О МОДЕРНИЗАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННОЙ НИВЕЛИРНОЙ СЕТИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

В.К. Андреев (ЦНИИГАиК)

Заместитель директора по научной работе. Кандидат технических наук.

М.Э. Джанпеисов (Министерство обороны Республики Казахстан)

Начальник Военно-топографического управления Комитета начальников штабов.

Н.Ж. Карабалаев (РГКП «Казгеодезия»)

Первый заместитель директора.

Е.В. Новиков (27-й Центральный НИИ МО РФ)

Старший научный сотрудник. Кандидат технических наук.

М.Ж. Сагындык (РГКП «Казгеодезия»)

Советник директора по науке. Кандидат технических наук.

У.Д. Самратов (НП АГП «Меридиан+»)

Советник генерального директора. Кандидат технических наук.

В.Н. Филатов (ОАО Концерн «РТИ «Системы»)

Советник генерального директора. Доктор военных наук.

К.Б. Хасенов (Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск)

Заведующий кафедрой «Геодезия, землеустройство и кадастр». Кандидат технических наук.

В.В. Хвостов (НП АГП «Меридиан+»)

Советник генерального директора. Кандидат технических наук.

В соответствии с действующей нормативно-технической документацией система государственного геодезического обеспечения Республики Казахстан (РК) включает государственную геодезическую сеть (ГГС), государственную нивелирную сеть (ГНС) и государственную гравиметрическую сеть (ГГрС). В статье [1, 2] дан анализ состояния и намечены актуальные проблемы модернизации ГГС РК с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). В настоящей публикации рассматривается состояние ГНС в Казахстане и пути ее модернизации с учетом опыта создания единой геодезической основы Российской Федерации и европейских государств [3].

Государственная нивелирная сеть, созданная в СССР на территории Казахстана, в декабре 2002 г. Правительством РК [4] официально была определена как единая государственная система высот РК. Причем, протяженность сетей I класса составляет 27 500 км, а сетей II класса — 48 500 км. Таким образом, на всей территории РК определение высот продолжает осуществляться в Балтийской системе высот 1977 г.

Опыт Российской Федерации по модернизации высотной основы

В Российской Федерации в соответствии с инструкцией [5] современная нивелирная сеть подразделяется на сети I, II, III и IV классов. Главной высотной основой являются сети I и II классов. Линии нивелирования этих классов точности прокладывают преимущественно вдоль шоссейных или железных дорог, а при их отсутствии, особенно в северных труднодоступных и северо-восточных районах страны, — по берегам рек, тропам и зимникам. Во всех случаях линии нивелирования I и II классов прокладывают по трассам с наиболее благоприятными для данного района грунтовыми условиями и с наименее сложным рельефом. Созданная в СССР к середине 1970-х гг. высокоточная нивелирная сеть имеет средние квадратические погрешности определения высот на один километр нивелирного хода: 1,6–2,1 мм для I класса и 2,7–3,6 мм для II класса.

Нивелирные сети I и II классов используются для решения научных задач при изучении фигуры Земли и ее внешнего гравитационного поля, а также для определения высот квазигеоида.

Результаты повторных измерений на сетях I и II классов применяют:

— для поддержания высотной сети на современном уровне;

— изучения современных вертикальных движений земной поверхности;

— прогнозирования влияния на окружающую среду работ по добыче нефти, газа и других полезных ископаемых;

— сейсмического районирования территории, выявления предвестников землетрясений.

В горных районах результаты повторного нивелирования используют для изучения строения земной коры, получения данных о скоростях и направленности движений отдельных блоков, выявления действующих разломов и разрывов в земной коре.

В Российской Федерации, учитывая большую актуальность перечисленных выше задач, в Концепции развития отрасли геодезии и картографии до 2020 года [6], наряду с вопросами модернизации государственной геодезической сети и государственной гравиметрической сети, определены задачи модернизации высотной основы, в частности:

— развитие спутникового нивелирования (II–IV классов);

— создание единой системы нормальных и геодезических высот;

— создание и обновление карт современных движений земной поверхности, цифровых моделей высот квазигеоида, особенно, в сейсмоопасных регионах;

— разработка и реализация комплексного плана поддержания государственных нивелирных сетей (II–IV классов) с внедрением новых требований к плотности нивелирных пунктов, достаточной для высотного обеспечения Российской Федерации, в том числе в целях обороны и безопасности государства.

Статистика погрешностей определения глобальной модели геоида в семи регионах РФ, полученная специалистами НП АГП «Меридиан+» на 69 пунктах государственной нивелирной сети путем сравнения результатов геометрического нивелирования с данными ГНСС измерений, показала следующее. Средняя квадратическая погрешность глобальной модели геоида находится в диапазоне 0,3–0,7 м, а погрешности вычисления аномалии высоты достигают 2 м. На локальных участках после устранения систематической составляющей погрешность может быть уменьшена до 0,07 м. Кроме того, исследования показали возможность построения локальной модели геоида с предельными ошибками не хуже 0,03 м, если учитывать геометрические свойства поверхности геоида и иметь исходные пункты нивелирной сети на расстоянии до 22 км (результаты исследований, выполненных специалистами НП АГП «Меридиан+», будут опубликованы в журнале «Геопрофи». — *Прим. ред.*).

Можно сделать вывод, что сочетание данных геометрического нивелирования и результатов измерений приемниками ГНСС позволяет определять модель поверхности геоида. При наличии дискретных данных согласование нормальной и геодезической высот в произвольных точках земной поверхности возможно с предельной погрешностью в несколько сантиметров. Таким образом, существует перспектива сгущения нивелирных сетей II класса средствами спутниковой геодезии.

Вопросы модернизации высотной основы с использованием спутниковых технологий актуальны также в странах Западной Европы.

Опыт модернизации высотной основы Европы

На современном этапе развития средств и методов геодезических измерений модернизация высотной основы Европы осуществляется по трем направлениям.

Одно из них — это формирование единой европейской опорной сети нормальных высот (EVRF — European Vertical Reference Frame) путем объединения наци-

Рис. 1
Амстердамский футшток

Рис. 2
Превышения между исходными нулями отсчета нормальных высот в странах Европы относительно нуля Амстердамского футштока

ональных нивелирных сетей стран Евросоюза, созданных традиционными методами.

Второе направление — разработка и внедрение альтернативной европейской высотной опорной сети (EUVN — European Vertical Reference Network), базирующейся на применении методов спутникового нивелирования.

Третье — создание региональной модели высот квазигеоида и определение нормальных высот с использованием метода спутникового нивелирования.

Объединенные в единую сеть EVRF национальные нивелирные сети имеют разные начала отсчета высот, которые относительно нуля Амстердамского футштока (рис. 1), принятого в качестве начала в европейской системе отсчета нормальных высот (EVRS — European Vertical Reference System), отличаются в среднем более чем на дециметр, а нуль футштока в Остенде (Бельгия) имеет превышение –2,32 м (рис. 2).

В каждом пункте альтернативной европейской высотной опорной сети EUVN определяются три координаты (широта, долгота и геодезическая высота) по результатам измерений ГНСС, в единой европейской земной системе координат (ETRS — European Terrestrial Reference System), а также нормальные высоты методом геометрического нивелирования в системе EVRS.

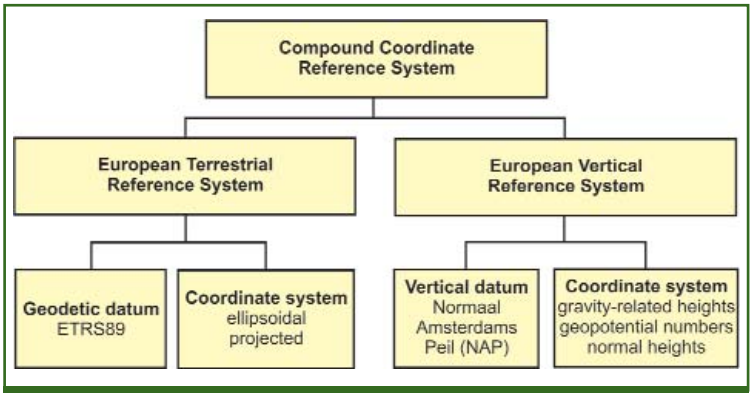

Рис. 3
Блок-схема CCRS

То есть европейская высотная опорная сеть EUVN описывается с помощью двух независимых систем ETRS и EVRS, которые при совместном использовании получили название — объединенная координатная референцная система (CCRS — Compound Coordinate Reference System, рис. 3). Это позволяет по данным CCRS определять высоты квазигеоида (рис. 4).

В реализации проекта EUVN приняли участие геодезические ведомства 26 стран Евросоюза. Из них, пожалуй, наибольший вклад был внесен Федеральным агентством картографии и геодезии Германии (BKG). Остановимся более подробно на работах указанного ведомства.

По результатам геометрического нивелирования сетей I класса старых и вновь присоединенных федеральных земель (757 нивелирных ходов длиной 30 908 км) была создана главная высотная основа Германии 1992 г. — DHHN92. Началом отсчета нормальных высот в DHHN92 является нуль Амстердамского футштока.

В связи с внедрением методов высокоточного спутникового позиционирования, наряду с DHHN92, создана альтернативная высотная опорная сеть EUVN и на ее основе — региональная модель высот квазигеоида территории Германии 2011 г. — GCG2011. Высоты квазигеоида варьируются от 34 м на Балтийском море до 50 м в Альпах

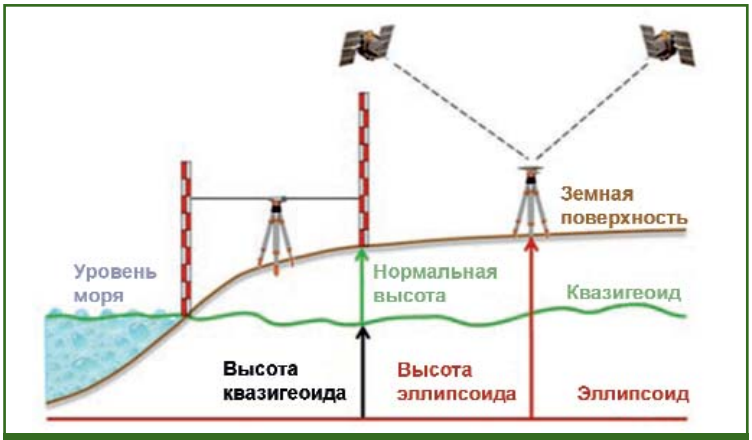

Рис. 4
Схема определения высот квазигеоида по результатам геометрического и спутникового нивелирования

(рис. 5). Горизонтальный градиент высот квазигеоида составляет 10 см на 1 км.

Модель высот квазигеоида GCG2011 разработана Федеральным агентством картографии и геодезии Германии и Институтом геодезии Ганноверского университета Вильгельма Лейбница совместно с AdV — рабочим сообществом геодезических ведомств федеральных земель Германии. Эта модель совместима с системой точного позиционирования SAPOS, созданной AdV. В настоящее время в составе SAPOS функционирует порядка 250 постоянно действующих референцных станций ГНСС, покрывающих всю территорию Германии и обеспечивающих определение пространственных координат объектов в системе ETRS с предельной погрешностью в несколько миллиметров в режиме постобработки и несколько сантиметров в режиме реального времени.

При наличии эллипсоидальных высот в системе ETRS (h_{ETRS89}) и модели высот квазигеоида по модели GCG2011 ($\zeta_{GCG2011}$) нормальные высоты пунктов сети DHHN92 определяются по формуле:

$$H_{DHHN92} = h_{ETRS89} - \zeta_{GCG2011}.$$

Таким образом, используя модель высот квазигеоида GCG2011, нормальные высоты точек земной поверхности можно получить с предельной погрешностью 1–2 см на равнинной местности, 3–4 см в горной местности и 4–10 см на море.

Наиболее важным результатом реализации альтернативной европейской высотной опорной сети EUVN является создание высокоточной модели квазигеоида, которая позволяет определять нормальные высоты точек земной поверхности с предельной погрешностью в несколько сантиметров, используя результаты измерений ГНСС и не применяя для этих целей трудоемкий метод геометрического нивелирования.

Направления модернизации главной высотной основы Республики Казахстан

Учитывая опыт проведенных работ по совершенствованию государственных высотных сетей в Европе и РФ, главную высотную основу РК предлагается развивать также по трем основным направлениям.

Одним из этих направлений должно быть развитие и поддержание главной Казахстанской высотной основы (KazVRF — Kazakhstan Vertical Reference Frame) в соответствии с требованиями инструкции [5]. При этом в состав KazVRF необходимо включить пункты ФАГС (как реперы I класса) и пункты ВГС (как реперы I и II классов).

В качестве единой Казахстанской системы нормальных высот (KazVRS — Kazakhstan Vertical Reference System) авторы предлагают на какой-то срок сохранить Балтийскую систему высот 1977 г., как это и установлено постановлением Правительства РК [4]. В перспективе целесообразно обосновать с научной и экономической точек зрения введение новой системы нормальных высот KazVRS, перенеся начало отсчета в центральную часть Казахстана, например, в пункт ФАГС «Астана» [2, рис. 3], совместив его с главным гравиметрическим пунктом РК и уточнив высоту квазигеоида в этом месте, используя абсолютные и относительные гравиметрические наблюдения. Вопросу создания государственной гравиметрической сети будет посвящена отдельная статья. — *Прим. ред.*

Говоря об исходном пункте Балтийской системы высот, М.М. Машимов в свое время отмечал [7]: «Начальный пункт Пулково, где высота квазигеоида принята равной нулю, находится на самом краю территории страны, что наихудшим образом сказалось на передаче геодезических высот на южные и восточные окраины. Ошибка передачи геодезических высот на эти районы составляет до 3 м. Излишне доказывать, что, принимая во внимание рекомендацию Ф.Н. Красовского: «Исходный пункт референц-эллипсоида должно взять в середине территории СССР», такой выбор исходного пункта приводит к уменьшению в четыре раза ожидаемых наибольших отступлений поверхности референц-эллипсоида от поверхности наилучше подходящего эллипсоида по сравнению с теми отступлениями, которые имеют место при выборе исходного пункта на краю страны». Далее М.М. Машимов говорит, что «необходимо было исходный пункт перед общим уравниванием АГС установить в середине территории СССР, где, определив высоту геоида и уклонение отвеса относительно общеземного эллипсоида с максимальной точностью, редуцировать АГС на поверхность этой фигуры... И в этом районе определять фундаментальные астропункты и высоту геоида над земным эллипсоидом».

Второе направление — создание Казахстанской объединенной координатной референцной системы (KazCCRS — Kazakhstan Compound Coordinate Reference System), предназна-

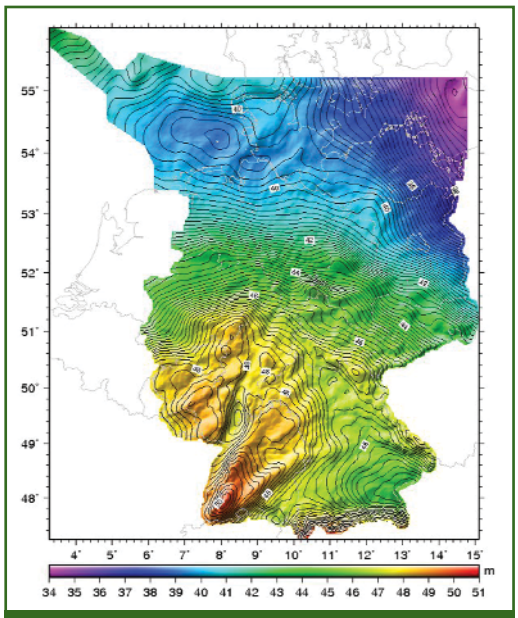

Рис. 5
Модель высот квазигеоида GCG2011

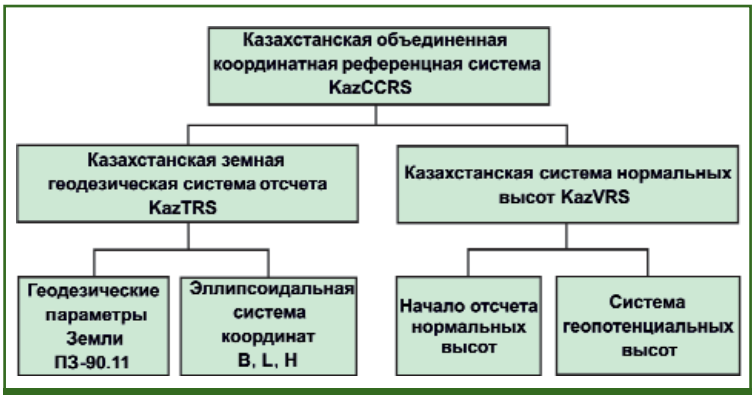

Рис. 6
Блок-схема KazCCRS

ченной для проведения спутникового нивелирования и определения нормальных высот пространственных объектов (рис. 6). В объединенной координатной системе одновременно применяются две независимые системы: Казахстанская земная геодезическая система отсчета (KazTRS) и Казахстанская система нормальных высот (KazVRS).

При проведении спутникового нивелирования в качестве исходной геодезической основы используются пункты ФАГС, ВГС, реперы I и II классов, эллипсоидальные координаты B, L, H, которые определяются из измерений средствами ГНСС. В дальнейшем, имея такую опорную сеть, для любых точек с координатами с B, L, H, определенными с использованием Казахстанской системы спутникового позиционирования KazPOS [2], можно вычислить нормальные высоты и высоты квазигеоида.

Третье направление модернизации — формирование высокоточной высотной отсчетной поверхности — Казахстанского комбинированного квазигеоида KazCG (Kazakhstan Combined QuasiGeoid). Модель высот квазигеоида создается отдельными блоками, ограниченными опорными узловыми пунктами ФАГС, ВГС и реперов I класса с координатами B, L, $\zeta = H - h$ в системе KazCCRS. Для вычисления геопотенциальных высот определяемых точек применяются способы нелинейной интерполяции.

Изложенная авторами технология построения KazCG хорошо согласуется с технологией создания GCG2011. Очевидно, можно ожидать, что высоты регионального квазигеоида Казахстана будут получены с предельной погрешностью: на равнине — 1–2 см, в предгорной и горной местности — 3–4 см, на акваториях Каспийского моря и внутренних водоемов — 4–10 см.

Таким образом, предлагаются следующие этапы модернизации государственной нивелирной сети Республики Казахстан.

1. Разработка Основных положений модернизации государственной нивелирной сети Республики Казахстан.

2. Разработка необходимой нормативной документации.

3. Разработка и реализация Технического проекта обследования и обновления нивелирных сетей I и II классов в Балтийской системе высот 1977 г. в соответствии с требованиями инструкции по нивелированию [5].

4. Разработка и реализация Научно-технического проекта модернизации ГНС в системе KazVRS (проект разрабатывается параллельно с модернизацией государственной гравиметрической сети Казахстана).

5. Разработка и реализация Казахстанского комбинированного квазигеоида KazCG, представляющего собой перспективную поверхность для отсчета геопотенциальных высот.

6. Разработка и реализация Технических проектов по спутниковому нивелированию реперов III и IV классов по регионам Республики Казахстан.

Список литературы

1. Андреев В.К., Джанпеисов М.Э., Новиков Е.В., Сагындык М.Ж., Самратов У.Д., Филатов В.Н., Хасенов К.Б., Хвостов В.В. Состояние и актуальные проблемы модернизации ГГС Республики Казахстан (начало) // Геопрофи. — 2012. — № 6. — С. 12–17.

2. Андреев В.К., Джанпеисов М.Э., Новиков Е.В., Сагындык М.Ж., Самратов У.Д., Филатов В.Н., Хасенов К.Б., Хвостов В.В. Состояние и актуальные проблемы модернизации ГГС Республики Казахстан (окончание) // Геопрофи. — 2013. — № 1. — С. 13–16.

3. Федеральное агентство картографии и геодезии Германии // www.bkg.bund.de.

4. Постановление Правительства Республики Казахстан от 28 декабря 2002 г. № 1403 «Об установлении единых государственных систем координат, высот, гравиметрических и спутниковых измерений, а также масштабного ряда государственных топографических карт и планов».

5. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. — ГКИНП (ГНТА)-03-010-02.

6. Концепция развития отрасли геодезии и картографии до 2020 года. Утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 декабря 2010 г. № 2378-р.

7. Машимов М.М. Геодезические этюды // Геодезия и картография. — 1996. — № 1. — С. 14–26.

RESUME

The article is a continuation of the initiated by the authors series of publications on the structure and the main provisions of the modernization of the state geodetic network in the Republic of Kazakhstan. This article presents the results of the analysis of the current state of the state of the leveling network as a part of the state geodetic network. The ways of its modernization are outlined with due consideration to the experience of Russia and Europe.