

О ЕДИНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КООРДИНАТНОЙ ОСНОВЕ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

В.К. Андреев (ОАО «Атомэнергопроект»)

В 1983 г. окончил геодезический факультет Военно-инженерной академии им. В.В. Куйбышева по специальности «астрономо-геодезия». Затем работал в Военно-инженерной академии им. В.В. Куйбышева, с 2004 г. — в НП АГП «Меридиан+». С 2014 г. работает в АО «Атомэнергопроект», в настоящее время — главный специалист. Кандидат технических наук.

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

В 1978 г. окончил геодезический факультет Военно-инженерной академии им. В.В. Куйбышева по специальности «астроном-геодезист». После окончания академии работал в 29-м НИИ МО СССР (РФ), с 1998 г. — в Роскартографии, с 2001 г. — в Мослифте. С 2006 г. работает в 27-м Центральном НИИ МО РФ, в настоящее время — старший научный сотрудник. Кандидат технических наук.

У.Д. Самратов (НП АГП «Меридиан+»)

В 1962 г. окончил землеустроительный факультет Омского сельскохозяйственного института по специальности «инженерная геодезия». Работал на руководящих должностях в системе МСХ СССР, ГУГК СССР, с 1990 г. — в системе Госкомзема России (Росземкадастра), с 2005 г. — во ВНИИАС МПС России (ОАО «НИИАС»). С 2009 г. работает в ООО «НП АГП «Меридиан+», в настоящее время — советник генерального директора. Кандидат технических наук. Лауреат премии им. Ф.Н. Красовского.

В.В. Хвостов (НП АГП «Меридиан+»)

В 1967 г. окончил Ленинградское военно-топографическое училище, а в 1977 г. — геодезический факультет Военно-инженерной академии им. В.В. Куйбышева по специальности «инженер-геодезист». Проходил службу в Вооруженных силах СССР и РФ. С 1992 г. по 2001 г. — начальник ВТУ ГШ — начальник ВТС ВС РФ. С 2002 г. работал в ФГУП «Госземкадастрсъемка» — ВИСХАГИ. С 2012 г. работает в ООО «НП АГП «Меридиан+», в настоящее время — советник генерального директора. Кандидат технических наук. Лауреат Государственной премии РФ.

В статьях [1–3], посвященных модернизации системы государственного геодезического обеспечения Республики Казахстан (РК), в качестве единой пространственной координатной системы отсчета была предложена Казахстанская пространственная геодезическая референцная система KazSGRS (Kazakhstan Spatial Geodetic Reference System), составленная из двух независимых компонентов: Казахстанской геодезической референцной системы KazGRS (Kazakhstan Geodetic Reference

System) и Казахстанской высотной референцной системы KazVRS (Kazakhstan Vertical Reference System). В данной статье дается обоснование указанного предложения.

Однако, чтобы перейти к такому обоснованию, следует дать пояснения к некоторым сравнительно новым терминам, введенным международным стандартом ISO 19111:2003 «Geographic Information — Spatial Referencing by Coordinates» и российским стандартом ГОСТ Р 52576–2006 «Географические информаци-

онные системы. Координатная основа. Общие требования», гармонизированным с международным стандартом в части определения координатных систем отсчета и основных операций с координатами.

Необходимо сразу же отметить, что в РК подобный национальный стандарт пока отсутствует. Поэтому предлагается пользоваться терминами международного и российского стандартов, в дальнейшем адаптируя их к условиям РК, тем более что РК является полноправным членом Международ-

ной организации по стандартизации ISO (International Standard for Organization).

Единая пространственная координатная система отсчета KazSGRS состоит из двух компонентов (рис. 1):

— KazGRS, которая служит для описания местоположения объекта с использованием системы прямоугольных геоцентрических координат X, Y, Z или системы геодезических координат B, L, H , где B — геодезическая широта, L — геодезическая долгота, H — геодезическая высота, отсчитываемая от поверхности эллипсоида, а также системы плоских прямоугольных координат x, y в проекции Гаусса-Крюгера (на эллипсоиде ПЗ-90);

— KazVRS, которая служит для описания высотного положения объекта с использованием нормальных высот H^v , отсчитываемых от поверхности квазигеоида.

Реализацией этих координатных систем отсчета является Казахстанская пространственная геодезическая референцная основа KazSGRF (Kazakhstan Spatial Geodetic Reference Frame), представляющая совокупность геодезических пунктов (реперов), соответствующих им значений геодезических координат и

нормальных высот и состоящая из:

— Казахстанской геодезической референцной основы KazGRF (Kazakhstan Geodetic Reference Frame) как совокупности геодезических пунктов и соответствующих им значений геодезических координат и высот, а также плоских координат в проекции Гаусса-Крюгера;

— Казахстанской высотной референцной основы KazVRF (Kazakhstan Vertical Reference Frame) как совокупности высотных пунктов (реперов) и соответствующих им значений нормальных высот.

Нормальные высоты передаются от исходной точки (в России от нуля-пункта Кронштадтского футштока) на определяемые пункты методом геометрического нивелирования.

Связь между геодезической H и нормальной H^v высотами устанавливается соотношением:

$$H = H^v + \zeta,$$

где ζ — высота квазигеоида. Геодезические высоты и высоты квазигеоида отсчитываются от поверхности референц-эллипсоида.

Для формирования координатной системы отсчета важное значение имеет выбор того или иного референц-эллипсоида. В доспутниковую эпоху распрост-

ранение имели региональные референц-эллипсоиды, наилучшим образом подобранные для того или иного региона Земли: Деламбера (1800 г.), Бесселя (1841 г.), Кларка (1886 г.), Хейфорда (1910 г.), Красовского (1940 г.) и др. [4].

С развитием спутниковых технологий получили распространение общеземные координатные системы отсчета, включающие параметры общеземного эллипсоида и гравитационного поля Земли, геодезические даты, описывающие связь координатной системы с Землей.

В декабре 1979 г. на XVII Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) была рассмотрена и одобрена геодезическая референцная система GRS80 (Geodetic Reference System 1980), разработанная Международной ассоциацией геодезии IAG (International Association of Geodesy) [5].

При этом было признано, что наиболее удобным геометрическим телом для модели Земли, получившей название Нормальной Земли, является общеземной уровенный эллипсоид. Ее гравитационный потенциал (потенциал тяжести) называют нормальным потенциалом.



Рис. 1

Блок-схема Казахстанской пространственной геодезической референцной системы KazSGRS

Условиями для выбора параметров Нормальной Земли являются следующие.

1. Центр масс и ось вращения Нормальной Земли совпадают, соответственно, с центром масс и осью вращения реальной Земли.

2. Угловая скорость вращения эллипсоида и реальной Земли совпадают.

3. Масса эллипсоида равна массе Земли.

4. Зональный коэффициент разложения потенциала второй степени реальной Земли равен соответствующему коэффициенту Нормальной Земли.

В настоящее время в широко известных геоцентрических координатных системах отсчета используются различные общеземные эллипсоиды.

С 1984 г. в глобальной системе позиционирования GPS (США) используется так называемая всемирная геодезическая система WGS-84 (World Geodetic System 1980) с одноименным общеземным эллипсоидом WGS84.

Международной службой вращения Земли IERS (International Earth Rotation Service) совместно с Международным астрономическим союзом IAU (International Astronomical Union) и Международным союзом геодезии и геофизики IUGG в 1991 г. рекомендованы международная земная референцная система ITRS (International Terrestrial Reference System) (и ее реализация ITRF). Для целей геодезии в этой системе используется общеземной эллипсоид GRS80.

Для решения аналогичных задач с использованием глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС (Россия) разработана и введена в действие геоцентрическая координатная система отсчета под названием «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90), включающая параметры общеземного эллипсоида и гравитационного поля Земли, а также исходные геодезические даты.

▼ **Геоцентрическая координатная система отсчета ПЗ-90**

Постановлением Правительства РФ от 28 июля 2000 г. № 568 геоцентрической координатной системе отсчета ПЗ-90 был придан государственный статус и рекомендовано использовать ее для решения навигационных задач и задач геодезического обеспечения орбитальных полетов.

Постоянно растущие требования к точности навигационного обеспечения, широкое использование двухсистемной навигационной и геодезической аппаратуры потребителя ГЛОНАСС/GPS привели к необходимости регулярного повышения точности определения параметров, характеризующих форму, размеры Земли и ее гравитационное поле, модернизации всей системы геодезических параметров Земли.

Первая модернизация ПЗ-90 была реализована в 2002 г. с использованием большого объема измерительной информа-

| Фундаментальные физические и геодезические постоянные | | | Таблица 1 |
|--|-------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| Фундаментальные физические и геодезические постоянные | Обозначение | Единица измерения | Значение |
| Скорость света в вакууме | c | м/с | 299 792 458 |
| Универсальная гравитационная постоянная | f | м ³ /(кг с ²) | 6,67259x10 ⁻¹¹ |
| Геоцентрическая гравитационная постоянная (с учетом атмосферы) | fM | м ³ /с ² | 398600,4418x10 ⁹ |
| Угловая скорость вращения Земли | ω | рад/с | 7,292115x10 ⁻⁵ |

| Значения основных параметров наиболее распространенных общеземных референцных систем | | | | | Таблица 2 |
|--|---|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------|
| Наименование параметра | Наименование общеземной референцной системы | | | | |
| | GRS80 (IUGG) | ITRS (IERS) | WGS-84 (NIMA) [7] | ПЗ-90 (МО РФ) | |
| Размер большой полуоси эллипсоида a (м) | 6 378 137,0 | 6 378 137,0 | 6 378 137,0 | 6 378 136,0 | |
| Сжатие эллипсоида α | 1/298,257222101 | 1/298,257223563 | 1/298,257223563 | 1/298,25784 | |
| Коэффициент второй зональной гармоники J2 | 1,08263x10 ⁻³ | 1,08263x10 ⁻³ | 1,08263x10 ⁻³ | 1,08262575x10 ⁻³ | |

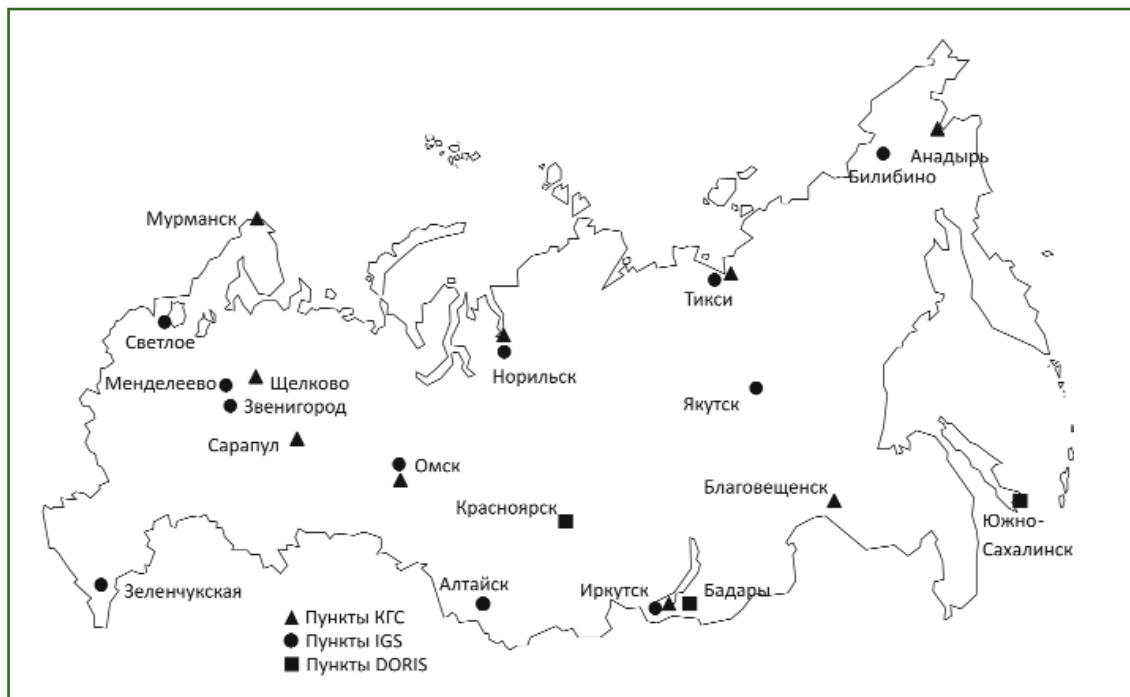


Рис. 2

Схема расположения пунктов КГС, IGS и DORIS на территории РФ [6]

ции, полученной с космического геодезического комплекса «ГЕО-ИК», не вошедшей в обработку при выводе ПЗ–90, и высокоточных измерений на пунктах космической геодезической сети (КГС), выполненных с помощью аппаратуры ГЛОНАСС/GPS. Было достигнуто существенное повышение точности определения параметров геоцентрической координатной системы отсчета ПЗ–90, точности геодезической привязки измерительных средств наземного комплекса управления ГЛОНАСС, расчета эфемерид космических аппаратов ГЛОНАСС.

Распоряжением Правительства РФ от 20 июня 2007 г. № 797-р была введена в действие уточненная версия ПЗ–90.02 для продолжения совершенствования тактико-технических характеристик ГЛОНАСС, улучшения геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач.

Последнее уточнение ПЗ–90.11 было выполнено в 2011 г. с использованием боль-

шого объема высокоточных измерений с пунктов КГС и ряда пунктов Международной сети ГНСС IGS (International GNSS Service). Постановлением Правительства РФ от 28 декабря 2012 г. № 1463 подтвержден государственный статус геоцентрической координатной системы отсчета «Параметры Земли 1990 года» ПЗ–90.11 и рекомендовано продолжить ее использование для геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач [6]. Параметры a и α , определяющие форму общеземного эллипсоида в версии ПЗ–90.11, сохранены неизменными относительно соответствующих параметров ПЗ–90 и ПЗ–90.02.

В табл. 1 и 2 приведены фундаментальные физические и геодезические постоянные, а также основные параметры наиболее распространенных общеземных координатных систем отсчета.

ПЗ–90.11 является уточненной версией на эпоху 2010.0. Она закреплена глобально рас-

пределенными пунктами КГС, координаты и скорость движения которых определены из обработки спутниковых измерений. Ее начало отсчета (центр масс Земли) характеризуется средней квадратической погрешностью (СКП) 0,05 м, а направления осей координат определены с точностью 0,001". СКП взаимного положения пунктов КГС составляет 0,005–0,01 м. Точность определения масштаба ПЗ–90.11 соответствует современному уровню знаний о значениях скорости света, геоцентрической гравитационной постоянной, а также точности лазерной локации, СКП которых равна 0,001–0,005 м.

ПЗ–90.11 распространена и на ряд пунктов IGS. На рис. 2 показана схема размещения пунктов КГС, IGS и DORIS на территории РФ.

При разработке геоцентрических координатных систем ПЗ–90, WGS–84 и ITRS использовались одни и те же теоретические положения. Однако в процессе практической реализации между указанными сис-

Погрешности глобальных моделей геоида

Таблица 3

| Наименование характеристики | Наименование модели геоида | | | |
|---|----------------------------|---------|---------|---------|
| | EGM96 | EGM2008 | GA02008 | GPM98ar |
| Степень разложения геопотенциала | 360 | 2190 | 359 | 720 |
| Систематическая поправка модели, м | -0,04 | +0,08 | +0,14 | +0,33 |
| Размах колебаний высоты геоида, м | +26,78 | +27,15 | +27,35 | +27,21 |
| | -24,77 | -24,96 | -24,91 | -24,67 |
| Размах переменной части поправок в высоту геоида, м | +0,68 | +0,41 | +0,36 | +1,23 |
| | -1,66 | -1,36 | -1,23 | -2,27 |
| СКО модели, м: | | | | |
| — по территории РФ | 0,59 | 0,35 | 0,32 | 0,66 |
| — на участке размером 70x70 км | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,06 |

Примечание. Результаты, приведенные в таблице, получены на основе наблюдений, выполненных на 69 пунктах государственной нивелирной сети, простирающейся от Санкт-Петербурга до Владивостока.

темами обнаружались небольшие расхождения, которые можно объяснить различием в составе и объеме использованной измерительной информации и разными методами обработки.

Был выполнен анализ сходимости результатов вычисления координат с использованием указанных координатных систем отсчета. Результаты анализа показали, что линейные элементы трансформирования координат из ПЗ-90.11 в ITRF-2008 не превышают 3 мм при СКП 2 мм по каждой координатной оси, а по угловым элементам не более 0,00004" при СКП 0,00004", т. е. применение обеих систем дает практически одинаковые результаты.

▼ Глобальные модели геоида

Геоид (квазигеоид) является поверхностью, относительно которой ведется отсчет высот над уровнем моря. Фигура геоида зависит от распределения масс и плотностей в теле Земли. Она не имеет точного математического выражения и является практически неопределимой, поэтому в России, ФРГ и ряде других стран при проведении геодезических измерений вместо геоида используется его приближение — квазигеоид,

предложенный М.С. Молоденским. Квазигеоид, в отличие от геоида, однозначно определяется по результатам геодезических измерений, совпадает с геоидом на территории Мирового океана и очень близок к геоиду на суше, отклоняясь лишь на несколько сантиметров на равнинной местности и не более чем на 2 м в горах.

Для практических целей особую ценность представляет информация о высоте геоида, которая необходима для согласования геодезической системы счета высот, используемой в спутниковой геодезии, с нормальной системой счета высот, используемой в традиционной геодезии. Несмотря на предпринимаемые усилия, глобальные модели геоида не дают однозначного представления о реальной поверхности геоида, на конкретных участках территории не исключают систематического смещения и случайных отклонений. Статистика погрешностей глобальных моделей геоида, полученная путем комбинации геодезических спутниковых измерений и данных нивелирования, приведена в табл. 3. Согласно этим данным, на территории РФ СКП нормальных высот с использованием глобальных моделей геоида

составляет 0,3–0,7 м. На локальных участках после устранения погрешностей систематического характера СКП нормальных высот по моделям геоида снижается до 0,06 м.

Сравнение глобальных моделей гравитационного поля Земли показывает, что модель GA02008, разработанная в ЦНИИГАиК (в настоящее время — ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД»), по своей точности успешно конкурирует с зарубежными моделями того же поколения.

В то же время использование глобальных моделей геоида не в полной мере отвечает требованиям топографических съемок в крупных масштабах. Поэтому в ряде развитых стран разработаны и внедряются региональные модели геоида (квазигеоида). Так, например, в ФРГ разработана региональная модель квазигеоида GCG2011. Ее высоты варьируют от 34 м на Балтийском море до 50 м на Альпах, а горизонтальный градиент высот составляет 10 см на 1 км.

Модель квазигеоида GCG2011 совмещена с Системой спутникового позиционирования SAPOS. В настоящее время в составе SAPOS функционируют порядка 270 постоянно действующих

щих спутниковых референционных станций, покрывающих всю территорию ФРГ и обеспечивающих определение геодезических координат пространственных объектов в системе ETRS с погрешностью в режиме постобработки в несколько миллиметров, а в режиме реального времени в несколько сантиметров. С использованием модели квазигеоида GCG2011 нормальные высоты можно получить с предельной погрешностью 1–2 см на равнинной местности, 3–4 см в горной местности и 4–10 см на море.

Одной из задач формирования Казахстанской пространственной геодезической референционной системы KazSGRS является разработка высокоточной высотной отсчетной поверхности — региональной модели Казахстанского квазигеоида KazQG (Kazakhstan QuasiGeoid). Модель квазигеоида планируется создавать отдельными блоками, ограниченными опорными узловыми пунктами ФАГС, ВГС и реперами I класса с координатами $B, L, \zeta = H - N$ в системе KazSGRS. Для определения нормальных высот определяемых точек применяются, в основном, способы билинейной интерполяции.

Как видим, изложенная нами технология построения региональной модели Казахстанского квазигеоида KazQG, аналогична технологии создания региональной модели квазигеоида GCG2011 в ФРГ. Очевидно, мы вправе ожидать, что высоты модели квазигеоида KazQG будут получены с аналогичными значениями точности: в лесостепной и степной зоне — 1–2 см, в предгорной и горной местностях — 3–4 см, на акваториях Каспийского моря и внутренних водоемов — 4–10 см.

По нашему мнению, в РК целесообразно:

1. Установить в качестве единой государственной простран-

ственной координатной системы отсчета РК систему KazSGRS взамен устаревшей государственной системы координат СК–42.

2. Принять в качестве референц-эллипсоида единой государственной пространственной координатной системы отсчета РК KazSGRS общеземной эллипсоид, входящий в состав геоцентрической координатной системы отсчета «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ–90.11).

3. Закрепить единую государственную пространственную координатную систему отсчета KazSGRS 7–9 пунктами ФАГС, равномерно размещенными по территории РК, обеспечив на каждом из них продолжительные спутниковые измерения. Совместить с пунктом ФАГС «Астана» исходный пункт системы высот и главный гравиметрический пункт РК.

4. Разработать высокоточную региональную модель Казахстанского квазигеоида, считая это обязательным условием для внедрения технологии спутникового нивелирования, которая позволит значительно сократить объемы трудоемких работ по геометрическому нивелированию, включая нивелирование II–IV классов.

В заключение, авторы хотели бы отметить, что чрезвычайно важно, чтобы все данные о местности, физических полях Земли и природных явлениях, как в региональном, так и в планетарном масштабе обрабатывались и представлялись пользователю в единой пространственной системе координат, распространяемой системой ГЛОНАСС и закрепленной пунктами высокоточной глобальной геодезической сети. Поэтому не только Республике Казахстан, но и всем государствам-членам Евразийского экономического союза (ЕАЭС) целесообразно для создания единого геоинформационного простран-

ства принять геоцентрическую координатную систему отсчета «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ–90.11), включая модель гравитационного поля Земли и связанные с ней параметры общеземного эллипсоида. Другие варианты, предусматривающие иные системы координат и параметры общеземного эллипсоида, следует считать неоправданными, поскольку они могут привести к нарушению единства и совместимости инфраструктуры пространственных данных, необходимой для поступательного развития экономики, обороны и безопасности стран ЕАЭС.

▼ 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. Андреев В.К., Джанпейсов М.Э., Карабалаев Н.Ж., Новиков Е.В., Самратов У.Д., Тажединов Д.Б., Хвостов В.В., Филатов В.Н. О модернизации государственной гравиметрической сети Республики Казахстан // Геопрофи. — 2014. — № 2. — С. 48–53.
4. Машимов М.М. Планетарные теории геодезии. — М.: «Недра», 1982. — 262 с.
5. H. Moritz. Report of Special Study Group of IAG. Fundamental Geodetic Constants, presented at XVII General Assembly of IUGG, Canberra, 1979.
6. Параметры Земли 1990 года (ПЗ–90.11). Справочный документ. ВТУ ГШ ВС РФ, 2014.
7. World Geodetic System 1984 (WGS–84). National Imagery and Mapping Agency. Technical Report 8350.2. 3 January 2000.