

О МОДЕРНИЗАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЙ СЕТИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

В.К. Андреев

До 2014 г. — заместитель директора по научной работе ЦНИИГАиК. 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.

У.Д. Самратов (НП АГП «Меридиан+»)

Советник генерального директора. Кандидат технических наук.

Д.Б. Тажединов (Комитет по управлению земельными ресурсами Министерства регионального развития Республики Казахстан)

Заместитель председателя.

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

Советник генерального директора. Доктор военных наук.

В.В. Хвостов (НП АГП «Меридиан+»)

Советник генерального директора. Кандидат технических наук.

Государственная гравиметрическая сеть Республики Казахстан, актуальное состояние и задачи модернизации

В соответствии с действующей нормативно-технической документацией система государственного геодезического обеспечения Республики Казахстан (РК) предполагает наличие государственной геодезической сети (ГГС), государственной нивелирной сети (ГНС) и государственной гравиметрической сети

(ГГРС). В статьях [1, 2] авторами сделан анализ состояния актуальных проблем модернизации ГГС РК, ГНС РК с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛО-НАСС (Россия) и GPS (США).

В данной статье рассматривается актуальное состояние ГГРС Республики Казахстан и пути ее модернизации с учетом опыта создания современной гравиметрической основы в России [1–6] и странах Европы [7, 8].

Действующая ГГРС РК унаследована от ГГРС, созданной в СССР. Она представляет собой совокупность закрепленных на местности и гравиметрически связанных между собой пунктов, на которых выполняют абсолютные и/или относительные измерения ускорения силы тяжести и определяют нормальные высоты этих пунктов. В соответствии с инструкцией [4] ГГРС подразделяется на государственную фундаментальную гравиметрическую сеть (ГФГРС) и государствен-

ную гравиметрическую сеть 1 класса (ГГрС-1).

Как было показано в [1, 2], высшим звеном всей структуры координатного обеспечения территории страны является фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС). На всех пунктах ФАГС должны быть определены эллипсоидальные координаты, геодезические и нормальные высоты и абсолютные значения ускорения силы тяжести, т. е. пункты ФАГС должны быть совмещены с пунктами ГНС и ГФГрС.

ГФГрС является высшим звеном гравиметрической сети и служит для определения и уточнения гравиметрической системы страны, ее связи с мировой и зарубежными гравиметрическими системами. Она используется для метрологического обеспечения гравиметрических сетей низших классов и проведения гравиметрических съемок.

Средняя плотность размещения пунктов ГФГрС должна составлять 1 пункт на 0,5–1,0 млн км².

Основной научной задачей, решаемой с помощью ГФГрС, является изучение изменений гравитационного поля во времени. С этой целью на фундаментальных гравиметрических пунктах, размещаемых в различных геолого-тектонических регионах, систематически выполняются абсолютные и относительные определения ускорения силы тяжести с максимально возможной точностью.

В декабре 2002 г. Правительство РК официально установило «единую государственную систему координат, высот, гравиметрических и спутниковых измерений, приняв за начало координат центр Круглого зала Пулковской обсерватории, а исходный уровень высот — ноль Кронштадтского футштока в Балтийском море, расположенные на территории Российской Федерации» [8].

Учитывая актуальность совершенствования геодезической

основы страны с использованием спутниковых методов, Правительство РФ в декабре 2010 г. утвердило Концепцию развития отрасли геодезии и картографии до 2020 года [9].

В указанном документе, наряду с вопросами модернизации государственной геодезической сети, рассмотрены задачи модернизации государственной нивелирной сети и государственной гравиметрической сети, 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 учетом новых требований к плотности нивелирных пунктов, достаточной для высотного обеспечения Российской Федерации, в том числе для обеспечения обороны и безопасности государства.

Вопросы модернизации гравиметрической основы с использованием высокоточных гравиметров и спутниковых технологий актуальны также в странах Европы. Рассмотрим их более подробно.

▼ Современные гравиметры

Для модернизации гравиметрической основы в Европе используются высокоточные гравиметры, например портативные абсолютные гравиметры A10 и FG5 компании Micro-g LaCoste, Inc. (США) (рис. 1). В них для высокоточного измерения ускорения силы тяжести применяются рубидиевый стандарт частоты и йодостабилизированный лазер. FG5 на данный момент по своим тактико-техническим характеристикам считается лучшим портативным гравиметром и при благоприятных условиях измерения может обеспечить точность 2–3 мкГал (20–30 нм/сек²). Гравиметр A10 обеспечивает точность 10 мкГал.

В Российской Федерации разработкой абсолютных гравиметров, основанных на измерении ускорения свободно падающего тела, занимается Институт автоматики и электрометрии СО РАН (Новосибирск). С 1970-х гг. создано несколько моделей абсолютных баллистических лазерных гравиметров типа ГАБЛ. Лазерный гравиметр включает четыре основных устройства: баллистический блок, лазерный интерферометр, измерительный блок со средствами вычислений и блок управления. Точность измерения ускорения силы тяжести гравиметрами ГАБЛ достигает 4 мкГал и выше.

На основе ГАБЛ при участии ЦНИИГАиК была изготовлена так-



Рис. 1

Абсолютные гравиметры: A10 (слева) и FG5 (справа).

Источник: www.microglacoste.com

же серия мобильных абсолютных гравиметров типа ГБЛ, адаптированных к условиям работы на пунктах гравиметрической сети (рис. 2). Средняя квадратическая погрешность измерения ускорения силы тяжести ГБЛ-М составляет не более 5 мкГал, общий вес оборудования — 60 кг (нетто) и 90 кг (брутто), потребляемая мощность — до 1 кВт. Прибор предназначен для эксплуатации в закрытых отапливаемых помещениях при нормальных климатических условиях.

Измерения силы тяжести с помощью абсолютных гравиметров позволяют выявлять вертикальные движения земной поверхности, вызванные смещениями земной коры, ледников, изменениями уровня моря и т. п.

Для проведения долгосрочных наблюдений за изменениями ускорения силы тяжести во времени в ФРГ получили применение стационарные сверхпроводящие гравиметры типа OSG компании GWR Instruments (США). Если в обычных гравиметрах измерения осуществляются с помощью тестовой массы, подвешенной на пружине, в OSG используют электромагнитную катушку, помещенную в полую сферу. Регулирующая система удерживает электромагнитную катушку в постоянном положении и измеряет силу тока, затрачиваемую на удержание катушки в заданном положении. Благодаря использованию магнитных катушек, достигается высокая инструментальная точность порядка 0,01 мкГал и обеспечивается минимальный дрейф нуля. Инструментальная стабильность находится в пределах от 0 до 5 мкГал в год. Прибор позволяет измерять изменения ускорения силы тяжести в широком диапазоне: от сейсмических явлений с периодами в 10 минут до изменений, связанных с движением полюсов, с периодами от 365 до 435 дней (период Чандлера) и долгопериодическими изменениями продолжительностью от 18,6 лет и более.

В результате проведения наблюдений вариаций ускорения силы тяжести во времени обеспечивается высокая точность измерения земных приливов, а также сдвигов и деформаций, вызванных океаническими, атмосферными и гидрологическими перемещениями масс, изменений вследствие движения полюсов, последствий землетрясений и т. д.

Следует также отметить, что в г. Франкфурте-на-Майне (ФРГ) установлен испытательный стенд, вырабатывающий искусственные ускорения силы тяжести, которые используются для калибровки и тестовых испытаний гравиметров.

▼ **Немецкая референсная гравиметрическая сеть**

Регулярные наблюдения за ускорением силы тяжести с использованием абсолютных гравиметров в комбинации со сверхпроводящими гравиметрами, установленными в городах Ветцеле, Бад-Хомбурге и Моксе (Университет Фридриха Шиллера) позволили создать Немецкую референсную гравиметрическую сеть DSRN (Deutsches Schwerereferenznetz), которая включает (рис. 3):

— Немецкую фундаментальную гравиметрическую сеть DSGN94 (Deutsches Schweregrundnetz 1994).

— Немецкую основную гравиметрическую сеть DSHN96 (Deutsches Schwerehauptnetz 1996).

Фундаментальная сеть DSGN94, являющаяся аналогом ГФРС, создаваемой в России в соответствии с инструкцией [4], состоит из 30 фундаментальных пунктов, определенных с помощью абсолютных гравиметрических измерений. Она является опорой для создания основной гравиметрической сети DSHN96. В России аналогом DSHN96 является ГГРС-1, создаваемая в соответствии с инструкцией [4].

На всех пунктах DSGN94 наблюдения выполнены с использо-



Рис. 2
Гравиметр ГБЛ-М

ванием абсолютных гравиметров FG5-101. Точность абсолютных определений — 5 мкГал.

DSHN96 состоит из гравиметрической сети DSHN82, созданной ранее, и 114 новых абсолютных гравиметрических пунктов, включая 15 пунктов вдоль границы ФРГ. Среднее квадратическое отклонение ускорения силы тяжести составляет 5 мкГал.

В ФРГ разработана цифровая модель геоида GCG2011 (German Combined QuasiGeoid 2011), представляющая собой отсчет-



Рис. 3
Сеть DSGN94 (синий цвет) и сеть DSHN96 (красный цвет).
Источник: www.bkg.bund.de

ную поверхность для вычисления нормальной высоты и средство для вычисления ускорения силы тяжести в любой произвольной точке с эллипсоидальными координатами B и L , заданными в системе ETRS89. Ожидаемая точность определения ускорения силы тяжести составляет 2 мГал на равнинной местности и 7 мГал в горах, а также узких и протяженных долинах [7].

▼ Опорные гравиметрические сети на территории России

Организованные на государственном уровне работы по гравиметрической съемке террито-

рии бывшего СССР начались на основе Постановления Совета труда и обороны при СНК СССР в 1932 г. В то время стояла важная задача по осуществлению гравиметрической разведки местности в интересах выявления перспективных участков для разработки полезных ископаемых. Несмотря на тщательность исполнения работ, спустя годы выяснилось, что на стыке отдельных проектов расхождения между результатами съемок достигают 10 мГал и более. В связи с этим, очевидной стала необходимость усиления системного

любом пункте не превысила 150 мкГал.

Успехи СССР в области создания абсолютных гравиметров дали новый импульс в развитии гравиметрии. Начиная с 1979 г., основу гравиметрической системы СССР, а впоследствии Российской Федерации, составляют государственная фундаментальная гравиметрическая сеть и государственная гравиметрическая сеть 1 класса (рис. 4). В настоящее время определено 54 пункта ФГРС и около 1000 пунктов ГРС-1. Точность определения ускорения силы тяжести в пунктах ФГРС составляет 6 мкГал, а на пунктах ГРС-1 — 20–30 мкГал. По критерию качества гравиметрическая сеть России вполне может конкурировать с мировой гравиметрической сетью.

Организация и выполнение гравиметрических работ государственного масштаба требует особой квалификации. В СССР задачи по подготовке исполнителей, разработке технологии измерений, созданию аппаратуры и математических методов обработки полевых материалов в области геодезической гравиметрии успешно решались в ЦНИИГАиК. В РФ решение многих задач по созданию опорных гравиметрических сетей в настоящее время возложено на ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД».

▼ Референсная гравиметрическая сеть Европы

В ходе политического и экономического сближения стран Европы стал возможным свободный доступ к засекреченным до недавних пор гравиметрическим данным. Однако из-за большого различия между гравиметрическими системами этих стран, возникла необходимость выполнения новых работ в рамках проекта унификации гравиметрических систем UNIGRACE (Unification of Gravity Systems in Central Europe, рис. 5). Для гравиметрических измерений ис-

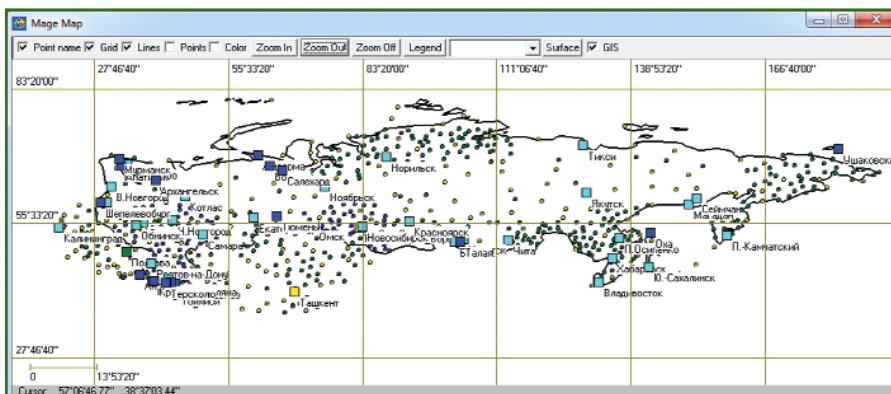


Рис. 4

Схема расположения опорных гравиметрических пунктов на территории СССР

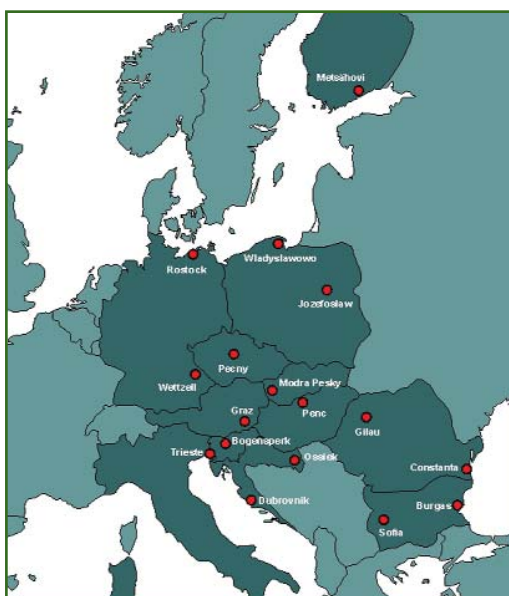


Рис. 5

Схема размещения абсолютных гравиметрических станций в проекте UNIGRACE по состоянию на 2000 г.
Источник: www.bkg.bund.de

подхода к организации гравиметрических работ, и в 1963 г. Министерство геологии и охраны недр СССР, Институт физики Земли АН СССР и Военно-топографическое управление Генерального штаба ВС СССР утвердили проект по определению опорных гравиметрических пунктов 1 класса. На основе этого проекта в 1965–1969 гг. на территории СССР была создана гравиметрическая сеть 1 класса в составе 98 пунктов. Измерения на пунктах сети выполнялись относительными гравиметрами ГАЭ-3, ГАГ-1, ГАГ-2. Средняя квадратическая погрешность приращения ускорения силы тяжести между пунктами в среднем по сети составила 40 мкГал. Относительно исходного пункта мировой гравиметрической сети Потсдам погрешность определений на

пользовались, в основном, абсолютные гравиметры.

Проект был реализован в тесном сотрудничестве гравиметрических служб ФРГ, Финляндии, Франции, Австрии, Польши, Болгарии, Чехии, Венгрии, Италии, Румынии, Словакии, Словении и Хорватии. При этом места для размещения опорных гравиметрических станций выбирались так, чтобы в каждой стране одна из станций располагалась в стабильном в геологическом отношении регионе, а в случае наличия морского побережья — недалеко от водомерного поста.

▼ Системы глобального мониторинга ускорения силы тяжести

ФРГ и ряд других стран также участвуют в реализации программ глобального мониторинга изменений ускорения силы тяжести и создании на этой основе международного банка абсолютных гравиметрических данных. Для этого используются абсолютные гравиметры, установленные в городах Ветцеле и Бад-Хомбурге. Комбинация абсолютных измерений с измерениями, непрерывно регистрируемыми сверхпроводящими гравиметрами OSG, позволила значительно повысить точность и надежность полученных результатов.

Четыре сверхпроводящих гравиметра OSG, установленные в городах Ветцеле, Бад-Хомбурге, Медицине (Италия) и Консепсьоне (Чили), задействованы в Глобальном геодинамическом проекте GGP (Global Geodynamics Project).

17 марта 2002 г. на орбиту была выведена спутниковая система GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), целью которой является изучение гравитационного поля Земли и океанических течений, влияющих на формирование климата. Система состоит из двух идентичных спутников, находящихся на полярной орбите с высотой 500 км. Они непрерывно обмениваются радиосигналами в микроволно-

вом диапазоне, что позволяет с микронной точностью отслеживать изменения расстояния между ними. Собственное движение и ориентация спутников регистрируются с помощью приемников GPS, акселерометров и звездных датчиков. Кроме того, спутники оснащены уголковыми отражателями для использования в спутниковой лазерной дальнометрии.

17 марта 2009 г. Европейским космическим агентством на орбиту был выведен научно-исследовательский спутник GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer), целью которого являлось изучение гравитационного поля Земли и устоявшихся океанических течений. Высота орбиты спутника составила около 260 км (спутник прекратил свое существование 11 ноября 2013 г. — *Прим. ред.*). Основным научным прибором спутника служил электростатический гравитационный градиентометр, состоящий из 6 акселерометров для изучения гравитационного поля Земли и параметров геоида. Спутник имел солнечно-синхронную орбиту с наклоном 96,7°. Низкая орбита спутников и высокая точность акселерометров (10–12 м/с²) позволяла определить высоту геоида с точностью до 1–2 см на расстоянии порядка 100 км.

Данные, полученные со спутника GOCE, находят многочисленное применение, в том числе при изучении опасных сейсмических районов и прояснении поведения океана, что являлось одной из главных целей спутника. Сопоставляя информацию о форме геоида с данными о высоте поверхности океана, полученными со спутника, можно проследить направление и скорость геострофических океанских течений.

▼ Основные направления модернизации государственной гравиметрической сети Республики Казахстан

С учетом российского и европейского опыта модернизации национальных и международных гравиметрических сетей, Казахстанскую гравиметрическую референцную систему/сеть KazGRS/KazGRF (Kazakhstan Gravity Reference System/Frame) авторы предлагают развивать по трем направлениям.

Основным из них должно стать развитие и поддержание KazGRS/KazGRF в соответствии с требованиями инструкции [4], состоящей из государственной фундаментальной гравиметрической сети и государственной гравиметрической сети 1 класса.

Предлагается пункты ГФГРС совместить с пунктами ФАГС и ГНС I класса (рис. 6). При этом пункт ГФГРС, совмещенный с пунктом ФАГС «Астана», на котором планируется осуществлять продолжительные определения ускорения силы тяжести, должен стать главным гравиметрическим пунктом (ГГрП) РК.

С пунктами ФАГС: «Алматы», «Талдыкорган», «Кызылорда», «Актау», «Атырау», «Актобе», «Костанай» и «Усть-Каменгорск», совмещаются узловое фундаментальные гравиметрические пункты (УФГрП), состоящие из трех и более пунктов с расстоянием между ними 1–50 км, связанных между собой относительными измерениями с погрешностью <10 мкГал.

Второе направление — проведение систематических абсолютных определений ускорения силы тяжести на пунктах ГФГРС с использованием транспортабельных абсолютных гравиметров типа FG5, A10 и ГБЛ или других, равных им по точности. Абсолютные определения проводятся с целью выявления вариации силы тяжести во времени вследствие движений земной коры, полюсов и других геодинамических явлений. Кроме того, определения с помощью абсолютных гравиметров дают независимый контроль силы тяжести на пунктах ГГрС-1 и прочих гравиметрических пунктах,



Рис. 6

Схема размещения пунктов ГФРС, совмещенных с пунктами ФАГС и ГНС I класса на территории Республики Казахстан

определенных относительными методами.

В рамках второго направления модернизации на главном гравиметрическом пункте Республики Казахстан, совмещенном с пунктом ФАГС «Астана», следует осуществлять постоянные наблюдения стационарным гравиметром типа OSG, а на других УФРП, совмещенных с пунктами ФАГС, выполнять периодические наблюдения портативными гравиметрами типа FG5, A10 либо ГБЛ.

Третье направление модернизации заключается в формировании высокоточной отсчетной поверхности — Казахстанского комбинированного квазигеоида KazCG (Kazakhstan Combined QuasiGeoid). Модель квазигеоида создается отдельными блоками, ограниченными опорными узловыми пунктами ФАГС, ВГС, реперов нивелирования I класса, пунктов ГФРС и ГГРС-1 с координатами $B, L, \zeta = H - h$ в системе KazCCRS. Для определения нормальных высот и ускорений силы тяжести точек земной поверхности применяются способы нелинейной интерполяции.

Изложенная технология построения KazCG совпадает с технологией создания GCG2011. Это дает основание ожидать, что высоты квазигеоида Казахстана будут близки следующим значениям: 1–2 см на равнине, 3–4 см в предгорной и горной местностях, 4–10 см на акваториях Кас-

пийского моря и внутренних водоемов, а ускорения силы тяжести — 2 мГал на равнинной местности и 7 мГал в предгорной и горной местностях.

Предлагаются следующие этапы работ.

1. Разработка Основных положений по модернизации государственной гравиметрической сети Республики Казахстан. Разработка необходимой нормативной документации.

2. Разработка Научно-технического проекта модернизации государственной фундаментальной гравиметрической сети Республики Казахстан в соответствии с требованиями инструкции [4].

3. Реализация Научно-технического проекта модернизации государственной фундаментальной гравиметрической сети Республики Казахстан.

4. Разработка Технического проекта модернизации государственной гравиметрической сети 1 класса Республики Казахстан в соответствии с требованиями инструкции [4].

5. Реализация Технического проекта модернизации государственной гравиметрической сети 1 класса Республики Казахстан.

6. Разработка технологии построения региональной модели геоида на территорию Республики Казахстан.

7. Построение региональной модели геоида KazCG.

▼ Список литературы

1. Андреев В.К., Джанпейсов 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 // Геопрофи. — № 6-2012, 1-2013.

2. Андреев В.К., Джанпейсов М.Э., Карабалаев Н.Ж., Новиков Е.В., Сагындык М.Ж., Самратов У.Д., Филатов В.Н., Хасенов К.Б., Хвостов В.В. О модернизации государственной нивелирной сети Республики Казахстан // Геопрофи. — 2013. — № 3. — С. 25–29.

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

4. Инструкция по развитию высокоточной государственной гравиметрической сети России. ГКИНП (ГНТА)-04-122-03.

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

6. Машимов М.М. Высшая геодезия. Методы изучения фигуры Земли и создания общеземной системы геодезических координат. — М.: Изд. ВИА, 1991.

7. Федеральное агентство картографии и геодезии ФРГ. — <http://www.bkg.bund.de>.

8. 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».

9. Постановление Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2012 г. № 1463 «О единых государственных системах координат».

RESUME

The present state of the fundamental gravimetric network in Germany, the reference gravimetric network in Russia, gravity reference network of Europe and gravity global monitoring system is considered. Relying on the international and Russian experience, there are given the recommendations how to modernize the state gravimetric network of the Republic of Kazakhstan.