

СОСТОЯНИЕ И АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ГГС РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

В.К. Андреев (НП АГП «Меридиан+»)

Начальник геодезического отдела. Кандидат технических наук.

М.Э. Джанпеисов (Министерство обороны Республики Казахстан)

Начальник Военно-топографического управления Комитета начальников штабов.

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

Старший научный сотрудник. Кандидат технических наук.

М.Ж. Сагындык (РГКП «Казгеодезия» Агентства Республики Казахстан по управлению земельными ресурсами)

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 связи с давно назревшей необходимостью модернизации государственной геодезической сети (ГГС) Республики Казахстан (РК), созданной в советский период в системе координат 1942 г. (СК-42), инициативной группой ученых и специалистов Казахстана и России подняты актуальные вопросы модернизации геодезических сетей в Республике Казахстан с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS. Первое

их обсуждение состоялось 5–8 июня 2012 г., в Астане, на рабочем совещании в Республиканском государственном казенном предприятии «Казгеодезия». Второе обсуждение было проведено 3–4 октября 2012 г. в Усть-Каменогорске, в Восточно-Казахстанском государственном техническом университете им. Д. Серикбаева на ежегодных Машимовских чтениях — Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития го-

сударственной геодезической сети Республики Казахстан».

В статье изложены одобренные указанным рабочим совещанием и научно-технической конференцией основные научно-методические и организационно-технические аспекты модернизации ГГС РК.

▼ **Системы геодезических координат, используемые в Казахстане, России, Украине и Белоруссии**

В соответствии с законом [1] на территории Республики Ка-

захстан постановлением Правительства РК [2] установлены единая государственная система координат, высот, гравиметрических и спутниковых измерений, а также масштабный ряд государственных топографических карт и планов, унаследованные от СССР. По существу ГГС РК является фрагментом ГГС СССР, государственная нивелирная сеть РК — фрагментом государственной нивелирной сети СССР, а государственная гравиметрическая сеть РК — фрагментом государственной гравиметрической сети СССР.

В состав ГГС РК входят:

- астрономо-геодезическая сеть (АГС) 1 и 2 классов;
- геодезическая сеть сгущения (ГСС) 3 и 4 классов.

Плановые координаты пунктов ГГС РК заданы в СК–42, установленной Постановлением Совета министров СССР от 7.04.1946 г. № 760 «О введении единой системы геодезических координат и высот на территории СССР». Системой нормальных высот является Балтийская система высот 1977 г.

В системе координат 1942 г.:

- в качестве исходного принят центр Круглого зала Пулковской обсерватории — пункт Пулково (рис. 1);
- в качестве отсчетной поверхности принят эллипсоид Красовского с параметрами: большая полуось — 6 378 245 м и сжатие — 1/298,3;



Рис. 1
Пункт Пулково



Рис. 2
Кронштадтский футшток

— высота геоида над эллипсоидом Красовского в исходном пункте (нуль Кронштадтского футштока, рис. 2) принята равной нулю.

СК–42 была реализована на территории СССР как сеть из 87 полигонов триангуляции 1-го класса, полностью покрывавших Европейскую часть страны и распространявшихся на восток в виде цепочки полигонов. Сеть триангуляции уравнивалась отдельными блоками. На границе блоков результаты предыдущего уравнивания принимались за безошибочные, и таким образом координаты постепенно передавались все далее на восток. В каркас полигонов 1-го класса вставлялась заполняющая сеть триангуляции 2-го класса. Такой принцип построения сети привел к ее неизбежным деформациям.

Более подробно характеристики СК–42 и этапы ее развития изложены в работе Л.А. Кашина [3].

К 1991 г. построенная на территорию СССР АГС была уравнена как единое целое. Результаты уравнивания подтвердили наличие деформаций в сети, достигавших на севере и на востоке 20–30 м. Локальные деформации на границах блоков иногда составляли 10 м.

Следует признать, что СК–42 безусловно сыграла решающую роль в геодезическом и картографическом обеспечении науки,

экономики и обороны страны. Вместе с тем, в связи с развитием спутниковых технологий и потребностью более точного и оперативного определения координат геодезических пунктов возникла необходимость модернизации ГГС. В развитых странах мира еще в 1980-х гг. начались работы для обеспечения более высокой точности, оперативности и экономической эффективности национальных геодезических сетей.

В Российской Федерации, в связи с развертыванием глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS, также своевременно приступили к модернизации ГГС. По результатам этих работ постановлением Правительства РФ [4] взамен СК–42 была введена новая государственная система координат, получившая название «Система координат 1995 года (СК–95)».

При уравнивании ГГС в СК–95 в состав сети были включены:

- космическая геодезическая сеть (КГС) — 26 пунктов;
- доплеровская геодезическая сеть — 131 пункт;
- АГС — 164 306 пунктов;
- ГСС — 300 000 пунктов.

Координатные оси СК–95 расположены параллельно осям общеземной системы отсчета «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ–90), т. е. связь между этими системами устанавливается только тремя параметрами.

Другое условие реализации СК–95 заключалось в неизменности геодезических координат исходного пункта Пулково, т. е. начало координат геодезической сети в СК–95 было принято таким же, как в СК–42. За отсчетную поверхность был взят референц-эллипсоид Красовского. Общая плотность сети составила 1 пункт на территорию, площадь 50 км². Средняя квадратическая погрешность (СКП) взаимного положения смежных пунктов равнялась 2–4 см, а при расстояниях от 1 до 9 тыс. км — 25–80 см.

Подготовительные работы по переходу в СК–95 были начаты в 1979 г. и завершились по истечении 20 лет.

С самого начала этих работ между представителями научных геодезических школ России разгорелась острая дискуссия. Ряд ведущих ученых и специалистов высказали несогласие с методикой построения и уравнивания ГГС в СК–95. Суть дискуссии изложена в Открытом письме ученых и специалистов РФ (февраль 2000 г.) [5], подписанном генеральным директором Объединенного института физики Земли РАН академиком В.Н. Страховым, заслуженными деятелями науки РФ, профессорами Н.Н. Воронковым и М.М. Машимовым, заместителем начальника Военно-топографического управления ГШ ВС РФ профессором В.Н. Филатовым, генеральным директором Национальной картографической корпорации профессором А.А. Шаравиным и профессором Е.А. Жалковским.

Время, прошедшее с момента перехода на СК–95, показало, что принятая методика действительно оказалась недостаточно продуманной и мало востребованной. Подтверждением этому являются утвержденные приказом Федеральной службы геодезии и картографии России от 17.06.2003 г. № 101-пр основные положения о ГГС РФ [6], в

которых предусмотрены уже новые принципы развития и новая структура государственной геодезической сети, принципиально отличающиеся от СК–95. Таким образом, СК–95 не решила требований, предъявляемых к современному координатному обеспечению РФ в условиях внедрения ГНСС, и снова поставила геодезическую общественность перед необходимостью искать другие, более эффективные методы и решения.

Система СК–95 оказалась мало востребованной не только в России, но и в других странах СНГ.

Так, например, на Украине Постановлением Кабинета министров Украины от 22.09.2004 г. № 1259 «Некоторые вопросы использования геодезических систем координат» введена новая государственная геодезическая система координат УСК–2000.

Структура УСК–2000 следующая:

— Украинская постоянно действующая сеть наблюдений глобальных навигационных спутниковых систем — 44 пункта, СКП взаимного положения — 2 мм;

— АГС 1 класса — 813 пунктов, СКП взаимного положения — 2 см;

— АГС 2 класса — 5586 пунктов, СКП взаимного положения — 2 см;

— АГС 3 класса — 10084 пункта, СКП взаимного положения — 3 см;

— АГС 4 класса — 8174 пункта, СКП взаимного положения — 3 см.

В Республике Беларусь, в соответствии с межгосударственными договоренностями с Российской Федерацией о едином координатном пространстве, Указом Президента Республики Беларусь № 200 от 23.04.2007 г. «О некоторых вопросах в области геодезии и картографии» установлено, что с 1 января 2010 г. при выполнении геоде-

зических и картографических работ на территории страны применяется государственная система геодезических координат СК–95.

К моменту принятия этого указа были созданы: пункт фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) Минск и пункты высокоточной геодезической сети (ВГС), которые изначально рассматривались как составная часть единой спутниковой геодезической сети Республики Беларусь и РФ. Оценка точности определения координат пунктов ФАГС и ВГС и результаты предварительного уравнивания созданных фрагментов ГГС-1 в ITRS показали, что точность спутниковых геодезических сетей выше, чем точность АГС, реализованной в СК–95.

Стало очевидно, что введение СК–95 ведет к потере точности ФАГС и ВГС и не позволяет использовать все преимущества спутниковых технологий для решения фундаментальных и прикладных задач геодезии. Для устранения указанного противоречия было найдено научно-техническое решение, предусматривающее вычисление на территорию Республики Беларусь единых локальных параметров связи СК–95 и ITRF2005. Полученная таким образом геодезическая основа была названа «СК–95 Республики Беларусь».

Реалии сегодняшнего дня таковы, что «СК–95 Республики Беларусь» не может в полной мере удовлетворять современным требованиям, предъявляемым к государственной координатной основе, поскольку заявленная точность реализации СК–95 ниже, чем точность реализации ITRS, вследствие чего точность спутниковых сетей будет снижена при вычислении координат пунктов сетей в СК–95.

В 2000 г. в России введена в действие система геодезических параметров «Параметры

Земли 1990 года» (ПЗ–90). «Параметры Земли 1990 года» являются системой взаимосогласованных геодезических параметров, включающих фундаментальные геодезические постоянные, параметры общеземного эллипсоида, параметры гравитационного поля Земли, государственную геоцентрическую (общеземную) систему координат и параметры ее связи с другими системами координат.

Значения геодезических параметров определялись из совместной обработки разнородных спутниковых и наземных данных. Методологической основой обработки измерений служил спутниковый динамический метод.

По определению общеземная система координат является геоцентрической пространственной прямоугольной системой координат с началом в центре масс Земли [7, 8]. Ось Z направлена к Условному земному полюсу, как определено рекомендациями Международной службы вращения Земли (IERS), ось X — в точку пересечения плоскости экватора и начального меридиана, установленного Международным бюро времени (BIPM), ось Y дополняет систему до правой.

В геоцентрической системе координат положение точки в пространстве определяется значениями координат X, Y, Z. В геодезических приложениях для этой же цели используются геодезические координаты B, L, H, относящиеся к общеземному эллипсоиду. При этом центр общеземного эллипсоида совпадает с центром масс Земли, его малая полуось (ось вращения) совмещена с осью Z, а оси X и Y расположены в плоскости экватора так, что ось X проходит через начальный меридиан.

Постановлением Правительства РФ [4] геоцентрической системе координат, входящей в систему геодезических параметров «Параметры Земли 1990

года» (ПЗ–90), был придан статус государственной при решении навигационных задач и задач геодезического обеспечения орбитальных полетов. Постоянно растущие потребности практики и, в первую очередь, широкое использование навигационной и геодезической аппаратуры потребителя ГЛОНАСС/GPS привели к необходимости регулярного повышения точности определения параметров, характеризующих форму, размеры и гравитационное поле Земли, модернизации всей системы геодезических параметров (СГП) Земли.

Первая модернизация СГП «Параметры Земли 1990 года» была выполнена в 2002 г. и получила название ПЗ–90.02 — «Параметры Земли 1990 года» на эпоху 2002.0 (это означает, что параметры определены на 0 часов 0 минут 1 января 2002 г.) [9]. Для этих целей использовался большой объем измерительной информации космического геодезического комплекса ГЕОИК, собранной после 1990 г. и не вошедшей в обработку при выводе ПЗ–90, а также высокоточные измерения на пунктах КГС, полученные с использованием аппаратуры ГЛОНАСС/GPS. Было достигнуто существенное повышение точности установления государственной геоцентрической системы по сравнению с начальной версией.

Распоряжением Правительства РФ [10] ПЗ–90.02 была введена в действие в целях повышения тактико-технических характеристик ГЛОНАСС, улучшения геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач. Там же было дано указание на продолжение работ по дальнейшему уточнению государственной геоцентрической системы координат, обеспечению функционирования и развития пунктов КГС, закрепляющих эту систему координат на местности.

Новое уточнение ПЗ–90.02 было выполнено в 2011 г. (ПЗ–90.11) с использованием большого объема высокоточных измерений на пунктах КГС, полученных с использованием аппаратуры ГЛОНАСС/GPS, и доплеровских измерений системы DORIS с ряда пунктов, расположенных рядом с пунктами сети Международной геодинамической службы (IGS — International GNSS Service) на удалении до нескольких десятков метров [11].

Состав геодезических параметров, входящих в ПЗ–90.11, определен с учетом практических потребностей геодезии, геофизики, навигации и баллистики в знании фигуры, размеров и гравитационного поля Земли. Для параметров, которые не уточнялись при выводе ПЗ–90.11, были приняты значения ПЗ–90.02. Значения универсальных физических постоянных, использовавшихся при выводе ПЗ–90.11, приведены в табл. 1.

Геодезическая отсчетная система базируется на теории уровня эллипсоида, которая однозначно определяет фигуру общеземного эллипсоида и нормальное гравитационное поле посредством четырех независимых параметров — фундаментальных геодезических постоянных (табл. 2).

В некоторых приложениях используется значение геоцентрической гравитационной постоянной fM' , полученной без учета массы атмосферы Земли. Такое значение определяется из соотношения:

$$fM' = fM - fMa,$$

где fMa — составляющая геоцентрической гравитационной постоянной, обусловленная наличием атмосферы ($fMa = 0,3500 \text{ км}^3/\text{с}^2$ с СКП $0,0008 \text{ км}^3/\text{с}^2$).

Государственная геоцентрическая (общеземная) система координат, входящая в состав ПЗ–90.11, является практиче-

кой реализацией СГП «Параметры Земли 1990 года» на эпоху 2011.0. Она закреплена глобально распределенными пунктами (включая пункты КГС), координаты и скорости движения которых определены из обработки спутниковых измерений. Точность установления общеземной системы координат ПЗ–90.11 относительно центра масс Земли характеризуется СКП на уровне 0,05 м, а для направления осей системы координат — на уровне 0,001". Точность определения масштаба системы координат соответствует современному уровню знаний о значениях скорости света, геоцентрической гравитационной постоянной, а также точности лазерных спутниковых дальномеров, которая характеризуется СКП 0,001–0,005 м.

Система координат ПЗ–90.11 распространена на пункты сети IGS на территории России.

Аналогами ПЗ–90 служат мировая геодезическая система (WGS–84) и ITRS, поддерживаемая Международной службой вращения Земли.

При установлении общеземных систем координат ПЗ–90, WGS–84 и ITRS использовались одни и те же теоретические положения. Однако при практической реализации этих положений между указанными системами координат обнаруживаются небольшие расхождения, которые могут быть объяснены различием в составе и объеме использованной измерительной информации и применяемых методиках.

Аномальная составляющая гравитационного поля Земли (ГПЗ) в ПЗ–90.11 представлена тремя планетарными моделями в виде полностью нормированных коэффициентов разложения потенциала силы притяжения в ряд по сферическим функциям до 70-й степени (ПЗ–2002/70с и ПЗ–2002/70) и до 360-й степени (ПЗ–2002/360). Модель гравитационного поля Земли

Универсальные физические постоянные ПЗ–90.11

Таблица 1

Наименование	Значение	СКП
Скорость света в вакууме c , м/с	299 792 458	—
Гравитационная постоянная f , м ³ /(кг с ²)	6,67259×10 ⁻¹¹	3,0×10 ⁻¹⁵

Фундаментальные геодезические постоянные ПЗ–90.11

Таблица 2

Наименование	Значение	СКП
Геоцентрическая гравитационная постоянная (с учетом атмосферы) fM , км ³ /с ²	398 600,4418	8×10 ⁻⁴
Угловая скорость вращения Земли ω , рад/с	7,292 115×10 ⁻⁵	—
Размер большой полуоси эллипсоида a , м	6 378 136,0	0,5
Сжатие эллипсоида α	1/298,25784	3,4×10 ⁻⁹

Примечания:

— данные о неравномерности вращения Земли публикуются в бюллетене «Всемирное время и координаты полюса»;

— параметры a и α , определяющие форму общеземного эллипсоида, сохранены неизменными по отношению к ПЗ–90 и ПЗ–90.02.

ПЗ–2002/70с получена спутниковым динамическим методом в процессе одновременного уточнения параметров априорной модели ГПЗ и геоцентрических координат пунктов, с которых выполнялись траекторные измерения. Эта модель рекомендуется для орбитальных и траекторных расчетов. Модели аномального ГПЗ ПЗ–2002/70 и ПЗ–2002/360 получены из совместной обработки модели ПЗ–2002/70с и глобального каталога средних аномалий силы тяжести по трапециям 30'×30'.

В ряде практических приложений удобно использовать модели в виде потенциала притяжения точечных масс. Такая планетарная модель аномального ГПЗ в виде потенциала притяжения 60 точечных масс (ТМ-60) получена аппроксимацией возмущающего потенциала, представленного 14-ю гармониками спутниковой модели ГПЗ ПЗ–2002/70с.

Численно-аналитические модели аномального ГПЗ (ПЗ–2002/70с, ПЗ–2002/70, ПЗ–2002/360 и ТМ-60) позволяют рассчитывать любые трансформанты возмущающего потенциала на поверхности Земли

и во внешнем пространстве. Аномальное ГПЗ на поверхности Земли в пределах ограниченной области более детально представляется цифровыми моделями его трансформант: аномалий силы тяжести, высот квазигеоида и уклонений отвесных линий. Цифровые модели согласованы с параметрами нормального гравитационного поля Земли.

Мировые геодезические системы координат

Общепризнанной международной земной системой отсчета координат является ITRS (International Terrestrial Reference System), а ее реализацией — ITRF (International Terrestrial Reference Frame) — международная земная отсчетная основа. ITRF реализуется координатами опорных точек, жестко связанных с литосферой Земли.

Пункты ITRF располагают на значительном расстоянии от границ тектонических плит и разломов. Наблюдения на каждом пункте рекомендуется проводить непрерывно в течение трех лет.

Установлены три класса точности пунктов ITRF. К классу А отнесены пункты, СКП по каж-

дой из трех координат которых не превышает 1 см на исходную эпоху. К классу В отнесены пункты также с точностью 1 см, но при отнесении координат к эпохе наблюдений. Пункты класса С имеют СКП не более 5 см при условиях, выполняемых для класса А. Точность измерений должна позволять определять скорость перемещения литосферных плит до 0,5 мм/год.

Сеть ITRF2000 содержит более 800 станций, расположенных на около 500 пунктах. Для реализации ITRF2000 использовались трехлетние наблюдения РСДБ (радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами), лазерной локации спутников и Луны, GPS и DORIS. Поскольку для определения отдельных характеристик основы подходят различные методы наблюдений, для установления масштаба выбрана комбинация РСДБ и лазерной локации спутников. Ориентировка основы согласована с предыдущей реализацией ITRF97, а скорость ее изменения выбрана по условию отсутствия вращения отсчетной основы по отношению к литосфере Земли. Для этого скорость вращения была согласована с геологической тектонической моделью NNR-NUVEL-1A, а в совместном решении параметры изменения ориентировки определялись по пунктам, расположенным вдали от границ тектонических плит и зон деформации. Для привязки ITRF2000 к центру масс Земли (геоцентру) использовались лазерные наблюдения спутника LAGEOS. При обработке моделировалась только линейная эволюция геоцентра, но в будущих реализациях планировалось также включать его периодические изменения.

Система ITRF2005 была выпущена в 2007 г. В нее входит около 608 станций, расположенных на 338 пунктах, размещенных по всему миру. Версия ITRF2008

появилась в 2010 г. Она закреплена сетью из 934 станций, расположенных на 580 пунктах, из них 463 пункта — в Северном полушарии и 117 — в Южном полушарии.

Кроме отсчетных основ ITRF, реализуемых Международной службой вращения Земли, известны и другие, задаваемые преимущественно теми же станциями, что и в ITRF, но расположенными на ограниченной территории. К ним относится отсчетная основа EUREF (European Reference Frame), созданная и поддерживаемая Европейской подкомиссией Международной ассоциации геодезии (IAG). Основная сеть из 93 фундаментальных пунктов была измерена с помощью GPS в течение мая 1989 г. Позднее она была расширена до 150 постоянно действующих станций GPS-наблюдений. EUREF представляет собой единую систему на всю Европу, которая согласована с WGS-84 и ITRF. Полученная система отсчета координат известна как ETRS-89, для ряда целей она может рассматриваться как реализация WGS-84 в Европе. Многие страны адаптируют пункты EUREF как сеть «нулевого» класса, от которой они расширяют национальные сети.

В Южной Америке реализована подобная система отсчета координат SIRGAS, в Австралии — GDA94, в США и Канаде — NAD83 (CORS96).

▼ Список литературы

1. Закон Республики Казахстан от 3 июля 2002 г. № 332 «О геодезии и картографии».
2. 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».
3. Кашин Л.А. Построение классической астрономо-геодезической сети России и СССР (1816–1991 гг.). Научно-технический и исторический обзор. — М.: Картгеоцентр — Геодезиздат, 1999.
4. Постановление Правительства Российской Федерации от 28 июля 2000 г. № 568 «Об установлении единых государственных систем координат».
5. Открытое письмо ученых и специалистов Российской Федерации исполняющему обязанности Президента Российской Федерации, Председателю Правительства Российской Федерации // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. — 2000. — № 3(25).
6. Основные положения о государственной геодезической сети Российской Федерации. ГКИНП (ГНТА)-01-006-03. — М.: ЦНИИГА-ИК, 2004.
7. Система геодезических параметров Земли «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90). Справочный документ / Под общей ред. В.В. Хвостова. — М.: Координационный научно-информационный центр, 1998.
8. ГОСТ Р 51794-2008. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек.
9. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.02). — М.: ВТУ ГШ ВС РФ, 2006.
10. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20 июня 2007 г. № 797-р «Об использовании уточненной версии государственной геоцентрической системы координат «Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.02)».
11. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11). Проект. — М.: ВТУ ГШ ВС РФ, 2011.

Окончание следует

RESUME

A group of scientists and specialists from Kazakhstan and Russia raised topical issues of the state geodetic network modernization in the Republic of Kazakhstan with the use of the global navigation satellite system GLONASS and GPS. The first part of the article is devoted to the analysis of the both contemporary state and prospects for the development of the available geodetic coordinate systems in Kazakhstan, Russia, Ukraine and Byelorussia.