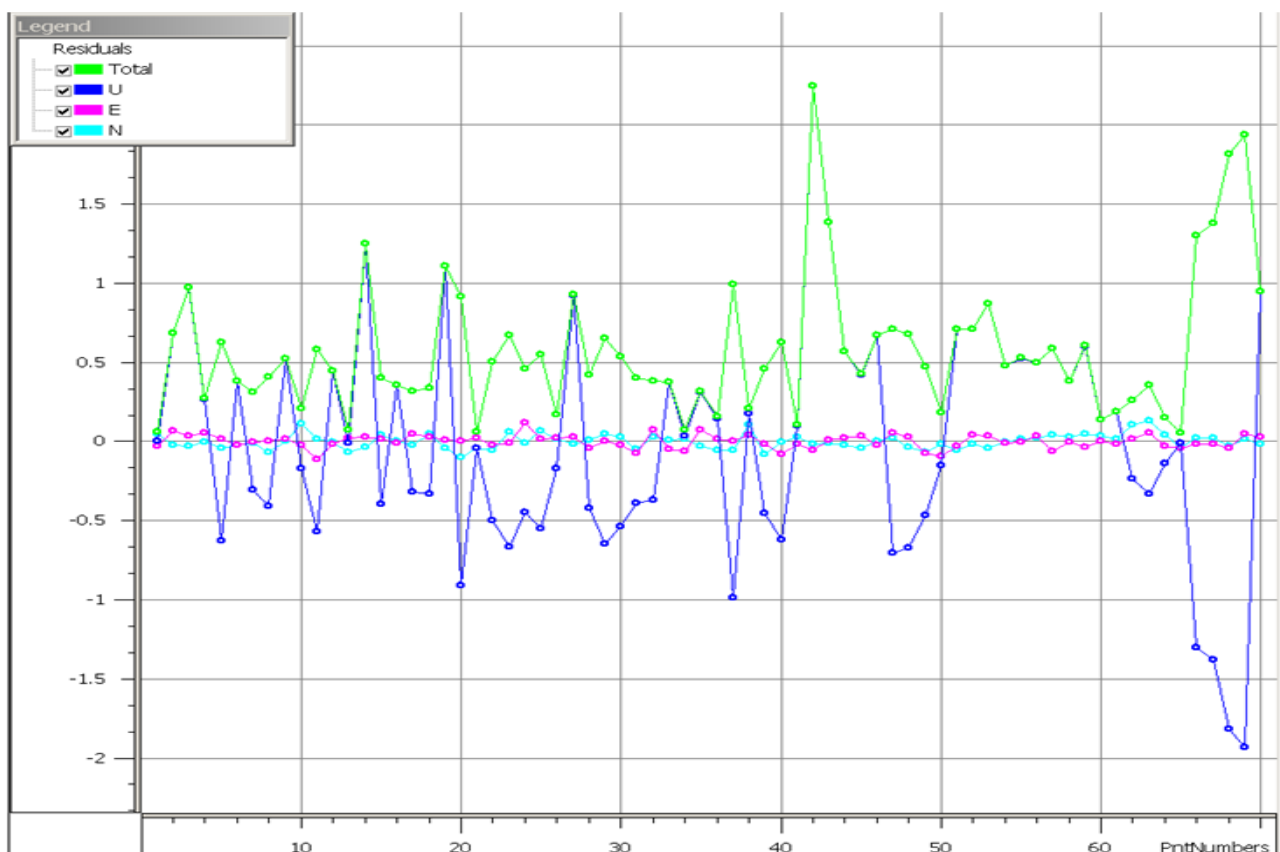


Рисунок 2– Остаточные не исключенные погрешности в координатах пунктов при вычислении параметров преобразования в представлении N, E, U (м)

Отнесение спутниковых измерений к той же точке конструкции центра геодезического пункта, к которой отнесена и нормальная высота, проверено при выполнении камеральной обработки фрагментов СГС-1.

По остаточным не исключенным погрешностям в высотах пунктов средствами AutoCad были построены изолинии, которые обозначили явно выраженный системный характер, из чего был сделан вывод, что среднее квадратическое значение остаточных не исключенных погрешностей (поправок) в высотах пунктов на уровне 0,7 м при вычислении параметров преобразования может быть отнесено к ошибке значений высот квазигеоида. На то, что геодезические высоты в СК-95 при вычислении параметров заданы с большой погрешностью, указывал также полученный большой разворот по оси Y (– 0,57").

Была очевидной необходимостью в применении более точных значений высот квазигеоида при вычислении геодезической высоты пунктов АГС для определения параметров связи, обеспечивающих точность трансформирования на сантиметровом уровне точности, как по плановым компонентам, так и по высоте. Это необходимо для сохранения трехмерности спутниковой геодезической сети при вычислении координат в СК-95.

Большой удачей можно считать появление открытой глобальной модели EGM2008 с разрешением 2,5' x 2,5', которая была создана при ведущей роли Национального агентства геопространственной разведки США на замену модели

EGM96. Метод моделирования - метод разложения геопотенциала в ряд по сферическим функциям до 2160-й степени.

В результате комплекса экспериментальных исследований модели EGM2008 и обобщения имеющихся экспериментальных данных специалистами ФГУ "29 НИИ Минобороны России", гор. Москва, данная модель оценивается следующими ориентировочными значениями среднеквадратической погрешности, характеризующими точность модели в целом по земному шару: по высотам геоида – 0,2-0,25 м; по составляющим уклонений отвесной линии – 1,3 - 1,5".

Специалистами компании "Кредо-Диалог" (гор. Минск) была выполнена оценка модели EGM2008 для территории Республики Беларусь. Для 196 пунктов СГС-1, равномерно распределенных по территории государства, было выполнено сравнение нормальных высот, полученных геометрическим нивелированием I, II классов, с нормальными высотами, полученными как разность геодезической высоты пункта над эллипсоидом WGS-84 и аномалии высоты по модели EGM2008. Данные о пространственных координатах X, Y, Z в WGS-84 и о нормальных высотах пунктов СГС-1, полученных геометрическим нивелированием, были предоставлены УП «Белаэрокосмогеодезия». Полученные результаты подтвердили достаточно высокую точность тестируемой модели – на уровне среднеквадратической погрешности (случайной составляющей расхождений) около 5 см.

На следующем этапе вычисления параметров связи ITRS (ITRF2005) – СК-95 для вычисления геодезических высот пунктов АГС в СК-95 были использованы высоты квазигеоида, вычисленные с привлечением модели EGM2008. Модель EGM2008 была редуцирована в СК-95 с использованием параметров связи WGS-84 – СК-95, опубликованных в Руководстве пользователя по выполнению работ в системе координат 1995 года (СК-95), ГКИНП (ГНТА)–06-278-04, Москва, ЦНИИГАиК, 2004. Так как модель EGM2008 представлена в виде матрицы, элементами которой являются значения аномалии высоты над эллипсоидом WGS-84 в узловых точках с эллипсоидальными координатами B, L, то редуцирование модели в СК-95 на эллипсоид Красовского выполнено с использованием стандартной процедуры. Соискатель пришла к выводу, что погрешность в координатах B, L на уровне 1-2 м не скажется на значениях высот квазигеоида. После выполнения этих операций повторно выполнено вычисление параметров преобразования.

Параметры преобразования получены со среднеквадратической погрешностью единицы веса (координаты) 0,04 м. Значения параметров не приведены из-за режимных ограничений.

По полученным параметрам координаты пунктов СГС-1 трансформированы из ITRS (ITRF2005) в СК-95 Республики Беларусь. Пространственные прямоугольные координаты X, Y, Z преобразованы в координаты на плоскости в проекции Гаусса-Крюгера. После чего выполнено сравнение вычисленных координат со значениями, полученными в результате уравнивания АГС в 1995 году. Для всего массива пунктов

по каждой компоненте получены стандартные уклонения: $\sigma_x=0,05$ м, $\sigma_y=0,04$ м. Для примера на рисунке 2 показаны изолинии разностей абсцисс.

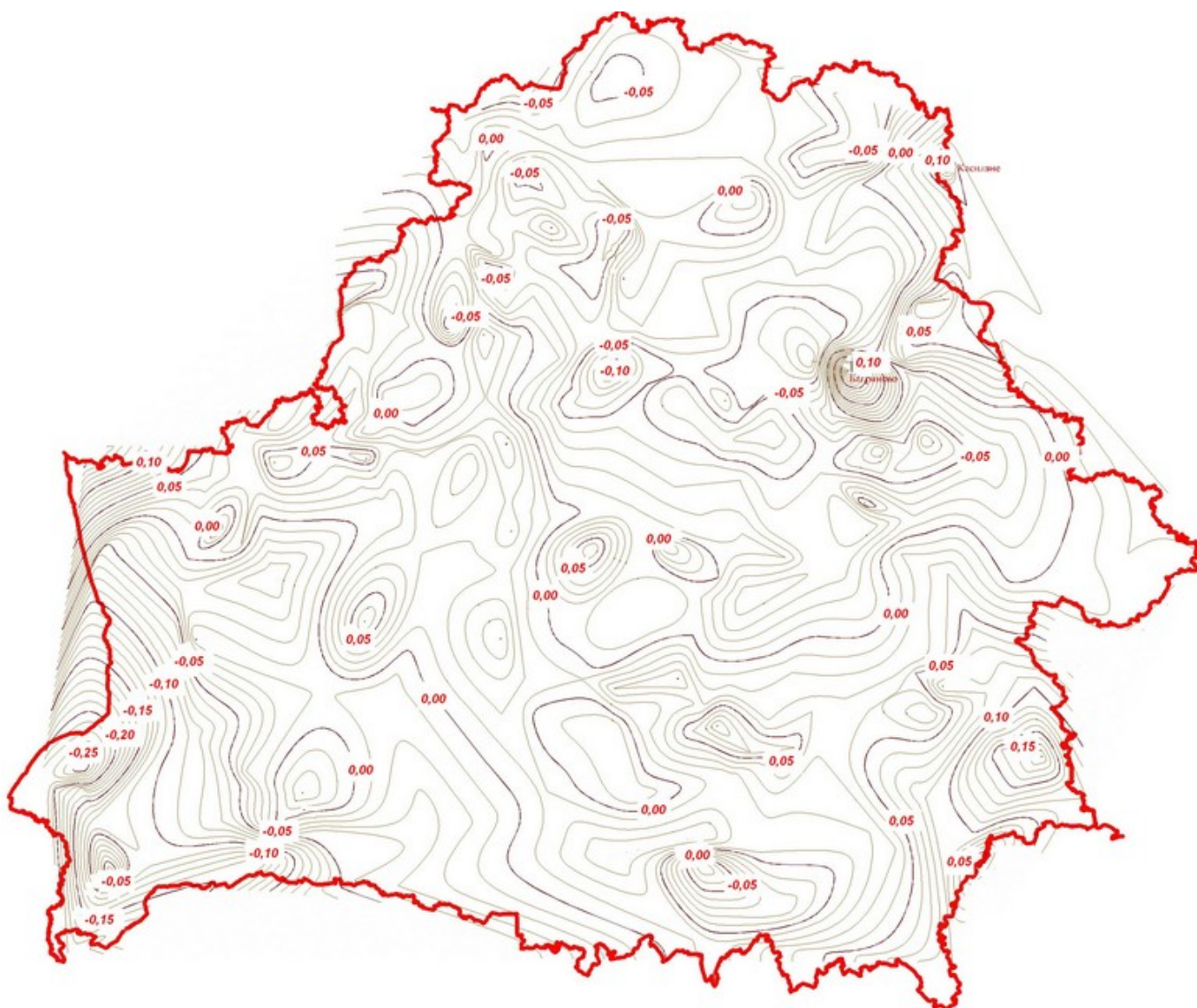


Рисунок 3– Изолинии разностей абсцисс совмещенных пунктов СГС-1, полученных по результатам уравнивания, выполненного МАГП в 1995 году, и вычисленных по полученным параметрам связи ITRS (ITRF2005) – СК-95.

Таким образом, полученные результаты позволили сделать вывод о том, что вычисленные параметры связи позволяют получить координатную основу, которую можно отнести к СК-95 в пределах ее заявленной точности.

Для всех пунктов СГС-1, имеющих нормальные высоты, полученные методом геометрического нивелирования, выполнено сравнение высот: вычисленных по единым параметрам с привлечением модели EGM2008 и полученных нивелированием. Стандартное уклонение составило $\sigma_{\text{Ннорм.}} = 0,05\text{м}$ для всей территории Республики Беларусь. Для части пунктов, расположенных на Минской возвышенности с более сложными формами рельефа, чем на преобладающей на

территории Республики Беларусь равнинной местности, расхождения в высотах пунктов в среднем составили ± 10 см.

Численные значения остаточных не исключенных погрешностей в плановых координатах пунктов АГС подтвердили заявленную точность СК-95 на территории Республики Беларусь.

Помимо решения задачи вычисления параметров связи ITRS – СК-95 Республики Беларусь на данном этапе выполнено сравнение высот квазигеоида над эллипсоидом Красовского, полученных ЦНИИГАиК в 1993 г. и полученных по модели EGM2008. Отклонения составили от -0,5 м на северо-западе государства до +2,0 м на юге.

Успешное решение задачи по определению единых для территории Республики Беларусь параметров связи ITRS (ITRF2005) – СК-95 создало предпосылки для успешного завершения схемы реализации СК-95, заключающегося в повторном уравнивании АГС с последующим уравниванием ГГС 3 и 4 классов. Уравнивание выполнено с принятием в качестве исходных координат совмещенных пунктов АГС и СГС-1, полученных трансформированием из ITRS по вычисленным параметрам.

По полученным результатам уравнивания АГС видно, что значения среднеквадратических погрешностей направлений 1 и 2 класса, полученных по результатам уравнивания, согласуются с априорными значениями, полученными по невязкам треугольников и по невязкам полюсных условий.

Дополнительно выполнены исследования, которые включали в себя сравнение результатов уравнивания, выполненного МАГП, и результатов повторного уравнивания АГС с опорой на совмещенные пункты АГС и СГС-1. Оценивались величины и распределение поправок в угловые и линейные измерения.

Результаты очень близки между собой. Распределение поправок в измеренные величины в сети очень близко к нормальному распределению. Значения среднеквадратических смещений сети по абсциссе и ординате по отношению к результату, полученному МАГП, близки к остаточным не исключенным погрешностям, полученным при вычислении параметров преобразования координат из международной общеземной системы отчета ITRS в СК-95.

Результаты выполненного уравнивания АГС:

- Среднеквадратическая погрешность измеренного направления 1 классов 0.53";
- Среднеквадратическая погрешность измеренного направления 2 классов 0.77";
- Среднеквадратическая погрешность измеренного азимута 1.29";
- Среднеквадратическая относительная погрешность измеренной линии 1 класса 1: 397000;
- Среднеквадратическая относительная погрешность измеренной линии 2 класса 1: 241000;
- Среднеквадратическая поправка в азимут 1.21";
- Среднеквадратическое смещение сети по абсциссе по отношению к результату, полученному МАГП, - 0,048 м;

- Среднеквадратическое смещение сети по ординате по отношению к результату, полученному МАГП, - 0,053 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения выносимой на защиту работы было найдено научно-техническое решение реализации СК-95 на территории Республики Беларусь, которое обеспечило сохранение единого координатного пространства с Российской Федерацией в пределах заявленной точности СК-95 и сохранение точности и размерности государственной спутниковой геодезической сети.

Выносимая на защиту методика реализации СК-95 на территории Республики Беларусь обеспечила:

- введение СК-95 с сохранением единого координатного пространства с Российской Федерацией в пределах заявленной точности СК-95;
- создание современной геодезической координатной основы высокой точности, реализующей на территории Республики Беларусь ITRS (ITRF2005) на эпоху 23.04.2008 (G1477.6);
- сохранение точности и многомерности спутниковой геодезической сети всех классов при вычислении координат пунктов сети в СК-95 через единые параметры связи ITRS (ITRF2005) – СК-95 для Республики Беларусь;
- преемственность всей ранее накопленной геодезической информации по построению ГГС методами традиционной геодезии;
- интеграцию Республики Беларусь в единое координатное пространство Европы и любое другое координатное пространство, созданное с использованием GNSS;
- развитие спутниковых технологий по определению пространственного положения объектов на сантиметровом уровне точности, в том числе в режиме реального времени.

Публикации по теме диссертации

1. Рудницкая Н.И. Модернизация государственной геодезической сети Республики Беларусь. Концептуальная схема реализации СК-95. Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. № 5, М.: МИИГАиК, 2011, с. 25-29.

2. Рудницкая Н.И. Определение параметров связи ITRS (ITRF2005) – СК-95 Республики Беларусь. Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. № 6, М.: МИИГАиК, 2011, с. 32-35.

3. Рудницкая Н.И. О новой государственной системе отсчета координат СК-95 Республики Беларусь и ее реализации. Современное состояние государственной геодезической сети. Земля Беларуси. № 3, Минск, БелНИЦзем, с. 17-23.

4. Рудницкая Н.И. Определение параметров связи ITRS – СК-95 Республики Беларусь. Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. № 37, М., с. 67-71.

