

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Н.И. Рудницкая

Государственное предприятие «Белгеодезия»,  
пр. Машерова, 17, 220029, г. Минск, Беларусь, [info@belgeodesy.by](mailto:info@belgeodesy.by)

В данном докладе рассматриваются вопросы, связанные с приведением действующих в Республике Беларусь государственных систем отсчета геодезических координат и нормальных высот в соответствие с современными международными стандартами в части геодезических систем отсчета согласно Резолюциям Генеральных Ассамблей Международного Союза геодезии и геофизики (далее – IUGG) и Международной Ассоциации геодезии (далее – IAG) 2015 и 2019 годов.

**Ключевые слова:** государственная геодезическая сеть; СК-95; геоцентрическая система отсчета координат; система координат РБ.

Двойственная природа геодезии заключается в следующем:

с одной стороны, геодезия – основа (базис) для представления горизонтального и вертикального положения (и их вариаций во времени) объектов на Земле и в околоземном пространстве в глобальной или в национальных системах отсчета, главным образом, для обеспечения социальных нужд в геопространственных данных;

с другой стороны, геодезия является фундаментальной наукой, которая использует широкий ряд (спектр) наземных наблюдений и космических технологий на разных платформах, вносящих вклад в понимание феномена «Система Земля» и, в особенности, в понимание ее динамического и геометрически-гравиметрического взаимодействия. Базовыми составляющими современной геодезии, как фундаментальной науки, являются изучение вращения Земли и движения полюсов, гравитационного поля Земли и создание современных систем отсчета: координат, физических высот, ускорений силы тяжести.

При определении круга задач специалисты государственного предприятия «Белгеодезия» помимо Резолюций IUGG и IAG руководствуются Конвенциями Международной службы вращения Земли и систем отсчета. Поскольку территориально Республика Беларусь относится к Европейской подкомиссии комиссии Международной Ассоциации геодезии, ответственной за системы отсчета, то в отношении реализации геодезической системы отсчета координат пунктами сети нулевого ранга мы руководствуемся Основными положениями о EUREF Сгущении (Guidelines for EUREF Densifications), поскольку только в этом случае имеется возможность ратификации сети нулевого ранга как национального сгущения ETRF или ITRF. А в отношении задачи установления новой системы отсчета высот (справочно) – Конвенциями об Европейской системе отсчета высот, поскольку в качестве промежуточного решения для реализации новой системы отсчета высот использованы результаты последнего уравнивания объединенной нивелирной сети Европы как последней реализации Европейской системы отсчета высот – EVRF2019. Нивелирная сеть I класса Республики Беларусь включена это решение.

По сути, реализация современных систем отсчета координат и высот сводится к созданию современной комбинированной геодезической сети, в которой в одной точке пространства с высокой степенью точности должны быть определены пространственные координаты (геометрия Земли), нормальная высота и аномальный потенциал (физика Земли). Обеспечение связи нормальной и геодезической высоты через модель аномального поля силы тяжести Земли (локальную модель высот квазигеоида) становится обязательным

условием. Другими словами, необходимо решить задачу создания внутренне согласованной геодезической основы государства.

В настоящее время в Республике Беларусь легитимна система отсчета геодезических координат 1995 года (далее – СК-95), математическая поверхность относимости в которой – эллипсоид Красовского, Балтийская система отсчета высот 1977 года и гравиметрическая система 1971 года (International Gravity Standardization Net 1971 – IGSN71).

Введение СК-95 на территории Республики Беларусь было продиктовано межгосударственными договоренностями между Российской Федерацией (РФ) и Республикой Беларусь (РБ) об едином координатном пространстве, но в территориальных границах Республики Беларусь СК-95 реализована как производная от реализации ITRS (ITRF2005) на эпоху 2008,31 через единые для всего государства официальные параметры связи (7 параметров Гельмерта) [1]. Координаты пунктов государственной спутниковой геодезической сети в ITRS на эпоху 2008,31 и в СК-95 Республики Беларусь соответствуют указанным параметрам с нулевыми остатками. Среднее квадратическое отклонение координат пунктов астрономо-геодезической сети (АГС) в СК-95 Республики Беларусь от координат в «оригинальной» СК-95 составляет  $\pm 5$  см. Внутри государственных границ Республики Беларусь точность геодезической основы, реализующей СК-95, значительно выше, чем в «оригинальной» реализации. Геодезические высоты пунктов государственной геодезической сети 1-4 классов, созданной методами триангуляции и полигонометрии, определены с точностью на уровне  $\pm 5-10$  см (точность EGM2008 с уточнением ее геометрическим методом на территории города Минска и в его окрестностях [2]). СК-95 Республики Беларусь – трехмерная система отсчета координат + 4 измерение – эпоха реализации ITRS. Параметры связи ITRS – СК-95 Республики Беларусь однозначно «привязаны» к конкретной эпохе реализации ITRS.

Необходимость установления геоцентрической системы отсчета координат обусловлена следующими факторами:

в соответствии с Резолюция № 1 XXVII Генеральной Ассамблеи IUGG и IAG ITRS – международный стандарт. Начало системы в центре масс Земли, GM близка к гравитационной постоянной реальной Земли, угловая скорость вращения есть угловая скорость вращения реальной Земли;

основная научная задача геодезии по определению формы и размеров Земли и ее внешнего гравитационного поля на современном этапе решается в условиях геопотенциала, как скалярной функции 3-D координат с началом отсчета в центре масс Земли;

отсчетный эллипсоид для геодезических координат должен быть уровненным, его параметры должны быть выведены под условием минимизации возмущающей части геопотенциала в глобальном масштабе по всей Земле;

установление геоцентрической системы отсчета координат позволяет реализовать современную систему отсчета физических высот, выраженных в геопотенциальных числах (условиях геопотенциала), как на национальном, так и на глобальном уровне.

Так как СК-95 в Республике Беларусь реализована как производная от реализации ITRS (ITRF2005), то к настоящему моменту времени созданы все предпосылки, обеспечивающие переход к геоцентрической системе отсчета координат:

с 2010 года все основные геодезические работы выполняются в ITRS (пост-обработка результатов GNSS-наблюдений и уравнивание спутниковых геодезических сетей), после чего координаты просто трансформируются в СК-95 Республики Беларусь;

ССТП Республики Беларусь функционирует в ITRS, координаты ССТП «закреплены» на эпоху 2008,31, весь поток данных обрабатывается постоянно с 2010 г., создаются временные серии координат в ITRS, определены скорости изменения координат за счет движения глобальных тектонических плит;

созданы все необходимые инструменты трансформирования координат из ITRS во все легитимные в государстве системы отсчета координат.

Пути реализации геоцентрической системы отсчета координат:

вычисление комбинированного решения (обработка временных серий координат за период времени с 2010 по 2021 год) в полном соответствии с “Guidelines for EUREF Densifications” с прямой геодезической привязкой к опорным пунктам IGS. Сеть нулевого ранга и ПДП ССТП могут быть ратифицированы как национальное сгущение ITRF. Решение включает в себя прямоугольные 3-D координаты на эпоху 2020,0 и скорости изменения координат за счет движения глобальных тектонических плит;

уравнивание СГС-1 с опорой на ПДП ССТП Республики Беларусь с вычислением координат пунктов сети на эпоху 2020,0;

вычисление новых параметров связи ITRS (эпоха 2020,0) – СК-95 Республики Беларусь. СК-95 Республики Беларусь остается промежуточной системой отчета, поскольку все местные системы координат образованы от координат в СК-95 в картографической проекции Гаусса-Крюгера на эллипсоиде Красовского.

Применяемая в настоящее время государственная система отчета высот – Балтийская система высот 1977 года (Кронштадтская система). Получена из уравнивания Главной высотной основы (ГВО) СССР, созданной методом геометрического нивелирования I и II классов, как свободной сети, от одного исходного пункта – марки б/№ Ломоносов, расположенной в здании железнодорожного вокзала в г. Ораниенбауме (Ломоносов), высота которой принята равной 5,6480 м ± 0,0076 м. За начало отчета высот принята имеющая нулевую отметку высоты горизонтальная черта на пластине Тонберга, установленной в устье синего моста на обводном канале в Кронштадте. Средняя квадратическая погрешность километрового хода по результатам уравнивания ГВО для I класса – ±1,6 мм; для II класса – ±2,7 мм. Средняя квадратическая погрешность высоты относительно исходного пункта для узла «Брест» – ±43,7 мм.

Балтийская система высот 1977 года – система нормальных высот. Несмотря на всемирное признание теории Молоденского и закрепленное ГОСТом-22276 «Геодезия. Термины и определения» определение нормальной высоты и задача определения нормальных высот в условиях геопотенциала не решалась. Исходный отсчетный уровень  $W_0$  и приливная система не определены.

А в соответствии с Резолюцией № 1 XXVI Генеральной Ассамблеи IUGG и IAG, система отчета нормальных высот должна быть реализована в условиях геопотенциала: высота есть геопотенциальное число – разность геопотенциала в рассматриваемой точке  $W_P$  и потенциала на отсчетной уровневой поверхности с заданным потенциалом  $W_0$  в среднеприливной системе (mean-tide)

$$H_P^Y = \frac{C_P}{\bar{\gamma}} = \frac{W_0 - W_P}{\bar{\gamma}} \quad (1)$$

Стратегия реализации Международной Земной системы отчета высот на глобальном и национальном уровне предполагает определение с высокой точностью пространственных координат пунктов нивелирования, носителей системы отчета) относительно центра масс Земли и детального изучения аномального поля силы тяжести (аномального потенциала).

До окончания модернизации государственной гравиметрической сети и выполнения современной гравиметрической съемки новая система отчета нормальных высот будет реализована на основе значения геопотенциала в пункте нивелирования  $W_P$  по одной из глобальных моделей гравитационного поля Земли и значений нормальных высот, полученных в результате уравнивания государственной нивелирной сети I и II классов последнего цикла нивелирования. Формула (1) может быть записана в следующем виде:

$$W_0 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n W_{P_i} + (H_{P_i}^Y \cdot \bar{\gamma}) \quad (2)$$

На данный момент времени задача определения  $W_0$  решена на основе:

определений по программе ВГС и СГС-1 координат фундаментальных реперов ГВО в ITRS (ITRF2014) на эпоху 2020,0;

вычисления потенциала силы тяжести по нескольким моделям гравитационного поля Земли на фундаментальных реперах ГВО;

сравнения приращений вычисленных значений геопотенциала между указанными пунктами с результатами высокоточного нивелирования;

вычисления  $W_0$  на основе различных наборов нормальных высот (результаты уравнивания Объединенной нивелирной сети Европы (EVRF2019), уравнивания фрагмента ГВО Российской Федерации и нивелирной сети I класса Республики Беларусь, высот пунктов ГВО, приведенных в Сводных каталогах высот последнего года издания);

анализа полученных результатов.

На данный момент времени значение  $W_0$  и соответствующие ему значения нормальных высот пунктов ГВО в новой системе отсчета высот определены.

Если говорить о гравиметрической системе отсчета, то считается, что с 1971 года на территории бывшего Советского Союза действует система ISGN1971 с поправкой Хонкасало. Однако по факту эта система так и не была реализована в полной мере на территории Республики Беларусь. По факту – все имеющиеся в наличии на территорию государства гравиметрические карты в редукции Буге (частично и в редукции в свободном воздухе) и значения ускорений силы тяжести в формулярах к картам относятся к Потсдамской системе. Поэтому, например, для вычисления поправки за переход от измеренных превышений к разностям нормальных высот в государственном предприятии «Белгеодезия» с 2014 г. вместо гравиметрических карт в редукции Буге используется модель гравитационного поля Земли EGM2008, высокая точность которой подтверждена в рамках исследований по установлению новой системы отсчета высот [3].

В настоящее время выполняются работы по созданию современной гравиметрической сети, которая обеспечит реализацию Международной гравиметрической системы отсчета в соответствии с Резолюциями IUGG и IAG. Создана Фундаментальная гравиметрическая сеть (ФГрС), которая включает в себя 4 пункта, и метрологический гравиметрический полигон в составе 3 пунктов. На пунктах ФГрС и пунктах метрологического полигона выполнены абсолютные определения силы тяжести с погрешностью не более  $\pm 5$  мкгал. На пунктах-спутниках пунктов ФГрС выполнены высокоточные спутниковые наблюдения и определены нормальные высоты нивелированием I класса с целью определения в одной точке пространства высокоточных геометрических и физических параметров Земли. Закончены полевые работы по созданию гравиметрической сети I класса относительным методом. Сеть включает 15 пунктов основной гравиметрической сети и 105 пунктов рядовой сети I класса. На данный момент выполняются уравнивательные вычисления. Проектируется гравиметрическая сеть 2 класса. Все работы выполняются с обеспечением реализации GAGRS (Global Absolute Gravity Reference System) в соответствии с Резолюцией №2 XXVI Генеральной Ассамблеи IUGG и IAG и Резолюцией №4 XXVII Генеральной Ассамблеи IUGG и IAG.

#### Литература

1. Рудницкая, Н.И. О новой государственной системе отсчета координат СК-95 Республики Беларусь и ее реализации. Современное состояние государственной геодезической сети. / Н.И. Рудницкая. – Земля Беларуси, №3, Минск, 2011. – С. 17-23.
2. Ларионов, А.А. Создание локальной модели высот квазигеоида геометрическим методом. / А.А. Ларионов, Н.И. Рудницкая. – Земля Беларуси, №1, Минск, 2016. С. 36-41.
3. Рудницкая, Н.И. Оценка точности глобальных гравитационных моделей Земли EGM2008 и GAO2018 геометрическим методом с учетом различных приливных концепций. / Н.И. Рудницкая. – Земля Беларуси, №3, Минск, 2021. С. 38-48.