

## **ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЕДИНОЙ ГЕОЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ**

**О.В. Денисенко, И.С. Сильвестров, В.Ф. Фатеев, Р.А. Давлатов**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.  
fateev@vniiftri.ru, denisenko@vniiftri.ru,*

*Ключевыми элементами фундаментального геодезического обеспечения государства является государственная геоцентрическая система координат, а также параметры гравитационного поля Земли. В данной статье кратко приведена история развития системы координат на территории России и рассмотрены возможности дальнейшего совершенствования.*

*The key elements of the fundamental geodetic support of the state is the state geocentric coordinate system, as well as parameters of the Earth's gravitational field. This article briefly describes the history of the development of the coordinate system on the territory of Russia and considers the possibilities for further improvement.*

*Ключевые слова: система координат, космическая геодезия, гравитационное поле Земли, квазигеоид, система высокоточных полигонов.*

*Key words: coordinate system, space geodesy, gravitational field of the Earth, quasi-geoid, system of high-accuracy test grounds.*

### **Введение**

Важнейшими элементами фундаментального геодезического обеспечения страны является Государственная геоцентрическая система координат, планетарная модель потенциала гравитационного поля Земли, а также модели геоида и квазигеоида. Они являются фундаментальной основой для обеспечения надежности космических полетов, создания высокоточной космической системы навигации ГЛОНАСС. Кроме того, Государственная система координат используется для создания высокэффективных наземных средств геодезического обеспечения строительства прецизионных инженерных сооружений, поиска и добычи полезных ископаемых, а также для развития новых научных и экспериментальных методов в области физики (общая теория относительности и т.д.). Работы по созданию систем координат велись в России с начала 19 века и в настоящее время продолжают на современном международном уровне.

### **Система координат СК-42**

Первые работы по созданию единой системы координат начались с 1808 г., при создании триангуляции в Московской губернии профессором

астрономии Московского университета Х.В. Гольдбахом (1763–1811 гг.) и геодезистом Депо карт Л. Панснером.

В 1928 г. Главным геодезическим управлением СССР была утверждена единая схема и программа развития государственной триангуляции страны, предложенная Ф.Н. Красовским. В качестве единой картографической проекции для редуцирования поверхности эллипсоида на плоскость и вычисления плоских прямоугольных координат была принята равноугольная картографическая проекция Гаусса — Крюгера. В 1932 г. уравнивание было завершено, новая система координат получила название Пулковской системы 1932 года (СК-32). Однако стало ясно, что новая система координат не удовлетворяет потребностям на тот момент и не может распространяться на территорию всей страны. До 1940 г. координаты пунктов определялись в нескольких не связанных между собой системах координат:

1. Европейская часть страны, в Западной Сибири и в Казахстане — Пулковской системе координат 1932 г.
2. Восточная Сибирь и Дальний Восток — Свободненская система.
3. Средняя Азия — Ташкентская.
4. Камчатка — Петропавловская СК 1936.
5. Калымо-Индибирский район — Магаданская система координат 1932 г. [1].

Во всех перечисленных системах координат был принят эллипсоид Бесселя (1841 г.) со следующими параметрами:  $a = 6\,377\,397$  м,  $\alpha = 1/299.15$ . Абсолютные высоты точек определялись от разных уровенных поверхностей, совпадающих с уровнем Балтийского, Черного, Каспийского, Охотского и Японского морей.

Таким образом, одной из главных задач геодезии в 30-х годах прошлого века стала задача разработки единой системы координат с выводом нового эллипсоида. В ЦНИИГАиК в 1940 г. под руководством Ф.Н. Красовского и А.А. Изотова были выведены параметры референц-эллипсоида, наилучшим образом подходящего для территории СССР:

- большая полуось  $a = 6\,378\,245,0$  м;
- экваториальное сжатие  $\alpha = 1/298,3$ .

Эти параметры были приняты для производства всех видов астрономо-геодезических и картографических работ взамен эллипсоида Бесселя. Одновременно проводились работы под руководством М.С. Молоденского по определению высот квазигеоида по данным астрономо-гравиметрического нивелирования. В результате переуравнивания астрономо-геодезической сети с референц-эллипсоидом Красовского была создана система геодезических координат 1942 года (СК-42).

### Система координат СК-63

В 1950–60-х годах в связи с обострившимися внешними политическими отношениями в СССР была создана и массово внедрена в практику специальная искаженная система координат СК-63. Система координат 1963 года (СК-63) — видоизмененная СК-42 — не являлась местной системой координат, так как была создана на всю территорию Советского Союза. СК-63 была предназначена для создания топографических и специальных карт гражданского назначения. Ее отличие от СК-42 состояло только в изменении стандартной разграфки в проекции Гаусса — Крюгера, а также в использовании в северных широтах СССР шестиградусных зон, а в остальной части — трехградусных зон.

Предполагалось, что это будет служить основанием для понижения уровня грифа секретности картографических и геодезических материалов. В СК-63 было создано довольно большое количество топографических и специальных карт гражданского назначения. Система СК-63 просуществовала более 20 лет и в 1988 г. была отменена [2].

### Система координат СК-95

В 1980-х годах заканчивается построение астрономо-геодезической сети СССР. Кроме того, в это время формируется космическая геодезическая сеть (КГС) и доплеровская геодезическая сеть (ДГС) (Главное управление геодезии и картографии). Все это сформировало задачу по комплексному уравниванию измерительной информации на всех этих пунктах.

Для уравнивания использовалась измерительная информация на следующих пунктах (расположение пунктов на рис. 1).

1. Уравненная астрономо-геодезическая сеть (АГС), которая включала 164 306 пунктов 1 и 2 классов.
2. 26 пунктов КГС, координаты которых были получены по фотографическим, доплеровским, дальномерным радиотехническим и лазерным наблюдениям искусственных спутников Земли системы ГЕОИК с СКП 0,3–0,4 м. Система координат КГС является составной частью более широкого набора фундаментальных геодезических параметров, получивших название «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90).
3. 131 пункт ДГС, координаты которых определялись по доплеровским наблюдениям искусственных спутников Земли системы TRANSIT с СКП определения взаимного положения пунктов 0,4–0,6 м [3]. ДГС строилась в своей собственной системе координат WGS-84.
4. Геодезическая сеть сгущения — 300 000 пунктов — созданы методами триангуляции, полигонометрии и трилатерации.

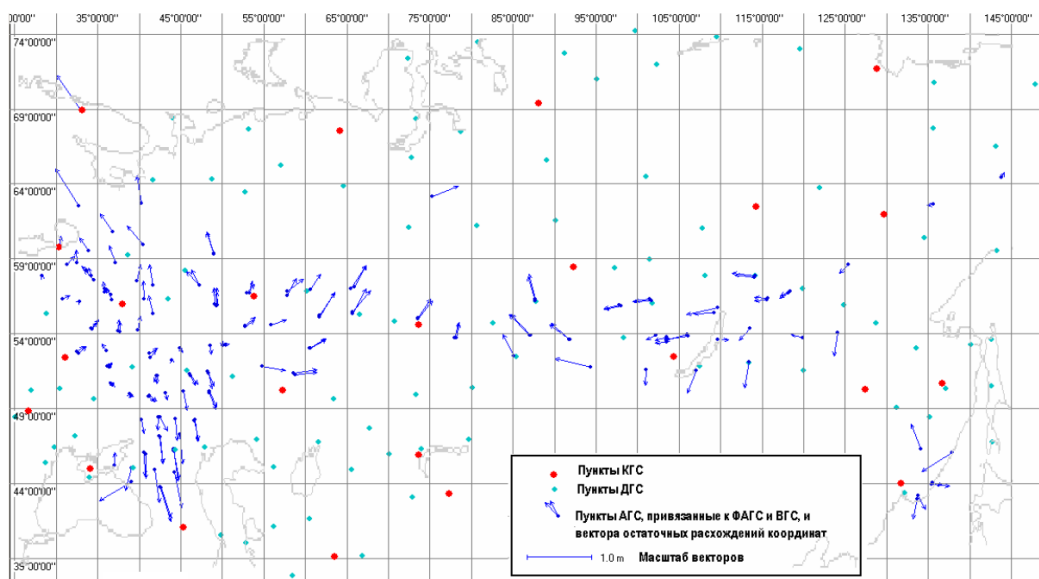


Рис. 1. Схема расположения пунктов КГС, ДГС и АГС

Космическая геодезическая сеть предназначалась для задания геоцентрической системы координат.

Одним из главных критериев формирования системы координат СК-95 было минимальное значение поправок для перехода в СК-42. Это позволило не изменять топографические карты до масштаба 1:50 000 в новую систему координат. В качестве эллипсоида был взят референц-эллипсоид Крассовского, который использовался при выводе СК-42. Направление осей и масштаб референцной системы совпадают с таковыми в упомянутой выше реализации системы координат ПЗ-90, а положение начала системы выбирается так, чтобы в результате координаты пункта Пулковое во вновь создаваемой референцной системе были равны его координатам в системе СК-42. Такому выбору новой референцной системы, получившей название «Система координат 1995 года», соответствуют три параметра связи с ПЗ-90:  $\Delta X = -25,90$  м;  $\Delta Y = +130,94$  м;  $\Delta Z = +81,76$  м.

Геодезические высоты пунктов государственной геодезической сети (ГГС) были определены как сумма нормальной высоты и высоты квазигеоида над отсчетным эллипсоидом, которые определялись непосредственно методами космической геодезии или путем привязки к пунктам с известными геоцентрическими координатами. Таким образом, модель квазигеоида является одним из ключевых элементов системы координат СК-95.

Совершенствование методов космической геодезии, повсеместное внедрение навигационной аппаратуры потребителя, а также появление принци-

появилось много новых задач в области геодинамики, космонавтики, геофизики, сформировало новые требования к государственной системе координат. Система координат СК-95 и существующая сеть ГГС, созданная главным образом традиционными методами геодезии, не могли обеспечить решение новых задач по следующим причинам:

- точность геодезических сетей не отвечала требованиям экономики и обороны страны;
- расположение пунктов опорных геодезических сетей являлось неблагоприятным для использования аппаратуры ГЛОНАСС/GPS;
- места расположения геодезических пунктов значительно усложняли задачу поддержания пунктов в рабочем состоянии.

Таким образом, основная идея совершенствования системы координат заключалась в повсеместном использовании спутниковых технологий. Для определения нормальных высот возможно использование модели квазигеоида и геодезических высот. Кроме того, СК-95 опиралась на референц-эллипсоид Крассовского, что ограничивало решение ряда научных и прикладных задач. Возникла задача разработки и использования общеземного эллипсоида.

Следует отдельно отметить проблемы Государственной нивелирной сети. Система нормальных высот на территории России реализована сетями высокоточного геометрического нивелирования I и II классов, общей протяженностью несколько сотен тысяч км. Они имеют один исходный пункт, размещенный в г. Кронштадте, со значением нормальной высоты равным нулю. Вся сеть нивелирования содержит около тысячи замкнутых полигонов, по которым производится уравнивание сети с опорой на один исходный пункт. Поэтому система нормальных высот на всей протяженности нивелирной сети не имеет дополнительных пунктов контроля, несмотря на то, что территория России имеет береговую линию протяженностью в десятки тысяч км. Эта линия омывается несколькими морями, в каждом из которых расположено по несколько уровневых постов, имеющих высокоточную связь с главной высотной основой. Однако уровень одного моря может отличаться от другого на величину метра и более. Следовательно, уровневые данные не могут быть средствами контроля точности нивелирования [4].

Для согласования нормальных и геодезических высот, получаемых соответственно по данным нивелирования и данным ГЛОНАСС/GPS измерений, необходимо точное знание высот квазигеоида.

### **Система координат ГСК 2011**

После принятия Концепции перехода топографо-геодезического производства на автономные методы спутниковых определений пространствен-

ных координат [5] дальнейшее развитие системы координат заключалось в создании трёхуровневой системы геодезического обеспечения [6].

1. Фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС) включает в себя пункты Роскартографии, КГС, пункты Службы вращения Земли, пункты размещения Квантово-оптической сети (КОС), а также пункты размещения антенн радиointерферометров со сверхдлинной базой (РСДБ). На каждом пункте определяются:

- координаты в геоцентрической системе координат относительно центра масс Земли на основе методов космической геодезии;
- нормальные высоты по программе нивелирования не ниже 2 класса точности;
- абсолютное значение силы тяжести.

2. Высокоточная геодезическая сеть (ВГС) опирается на пункты ФАГС и создается на основе относительных методов космической геодезии. На каждом пункте определяются:

- координаты в геоцентрической системе координат;
- нормальные высоты;
- абсолютное значение силы тяжести.

3. Спутниковая геодезическая сеть 1-го класса (СГС) создается отдельными фрагментами относительными методами космической геодезии. Нормальные высоты определяются из геометрического нивелирования.

4. Пункты АГС и сетей сгущения (около 283 000 пунктов).

Была проделана большая работа, в результате которой точность пунктов ГГС удалось повысить, убрав значительное количество систематических ошибок [7]. Планировалось создать 50 пунктов ФАГС на расстояниях 650–1000 км, 300 пунктов ВГС на расстояниях 150–300 км, 4500 пунктов СГС-1 на расстояниях 25–35 км. В результате на момент 1 января 2016 г. создано: в сети ФАГС — 58 пунктов; в сети ВГС — 331 пункт; в сети СГС-1 — 4354 пункта. На сегодняшний день сеть ФАГС состоит из 63 пунктов, 13 из которых являются периодически наблюдаемыми. Расположение пунктов представлено на рисунке 2. Дальнейшее развитие системы координат заключается в создании новых пунктов, и их количество к 2020 г. должно быть следующим: 80 пунктов ФАГС, 350 пунктов ВГС, 6 000 пунктов СГС-1.

Требование перехода к геоцентрическому эллипсоиду, а также принятие резолюции Генеральной Ассамблеи ООН в феврале 2015 г. о признании важности глобального скоординированного подхода в вопросах использования систем координат «Глобальная геодезическая система координат для устойчивого развития» — «A Global Geodetic Reference Frame for Sustainable Development» [8], подвигли научную общественность на формирование новой структуры Государственной системы координат — ГСК-2011.

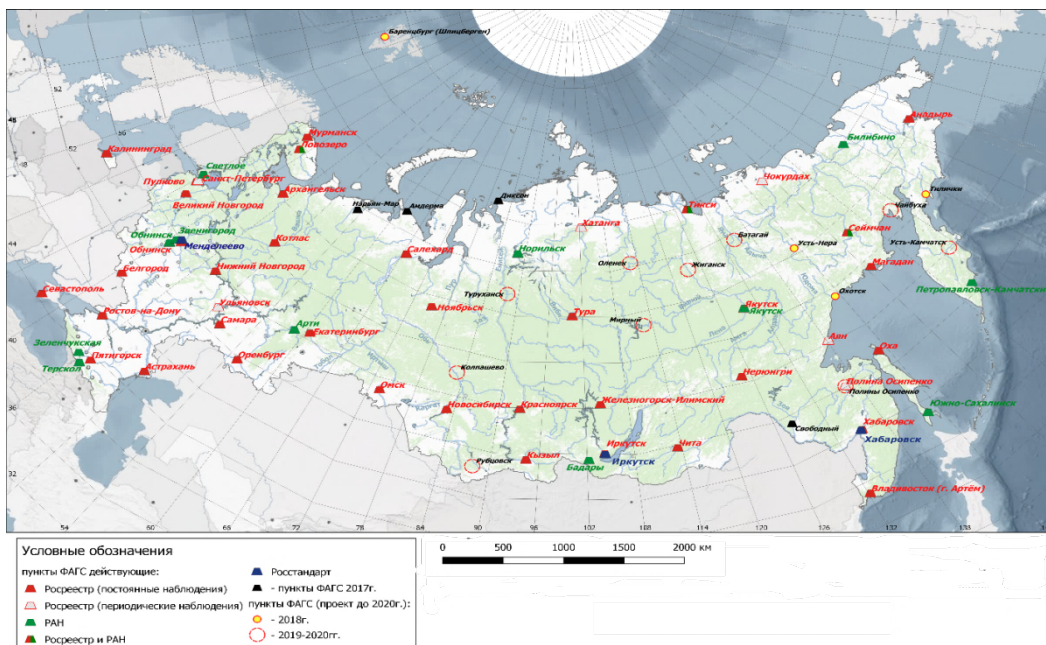


Рис. 2. Расположение пунктов ФАГС на момент 2018 г.

В ГСК-2011 используется эллипсоид, наиболее точно по своим параметрам соответствующий размерам общеземного эллипсоида, принятого Международной службой вращения Земли в качестве поверхности относимости для международных земных систем координат ITRF-2008 [9] и ITRF-2014 [10]. Эллипсоид ГСК-2011 разрабатывался в ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД».

До введения ГСК-2011 исполнители геодезических работ, выполнив спутниковые геодезические измерения, вынуждены были искажать полученные данные, переходя к Государственной системе координат СК-95 (или, тем более, к СК-42), что приводило к снижению точности информации, предоставляемой потребителям. В результате ГСК-2011 практически на порядок точнее по сравнению с СК-95 и на два порядка — по сравнению с СК-42 [11].

В обеспечении ГСК-2011 разрабатывалась модель гравитационного поля в виде разложения потенциала в ряд по сферическим гармоникам. Модель получила название ГАО-2012. В качестве исходных данных согласно [12] использовались:

- гравиметрические данные в виде результатов как площадных, так и маршрутных гравиметрических съемок на суше и в Мировом океане;
- альтиметрические данные, представленные в виде средних аномалий силы тяжести, вычисленных по спутниковым альтиметрическим измерениям.

- ям с искусственных спутников Земли «GEOSAT» и «ERS-1». Результаты обработки выполнены зарубежными организациями;
- данные спутниковой градиентометрии, которые представлены в виде системы коэффициентов модели GOCE. Эти результаты обработки также получены зарубежными организациями;
  - данные анализа возмущений орбит системы «спутник — спутник» космических аппаратов GRACE. Эти результаты обработки также выполнены зарубежными организациями;
  - данные об осредненных высотах рельефа местности, необходимые для перехода от аномалий силы тяжести с редукцией Буге к аномалиям с редукцией Фая и для вычисления поправок за рельеф. Результаты обработки выполнены зарубежными организациями.

В соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 24.11.2016 г. № 1240 «О единых государственных системах координат» [13] с 1 января 2017 г. на территории Российской Федерации ГСК-2011 используется при осуществлении геодезических и картографических работ. Сама система координат имеет дату от 1 января 2011 г.

При использовании системы координат ГСК-2011 следует выделить несколько особенностей.

1. Система координат ГСК-2011 жестко опирается на пункты ФАГС. На эпоху установления ГСК-2011 (1 января 2011 г.) координаты пунктов ФАГС определялись по результатам общего уравнивания сети с опорой на пункты международной службы International GNSS Service (IGS). Всего на всю поверхность Земли были использованы более 40 пунктов, из которых 38 пунктов — российские и 8 пунктов — зарубежные [14]. Учитывая, что в настоящее время сеть IGS насчитывает несколько сотен пунктов, объем измерительной информации, взятый для формирования системы координат ГСК-2011, слишком мал. Кроме того, при выводе этой СК использовалась измерительная информация на интервале всего двух лет [12]. При выводе же международной системы координат ITRF использовалась вся доступная глобальная измерительная информация за значительно больший интервал времени. Кроме того, возникает вопрос точности оценки скоростей смещений пунктов ФАГС на основе измерительной информации за двухлетний период.

2. Обработка измерительной информации выполнялась с использованием зарубежного программного обеспечения BERNESE 5.0. Учитывая современные тенденции по использованию отечественных продуктов и появления отечественных разработок, использование зарубежного ПО для дальнейшего уточнения государственной системы координат является не вполне обоснованным.



3. В настоящее время из всех пунктов ФАГС только 27 являются постоянно действующими, информация с остальных отсутствует по причине того, что одни пункты не введены в эксплуатацию, а другие — относятся к категории «периодически определяемых» пунктов [15]. Существуют локальные области (Московская область, Иркутская область и др.), в которых сосредоточены несколько пунктов ФАГС. В то же время есть пустые области. На сайте сервиса РГС-Центр ЦГКиИПД доступна измерительная информация только с 29 пунктов (рис. 3). Такая сеть пунктов и период набора измерительной информации не соответствуют актуальным требованиям к точности установки и обновления системы координат.

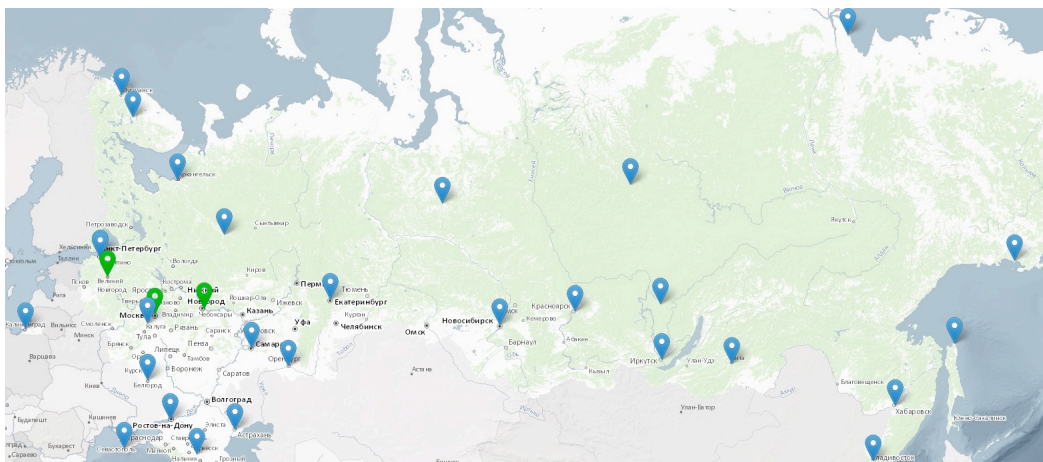


Рис. 3. Расположение пунктов ФАГС, с которых доступна измерительная информация

4. В настоящее время для удовлетворения современным точностным показателям мирового уровня необходимо провести уточнение системы координат ГСК-2011. Согласно мировым тенденциям, обозначенным в Международном проекте Global Geodetic Observation System (GGOS), система координат должна быть привязана к центру масс Земли с погрешностью в миллиметры. Однако, согласно работе [12], погрешность положения пунктов ФАГС относительно центра масс Земли составляет 10–15 см, а погрешность установки всей ГСК-2011 составляет 7 см.

5. Одним из главных особенностей ГСК-2011 является то, что при ее выводе используются в большей степени пункты, расположенные на территории РФ. В то же время, в свободном доступе есть данные с мировой сети пунктов, которые необходимо использовать при выводе высокоточной общеземной системы координат.

6. При разработке отечественной модели гравитационного поля ГАО-2012 использовался готовый результат обработки исходной измерительной

информации, выполненной зарубежными организациями. Это ограничивает возможности контроля исходных данных. Поэтому при разработке новой версии системы координат целесообразно стремиться к обработке «сырых» исходных измерений.

7. Необходимо уточнение модели разложения потенциала ГПЗ ГАО-2012 до показателей общепринятой модели ГПЗ EGM-2008, имеющей степень и порядок 2190.

Таким образом, на основе вышеизложенного можно сделать вывод, что для удовлетворения современному и перспективному мировому уровню точности необходимо уточнение системы координат ГСК-2011 и параметров модели ГПЗ ГАО-2012.

### **Система координат ПЗ-90**

Запуск первого искусственного спутника Земли открыл новую страницу в развитии геодезического обеспечения государства. Это позволило начать разработку космических комплексов для определения геоцентрической системы координат и параметров ГПЗ. Первые значимые результаты были получены в конце 70-х годов методом космической триангуляции с использованием фотокамер для фиксации положения спутника на фоне звезд.

Впоследствии начали обширно применять доплеровские наблюдения за спутниками с использованием бортовых высокостабильных генераторов. Это позволило впервые разработать отечественную спутниковую геоцентрическую систему координат. К середине 1980-х гг. по совокупности гравиметрических, спутниковых и астрономо-геодезических данных была разработана модель ГПЗ до степени и порядка 32 разложения потенциала ГПЗ.

Совершенствование космических измерительных систем и разработка новых алгоритмов измерительной информации позволили разработать модель общеземного эллипсоида, модель ГПЗ и определить координаты пунктов космической геодезической сети с погрешностью 10 м. Все эти параметры были объединены и названы как «Параметры Земли 1985 г.» (ПЗ-85).

С 1985 г. использование специального космического геодезического комплекса ГЕОИК позволило накопить значительный объем измерительной информации путем выполнения доплеровских, дальномерных и радиовысотомерных измерений. Кроме того, использовались радиотехнические и лазерные измерения до спутников системы ГЛОНАСС и калибровочного спутника ЭТАЛОН. К 1989 г. объем измерительной информации стал достаточным для вывода новой версии системы геодезических параметров Земли, названной «Параметры Земли 1990 г.» (ПЗ-90).

Система геодезических параметров ПЗ-90 включает в себя:

- фундаментальные астрономические и геодезические постоянные;
- параметры общеземного эллипсоида;
- координаты пунктов космической геодезической сети с погрешностью 2 м;
- элементы связи с референсными системами координат;
- планетарную модель ГПЗ в виде гармонических коэффициентов разложения потенциала в ряд по сферическим функциям;
- каталог высот квазигеоида [16].

Геоцентрическая система координат ПЗ-90 создана без интеграции с зарубежными геодезическими сетями. Она закрепляется координатами пунктов на территории бывшего СССР. Расположение пунктов представлено на рисунке 4 [17].

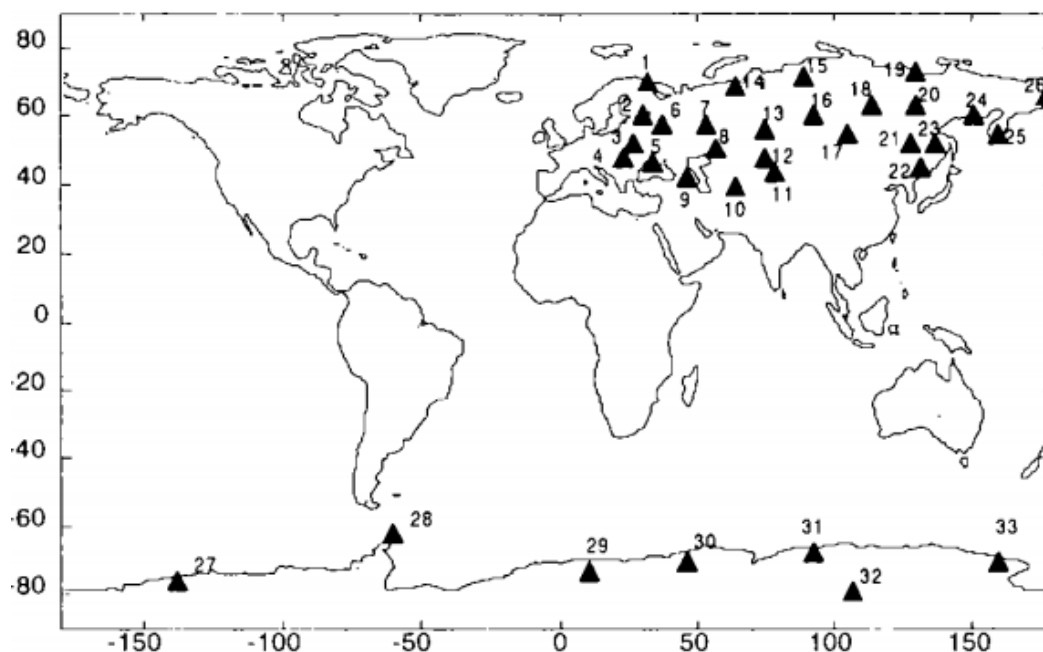


Рис. 4. Расположение пунктов КГС системы координат ПЗ-90

Для создания планетарной модели потенциала ГПЗ (ГПЗ-90) использовались следующие данные [18]:

- дальномерные радиотехнические и лазерные, доплеровские измерения по ГЕО-ИК с наземных пунктов;
- радиовысотомерные измерения ГЕО-ИК за 1985–1989 гг.;

– измерительная информация наземного комплекса управления ГНСС ГЛОНАСС;

– средние аномалии силы тяжести (АСТ) для трапеций размером  $5 \times 5^\circ$ .

В итоге была сформирована модель потенциала ГПЗ в виде гармонических коэффициентов до степени и порядка 36. При работах по выводу ГПЗ-90 в 1993 г. была получена модель ГПЗ.200 в виде гармонических коэффициентов до 200-й степени. В результате был подготовлен и согласован с глобальной моделью ГПЗ-90 каталог АСТ, осреднённых по трапециям размером  $1 \times 1^\circ$ , покрывающим всю поверхность Земли. При этом выполнен гармонический анализ АСТ [19].

Первая модернизация ПЗ-90 рассчитана на дату 2002 года. При этом использовался большой объем информации с космического геодезического комплекса Гео-ИК, полученный при наблюдениях и измерениях с 1991 по 2002 годы бортовой аппаратурой навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС и не вошедший в обработку при выводе ПЗ-90. Наименование системы координат остается прежним: «Параметры Земли 1990 г.». Изменения связаны лишь с уточнением года, на дату которого применялись измерения. В результате аббревиатура выглядит следующим образом: ПЗ-90.02.

Распоряжением Правительства РФ от 20 июня 2007 г. № 797-р была введена в правовое поле ГСК ПЗ-90.02, с помощью которой были улучшены технические характеристики спутниковой навигационной аппаратуры ГЛОНАСС и соответственно повышена точность геодезического обеспечения всех решаемых задач по навигации, баллистике и полетам КА. При этом были приняты следующие параметры общеземного эллипсоида:

– большая полуось — 6 378 136 м;

– коэффициент сжатия эллипсоида —  $1/298,257\ 84$ .

При выводе ПЗ-90.02 использовалась измерительная информация со следующих станций IGS: Арти, Билибино, Звенигород, Зеленчукская, Иркутск, Красноярск, Магадан, Менделеево, Норильск, Петропавловск-Камчатский, Светлое, Тикси, Южно-Сахалинск, Якутск. Это обеспечило связь с международной системой координат ITRF.

Состав геодезических параметров, входящих в ПЗ-90.02, определен с учетом практических потребностей геодезии, геофизики, навигации и баллистики в знании фигуры, размеров Земли и ее гравитационного поля. Для параметров, которые не уточнялись в процессе модернизации ПЗ-90, принимались значения, рекомендованные Международным союзом геодезии и геофизики (IUGG) и Международным астрономическим союзом (IAU).

Аномальная составляющая модели потенциала ГПЗ в системе геодезических параметров ПЗ-90.02 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 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 ПЗ-2002/70 и ПЗ-2002/360 получены на основе совместной обработки модели ПЗ-2002/70с и глобального каталога средних аномалий силы тяжести по трапециям 30'×30' [20].

Помимо цифровой модели ГПЗ в рамках создания ПЗ-90.02 разрабатывались цифровые модели (ЦМ) трансформант ГПЗ, вычисленных в узлах равномерной сетки, образованной меридианами и параллелями. В состав трансформант входят: аномалии силы тяжести, отклонения отвесной линии, высоты квазигеоида [21]. Значения характеристик аномального ГПЗ в промежуточных точках могут быть получены с использованием алгоритмов интерполяции. В большинстве практических приложений ЦМ АГПЗ является достаточным для использования алгоритма билинейной интерполяции.

Уточнение государственной геоцентрической системы координат ПЗ-90.02 выполнено в 2011 г. с использованием большого объема высокоточных измерений системы ГЛОНАСС/GPS с наземных пунктов Космического геодезического комплекса ГЕОиК и ряда пунктов сети IGS. Постановлением правительства РФ от 28 декабря 2012 г. № 1463 система координат ПЗ-90.11 принята в качестве исходной для решения навигационных задач.

В ПЗ-90.11 ориентировка координатных осей, линейный масштаб и положение начала системы координат обеспечили сходимость с аналогичными параметрами Международной земной опорной сети ITRF на сантиметровом уровне. Новым в технологии уточнения геоцентрического положения сети пунктов, закрепляющих систему координат ПЗ-90.11, было включение в обработку рядов измерительной и сопутствующей информации доплеровской зарубежной системы DORIS 2002, 2008 и 2010 гг., полученных на совмещенных пунктах этой системы и сети IGS. Дополнением к справочному документу являются параметры моделей ГПЗ, каталог координат пунктов КГС в системе ПЗ-90.11 и другая информация, включая координаты пунктов IGS в системе ПЗ-90.11.

В таблице 1 [22] представлено изменение параметров связи различных версий СК ПЗ-90 и международной СК ITRF. Из нее видно, что с каждой версией ПЗ-90 уменьшается различие с ITRF и к 2011 г. различие стало составлять несколько мм. Примечательно, что отличие координат центров масс СК ПЗ-90.11 и ГСК-2011 составляет несколько мм.

Таблица 1

Связь систем координат ПЗ-90 и ITRF

Названия СК	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м
ПЗ-90 – ITRF-2000	-1,430	+0,050	+0,200
ПЗ-90.02 – ITRF-2000	-0,360	+0,080	+0,180
ПЗ-90.11 – ITRF-2008	-0,003	-0,001	0,000
ПЗ-90.11 – ГСК-2011	0,000	-0,014	-0,008

Вместе с тем, при анализе результатов расчета системы координат ПЗ-90.11 и всей системы «Параметров Земли 1990 г.» следует выделить несколько особенностей.

1. В обработку принималась измерительная информация с пунктов, расположенных только на территории РФ. На рисунке 5 представлено положение пунктов КГС, IGS и DORIS, которые участвовали в выводе СК ПЗ-90.11. Использование таких локальных ограниченных данных является недостаточным при разработке общеземной геоцентрической системы координат. Кроме того, погрешность положения пунктов ПЗ-90.11 составляет 5 см — требуется уточнение системы координат для соответствия современным мировым требованиям.



Рис. 5. Расположение пунктов КГС, IGS и DORIS, участвующих в формировании ПЗ-90.11

2. При выводе ПЗ-90.11 не использовались данные отечественных пунктов РСДБ из состава комплекса «Квазар – КВО».

3. При создании ПЗ-90.11 используются модели потенциала ГПЗ ПЗ-2002/70с, ПЗ-2002/70, а также ПЗ-2002/360, которые были сформированы при выводе ПЗ-90.02. Таким образом, за промежуток времени с 2002 по 2011 г. не было выполнено обновление базы данных для вывода более современной модели ГПЗ. Однако, в этот период успешно работали такие космические гравиметрические комплексы, как CHAMP, GRACE, GOCE, а также ряд зарубежных спутниковых радиовысотометров. Реализация этих проектов внесла огромный вклад в решение задачи создания глобальной модели ГПЗ. Однако вся эта измерительная информация не использовалась, хотя и представлена в открытом доступе.

В целом, на территории РФ используются две СК с практически идентичным эллипсоидом. Возникает вопрос необходимости поддержания двух СК, реализованных на пунктах на территории страны, отличающихся только пунктами реализации и не использующих мировую сеть пунктов.

#### **Аппаратно-программный комплекс формирования уточненной системы координат**

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» в целях улучшения точностных характеристик ГГСК был разработан опытный образец аппаратно-программного комплекса уточнения Государственной геоцентрической системы координат (АПК ГГСК). Это достигается путем повышения точности проведения первичных измерений, а также совершенствования методов совместной обработки измерительной информации, полученной от наземных и космических измерительных средств. В кооперацию разработчиков входили: ИПА РАН, АО «НПК «СПП», ИФЗ РАН, ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, а также ФГУП «ЦНИИмаш».

Созданный АПК ГГСК решает следующие задачи:

- сбор, анализ, систематизация и хранение исходной измерительной информации в базу данных (БД) для обеспечения расчетов Государственной геоцентрической системы координат, планетарной модели гравитационного поля Земли и цифровой модели квазигеоида, а также проведение в случае необходимости дополнительных исходных измерений;
- предварительная обработка исходных данных, отбраковка некачественных данных, расчет необходимых поправок;
- расчет и оценка точности ГГСК, расчет параметров матрицы перехода из Государственной геоцентрической системы координат в Международную земную систему координат;

- расчет и оценка точности планетарной модели ГПЗ с учетом временных изменений параметров;
- расчет и оценка точности цифровой модели квазигеоида;
- выдача потребителям данных в согласованных форматах.

В состав АПК ГГСК входят:

1. Аппаратные средства в составе:

- комплекс сбора, обработки, хранения и передачи информации;
- вычислительный комплекс (2 сервера баз данных и долговременное хранилище данных, 3 сервера приложений, 3 АРМ оператора, средства и каналы сбора информации).

2. Автоматизированный комплекс программ в составе:

- программа сбора, хранения, обработки и записи исходных данных в БД (ПС);
- программа расчета и оценки точности параметров уточненной версии ГГСК (ПСК);
- программа расчета и оценки точности параметров высокоточной модели гравитационного поля Земли (ПГПЗ);
- программа расчета и оценки точности цифровой модели квазигеоида (ПЦМК).

3. Система высокоточных полигонов.

4. Система высокоточных измерительных средств (метеодатчик, электронный тахеометр, высокоточный относительный гравиметр CG-5, абсолютный гравиметр FGL, комплекс навигационной аппаратуры потребителя, АРМ оператора, электронный нивелир).

Автоматизированный комплекс программ размещен на аппаратных средствах комплекса, которые расположены на территории ФГУП «ВНИИФТРИ». Внешний вид аппаратных средств представлен на рисунке 6.



Рис. 6. Внешний вид аппаратных средств АПК ГГСК



Система высокоточных измерительных средств (СВИС) располагается на территории ФГУП «ВНИИФТРИ» и Восточно-Сибирского филиала ФГУП «ВНИИФТРИ». СВИС обеспечивает получение первичной измерительной информации, необходимой для проведения расчетов, функционирования системы полигонов и оценки точности разрабатываемых моделей и систем.

В состав измерительной информации входили следующие типы данных:

- измерительная информация беззапросных измерительных систем с глобальной сети пунктов по КНС;
- измерения с пунктов сети станций DORIS;
- лазерные измерения дальности до геодезических спутников;
- кодовые и фазовые измерения псевдодальности КНС ГЛОНАСС, GPS со спутников геодезического назначения;
- РСДБ-измерений с глобальной сети пунктов;
- спутниковые альтиметрические измерения по программе повторяющихся высотомерных трасс и по программе заполняющих высотомерных трасс;
- градиентометрические измерения КА «GOCE»;
- сводные каталоги средних значений аномалий силы тяжести и нормальных высот;
- гравиметрические данные и каталоги геодезических пунктов.

На основе использования аппаратных средств и программного комплекса путем обработки исходной измерительной информации были сформированы проекты уточненных цифровых моделей:

- геоцентрической системы координат;
- гравитационного поля Земли;
- квазигеоида.

Указанные модели были оценены с использованием системы высокоточных полигонов. Были получены следующие точностные характеристики:

- погрешность привязки пунктов геоцентрической системы координат к центру масс Земли составляет не более 5 см;
- модель гравитационного поля Земли рассчитана до степени и порядка 720 в разложении гравитационного потенциала и имеет погрешность на поверхности Земли на уровне 10 мГал;
- погрешность высот квазигеоида составляет не более 10 см.

Следует обратить внимание на то, что АПК ГГСК выполняет обработку «сырой» исходной измерительной информации. Это позволяет проводить контроль обработки данных и быть уверенным в адекватности полученных результатов. К примеру, данные GOCE обрабатывались уровня L2, т.е. данные бортовых измерительных средств с внесенными поправками. В то же

время, в ГАО2012 использовались данные уровня L3, где уже рассчитаны гармоники в разложении потенциала ГПЗ.

Одно из главных преимуществ комплекса заключается в том, что он может производить вывод новых цифровых моделей без серьезного изменения алгоритмов. Это позволяет проводить их обновление через определенные интервалы времени (например, 4 года), а также вывод новых версий, что соответствует мировой практике.

Комплекс программ для обработки измерительной информации является полностью отечественной разработкой без привлечения моделей зарубежных программ. Это полностью соответствует современному направлению развития цифровой экономики государства и делает комплекс независимым от внешних факторов.

### **Направления и проблемы создания единой системы координат**

На основе анализа современного состояния геодезического обеспечения государства в части систем координат можно сделать следующие выводы:

- на территории государства существуют две системы координат — ПЗ-90 и ГСК-2011 с разными сетями пунктов реализации, которые практически не пересекаются;
- погрешность привязки пунктов систем координат к центру масс Земли не соответствует современным мировым требованиям;
- параметры гравитационного поля Земли, разработанные в рамках вывода системы координат, не удовлетворяют современным мировым требованиям;
- при выводе систем координат используется измерительная информация в значительной степени с пунктов, расположенных на территории РФ, что является недопустимым при выводе общеземной системы координат;
- при выводе модели ГПЗ ГАО-2012 в большей степени используются конечные результаты обработки исходной измерительной информации (уровень L3), полученные зарубежными организациями.

Для удовлетворения современным требованиям на территории РФ **целесообразно формирование единой системы координат.**

Указанным требованиям на сегодняшний день (на середину 2018 г.) полностью соответствует разработанный аппаратно-программный комплекс уточнения Государственной геоцентрической системы координат. АПК ГСК является примером комплекса, способного выполнять постоянную обработку исходной измерительной информации в автоматизированном режиме, что способствует периодическому выводу новой версии системы координат. Программный комплекс АПК ГСК построен так, что требует мини-

мального вмешательства оператора. Процесс обработки и расчета выполнен в автоматизированном режиме.

При формировании единой системы координат следует придерживаться следующих рекомендаций:

- приближение характеристик комплекса к характеристикам проекта GGOS;
- расширение состава и объема измерительной информации с пунктов мировой сети;
- создание отечественного, более совершенного программного комплекса для обработки измерительной информации;
- проведение обработки «сырой» исходной измерительной информации;
- разработка моделей параметров ГПЗ, соответствующих мировым достижениям как по точности, так и по пространственному разрешению;
- расширение сети полигонов для тестирования всех элементов системы координат и модели ГПЗ и др.

### **Заключение**

1. Для геодезического обеспечения РФ и соответствия мировым требованиям к погрешности построения системы координат и ее элементов (параметры ГПЗ и квазигеоида) необходимо создание единой общеземной системы координат Российской Федерации.

2. При разработке единой системы координат необходимо опираться на технический задел, полученный в ходе разработки АПК ГГСК.

3. Использование задела АПК ГГСК при создании единой системы координат позволит приблизиться к уровню мировых требований по погрешности построения системы координат, в том числе к характеристикам системы ITRS и требованиям Международного проекта GGOS.

### **Литература**

1. Левитская Т.И. История выбора единой системы геодезических координат в России. Материалы доклада на Астрометрической конференции. — Пулково, 2015.
2. Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 25 марта 1987 г. № 373 85.
3. Руководство пользователя по выполнению работ в системе координат 1995 года (СК-95) ГКИНП (ГНТА)–06-278-04. — М.: ЦНИИГАиК, 2004.
4. Федеральная служба геодезии и картографии России. Руководство пользователя по выполнению работ в системе координат 1995 года (СК-95) ГКИНП (ГНТА)–06-278-04.

5. Концепция перехода топографо-геодезического производства на автономные методы спутниковых координатных определений. — М.: ЦНИИГАиК, 1995. — 24 с.
6. Основные положения о государственной геодезической сети Российской Федерации ГКИНП (ГНТА)-01-006-03. — М.: ЦНИИГАиК, 2004
7. Ефимов Г.Н., Зубинский В.И., Попадъев В.В. Объяснение к геодезической системе координат 2011 года. — М.: Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных, 2017.
8. Resolution UN General Assembly adopted in February 2015 No 69/266. A Global Geodetic Reference Frame for Sustainable Development. — URL: [https://documents-ddsny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/052/72/PDF/N\\_1505272.pdf?OpenElement](https://documents-ddsny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/052/72/PDF/N_1505272.pdf?OpenElement).
9. IERS Conventions. (IERS Technical Note No. 36). (2010). URL: [http://www.iers.org/nn\\_11216/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn36.html](http://www.iers.org/nn_11216/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn36.html).
10. ITRF 2014. Description (n.d.). URL: [http://itrf.ign.fr/ITRF\\_solutions/2014/](http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/)
11. Побединский Г.Г., Столяров И.А. Современное состояние государственной системы геодезического обеспечения Российской Федерации и основные направления ее развития. Интерэкспо ГЕО\_Сибирь\_2017. XIII Междунар. науч. конгр., 17–21 апреля 2017 г., Новосибирск: Пленарное заседание: сб. материалов. — Новосибирск: СГУГиТ, 2017. — С. 14–27.
12. Горобец В.П., Ефимов Г.Н., Столяров И.А. Опыт Российской Федерации по установлению государственной системы координат 2011 года // Вестник СГУГиТ. — 2015. — Вып. 2 (30).
13. Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы. Постановление Правительства Российской Федерации от 24 ноября 2016 г. № 1240.
14. Список координат и скоростей пунктов, участвовавших в первичном построении системы координат ГСК-2011 на эпоху 1 января 2011 года. — URL: <http://cgkipd.ru/opendata/fags/list>
15. Попрыгин В.А., Третьяков В.И. ГСК — 2011. Проблема перехода // Геопрофи. — 2018. — № 1.
16. Бойков В.В., Галазин В.Ф., Каплан Б.Л., Максимов В.Г., Базлов Ю.А. Опыт создания геоцентрической системы координат ПЗ-90 // Геодезия и картография. — 1993. — № 11.
17. Галазин В.Ф., Каплан Б.Л., Лебедев М.Г., Максимов В.Г., Петров Н.В., Сидорова-Бирюкова Т.Л. Система геодезических параметров Земли «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90). Справочный документ. — М.: Координационный научно-информационный центр, 2002.

18. Параметры общеземного эллипсоида и гравитационного поля Земли (параметры Земли 1990 года). — М.: РИО, 1991. — 68 с.
19. Галазин В.Ф., Македонский Е.Л., Зуева А.Н., Насретдинов К.К., Медведев Л.В., Орлов В.В., Чугунов И.П., Яковенко П.Э. Опыт создания планетарных моделей гравитационного поля Земли с помощью Гео-ИК // Геодезия и картография. — 1993. — № 11.
20. Андреев В.К., Джанпеисов М.Э., Новиков Е.В., Сагындык М.Ж., Самратов У.Д., Филатов В.Н., Хасенов К.Б. Состояние и актуальные проблемы модернизации ГГС Республики Казахстан // Геопрофи. — 2012. — № 8.
21. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.02). Параметры общеземного эллипсоида и гравитационного поля Земли. — М., 2002.
22. Параметры земли 1990 года (ПЗ-90.11). Справочный документ. — М., 2014.