

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОБОСНОВАНИЮ ПУТЕЙ СОЗДАНИЯ, ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРОЕКТНОГО ОБЛИКА КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГЛОБАЛЬНОГО ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

В. Е. Косенко

*ОАО «Информационно-спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнёва,
e-mail:office@iss-rechetnev.ru*

Рассмотрены вопросы по определению проектного облика космической системы глобального геодезического мониторинга, методологии решения геодезических задач.

В состав космической системы глобального геодезического мониторинга предлагается включить: 1-2 среднеорбитальных КА, низкоорбитальный КА, оснащенный спутниковым гравитационным градиентометром, и/или 2 низкоорбитальных КА, оснащенных высокоточной аппаратурой межспутниковых измерений, КА систем ГНСС (ГЛОНАСС, GPS, GALILEO) (функционально), пассивный КА типа «Блиц-М» (функционально), ракетно-космические комплексы для выведения КА, наземный комплекс управления КА, систему синхронизации, наземный специальный комплекс (НСК).

Методология решения геодезических задач включает классический динамический метод совместно с гравиметрическим и альтиметрическим методами на основе спутникового гравитационного градиентометра и/или метода межспутниковых измерений относительного положения двух низкоорбитальных космических аппаратов.

Ключевые слова: космическая система, геодезический мониторинг, космические аппараты

Введение

На современном этапе существенную роль в развитии науки и техники играет система геодезических параметров Земли «Параметры Земли» (система ПЗ-90), включающая общеземную геоцентрическую систему координат, параметры фигуры и гравитационного поля Земли (ГПЗ). Особое внимание параметрам Земли уделяется при решении задач безопасности и обороноспособности страны.

Задача определения глобальных геодезических параметров, входящих в Систему «Параметры Земли» в Российской Федерации решалась и решается с помощью космических геодезических комплексов и систем серии ГЕО-ИК. С их помощью получают более 80 % всего объема астрономо-геодезических и гравиметрических данных, предназначенных для использования в системах управления ВВТ, при геодезическом обеспечении навигационных, картографических и других космических систем, а также при создании единой координатной и высотной основы для применения различных видов потребителей.

Геодезическое обеспечение РФ

Постановлением правительства Российской Федерации от 28 декабря 2012 г. № 1463 введены в действие:

- Государственная общеземная геоцентрическая система координат ПЗ-90.11 — для использования в целях геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач;

- Государственная геодезическая система координат 2011 года (ГСК-2011) - для использования при осуществлении геодезических и картографических работ.

Федеральной целевой программой «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы» (далее по тексту ФЦП-2012-2020) предусмотрен ряд мероприятий, обеспечивающих выполнение следующих основных индикаторов к 2020 г. с использованием КА "ГЕО-ИК-2" (табл. 1):.

Таблица 1

Индикаторы ФЦП «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы»

№ п/п	Основные индикаторы	Значение, м
1	Погрешность определения местоположения в реальном времени в государственной геоцентрической системе координат за счет космического сегмента без использования дополняющих систем	0,6
2	Погрешность определения местоположения в государственной геоцентрической системе координат за счет космического сегмента с использованием дополняющих систем:	
	- в оперативном режиме	0,1
	- в оперативном режиме с начальной инициализацией	0,05
	- в апостериорном режиме	0,03
3	Погрешность государственной системы координат:	
	- погрешность привязки ГОГСК к центру масс Земли и разворотов относительно Международной земной системы координат	0,01
	- погрешность ГОГСК, реализуемой системой ГЛОНАСС	0,02
	- погрешность относительной привязки постоянно действующих пунктов фундаментальной астрономо-геодезической сети	0,005
	- погрешность определения высот геоида	0,05

Анализ требований показал, что разрабатываемая космическая геодезическая система «ГЕО-ИК-2» не обеспечит выполнение требований к геодезическим параметрам. В первую очередь, в части определения детальных характеристик ГПЗ (высот квазигеоида, аномалий силы тяжести, уклонений отвесных линий), поскольку реализуемые в системе методы, основанные на комплексном использовании анализа возмущений орбит КА, спутниковой альтиметрии и наземной гравиметрии, имеют ограничения по точности, полноте и разрешающей способности учета гравитационных аномалий.

Мероприятия по определению геодезических параметров, запланированные в ФЦП-2012-2020, направлены в основном на разработку программных продуктов и не предусматривают разработку технических средств получения исходной информации для определения детальных характеристик ГПЗ с заданной точностью.

Для выполнения требований ФЦП-2012-2020 необходимо создание многоярусной космической геодезической системы (КГС «ГЕО-ИК-3») с использованием всех средств и методов космической геодезии, включая:

- классический динамический метод совместно с гравиметрическим и альтиметрическим методами;
- спутниковый гравитационный градиентометр для измерения вторых производных ГПЗ и/или метод межспутниковых измерений относительного положения двух низкоорбитальных космических аппаратов.

Варианты создания КГС «ГЕО-ИК-3»

На сегодняшний день можно рассматривать несколько вариантов по статусу создания КГС "ГЕО-ИК-3" (см. рисунок 1).



Рис. 1. Варианты по статусу создания системы

Цель создания и состав КГС «ГЕО-ИК-3»

Многоярусная космическая геодезическая система «ГЕО-ИК-3» двойного назначения с учетом как отечественного, так и зарубежного опыта решает следующие задачи:

1. Построение высокоточной геоцентрической системы координат (включает спутниковую модель ГПЗ в виде гармонических коэффициентов до 70-90 степени разложения геопотенциала в ряд по сферическим функциям).

2. Определение высокостепенной (детальной) модели ГПЗ на основе спутниковой модели ГПЗ:

- с использованием градиентометрической информации (200-250-я степень разложения в ряд по сферическим функциям);
- с дополнительным использованием детальной гравиметрической и альтиметрической информации (2000-я степень разложения в ряд по сферическим функциям).

3. Определение характеристик ГПЗ в Мировом океане:

- уклонения отвесной линии;
- высоты квазигеоида;
- аномалии силы тяжести.

4. Определение геодинамических перемещений литосферных плит.

5. Решение ряда океанографических задач.

Для решения вышеуказанных задач предложен следующий состав перспективной космической геодезической системы:

- орбитальная группировка различного типа космических аппаратов;
- наземный специальный комплекс;
- система синхронизации;
- наземный комплекс управления;
- ракетно-космический комплекс.

Орбитальная группировка КГС «ГЕО-ИК-3»

Орбитальная группировка КГС «ГЕО-ИК-3» включает в себя (рис. 2):

- орбитальную группировку, состоящую из 1-2 среднеорбитальных КА (СКА), обращающихся на солнечно-синхронной орбите;
- орбитальную группировку, состоящую из одного низкоорбитального КА (НКАГ) на солнечно-синхронной орбите, оснащенного спутниковым гравитационным градиентометром, и/или орбитальную группировку, состоящую из двух низкоорбитальных КА (НКАД) на околокруговой приполярной орбите, оснащенных высокоточной аппаратурой межспутниковых измерений;
- орбитальную группировку из КА (ВКА) систем ГЛОНАСС, GPS, GALILEO (функционально);

- пассивный КА типа «Блиц-М» на круговой орбите с высотой около 3000 км», принцип действия которого основан на рефракционных эффектах в линзе Люнеберга (функционально).

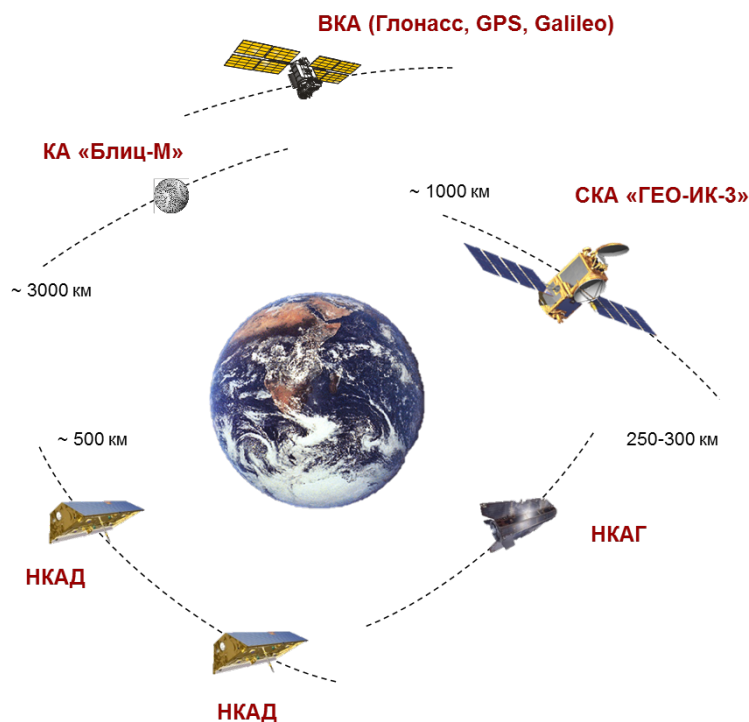


Рис. 2. Орбитальная группировка КГС «ГЕО-ИК-3»

Предполагаемый состав СКА, НКАД и НКАГ

В состав СКА входят:

- измерительная аппаратура доплеровской системы (ДС);
- дальномерная запросная система (ДЗС);
- дальномерно-доплеровская система (ДДС), работающая по сигналам КА систем ГЛОНАСС и GPS (Galileo);
- высокоточный двухчастотный радиовысотомер;
- оптическая ретрорефлекторная антенна (ОРА);
- аппаратура сбора и передачи информации (АСПИ);
- радиометр;
- бортовое синхронизирующее устройство;
- обеспечивающие системы.

В состав НКАД входят:

- дальномерная запросная аппаратура для межспутниковых измерений в линии НКАД-НКАД;
- измерительная аппаратура доплеровской системы (ДС);
- бортовое синхронизирующее устройство;

- дальномерно-доплеровская система, работающая по сигналам КА систем ГЛОНАСС и GPS (Galileo);
- акселерометр;
- оптическая ретрорефлекторная антенна;
- система балансировки центра массы КА к центру масс акселерометра;
- аппаратура сбора и передачи информации;
- система компенсации негравитационных возмущений;
- обеспечивающие системы.

В состав НКАГ входят:

- бортовая гравиградиентометрическая измерительная система;
- измерительная аппаратура доплеровской системы (ДС);
- дальномерно-доплеровская система, работающая по сигналам КА систем ГЛОНАСС и GPS (Galileo);
- бортовое синхронизирующее устройство;
- оптическая ретрорефлекторная антенна;
- аппаратура сбора и передачи измерительной информации;
- система компенсации (учета) негравитационных возмущений;
- обеспечивающие системы.

Наземный специальный комплекс КГС «ГЕО-ИК-3»

Наиболее значимой задачей является задача уточнения Государственной общеземной геоцентрической системы координат ПЗ-90.11 и создания согласованной с ней модели ГПЗ.

Для решения этой задачи целесообразно привлечь все существующие средства, находящиеся в ведении РФ:

- сеть наземного комплекса управления (НКУ) ГЛОНАСС (БИС, КОС, радиоинтерферометры (РСДБ));
- сеть Роскосмоса СДКМ (БИС, КОС);
- сеть РАН (РСДБ, КОС, БИС);
- сеть Росреестра ФАГС (БИС, абсолютный гравиметр);
- сеть Росстандарта (БИС, КОС, абсолютный гравиметр);
- пункты сети ITRF, в т.ч. пункты сети DORIS, на территории РФ, находящиеся в ведении РАН (ИНАСАН, ГС РАН).

Привлечение данных средств позволит максимально повысить точность решения геодезических задач и обеспечит необходимый уровень взаимодействия с мировыми сетями за счет сложившихся научно-технических и технологических связей.

В обеспечение долговременного взаимодействия сторон в рамках государственных проектов целесообразно создание единого научно-координационного центра (НКЦ).

Главной задачей НКЦ будет разработка и проведение необходимых научных, организационных, методических и иных мероприятий.
Альманах современной метрологии, 2015, №3

направленных на решение главных задач КГС «ГЕО-ИК-3».

Ведомственные группы обработки геодезической информации (ГОГИ и ЦОГИ) целесообразно подчинить НКЦ.

На рис. 3 показана предварительная структурная схема наземного специального комплекса.

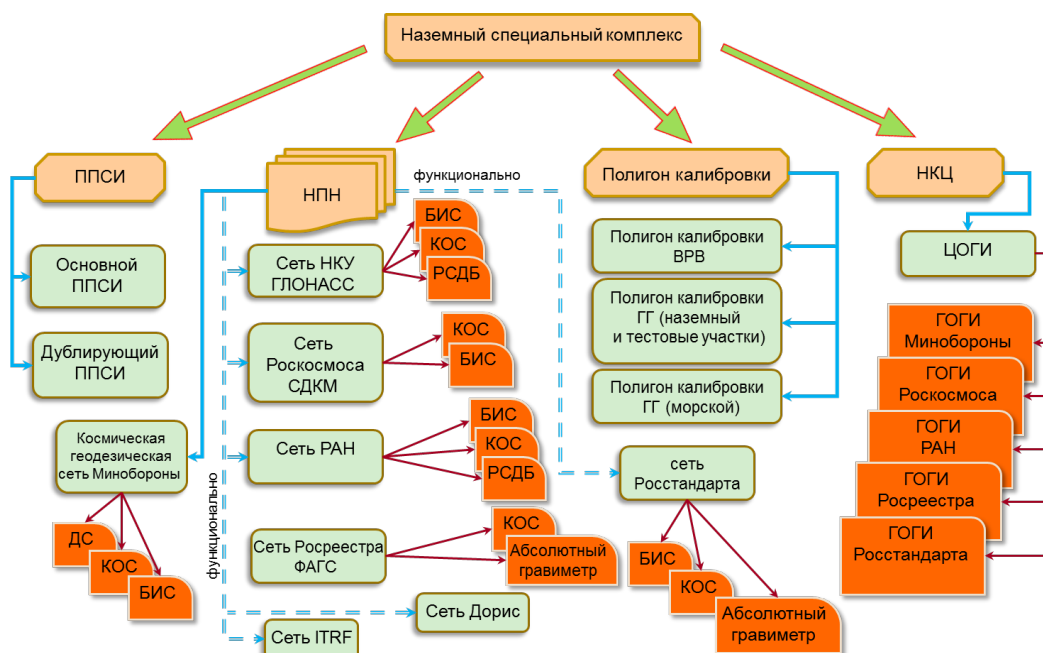


Рис. 3. Структурная схема НСК КГС «ГЕО-ИК-3»

Методология решения целевых задач КГС «ГЕО-ИК-3»

Методология решения целевых задач КГС «ГЕО-ИК-3» должна основываться на строгой математической обработке всех видов измерительной информации в рамках теории динамического метода космической геодезии.

На первом этапе динамическим методом космической геодезии определяется ГГСК и спутниковая модель ГПЗ. На втором этапе расширенным динамическим методом с использованием градиентометрической информации уточняется ГГСК и спутниковая модель ГПЗ расширенного состава.

Альтернативным вариантом второго этапа является этап итерационного уточнения спутниковой модели ГПЗ расширенного состава методом гармонического анализа градиентометрической информации и ГГСК.

На третьем этапе методом спутниковой и радиолокационной альтиметрии создаются детальные каталоги трансформант ГПЗ в акватории Мирового

Альманах современной метрологии, 2015, №3

океана.

На четвертом этапе на основе уравнивания спутниковой модели ГПЗ расширенного состава, альтиметрических и гравиметрических детальных данных создается детальная комбинированная модель ГПЗ.

Третий и четвертый этапы выполняются итерационно.

Предложенная методология решения геодезических задач и использование традиционных и перспективных средств в космической геодезии позволит:

- уточнить геоцентрическую систему координат в 5 раз;
- повысить точность определения УОЛ и АСТ в Мировом океане в 2-3 раза;
- повысить точность планетарных моделей ГПЗ по высотам квазигеоида в 5 раз;
- повысить точность определения цифровых моделей высот квазигеоида в Мировом океане в 3-4 раза;
- повысить точность определения цифровых моделей УОЛ, АСТ, ВКГ на суше 1,5-2 раза (при наличии детальных гравиметрических данных).

Схема взаимодействия элементов КГС «ГЕО-ИК-3»

На рис. 4 приведена схема взаимодействия элементов КГС «ГЕО-ИК-3»:

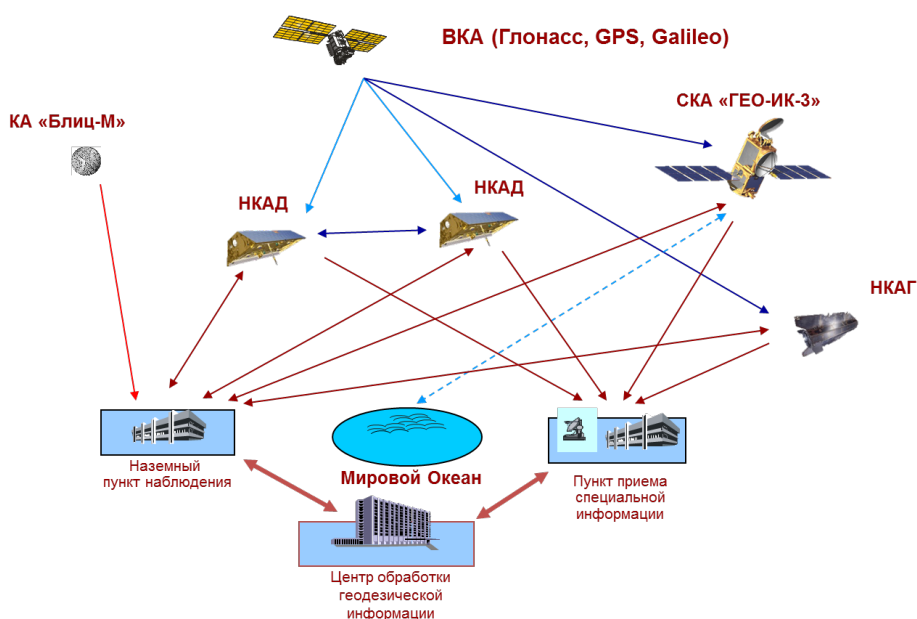


Рис. 4. Структурная схема НСК КГС «ГЕО-ИК-3»

Основным функциональным отличием перспективной космической системы КГС «ГЕО-ИК-3» является наличие в ее составе низкоорбитального

спутника с гравитационным градиентометром (ГГ), который планируется к разработке в РФ впервые. Мировой опыт показывает эффективность использования спутниковых ГГ для решения следующих задач [1]:

- повышение точности и пространственного разрешения глобальных моделей ГПЗ для уточнения системы геодезических параметров Земли, высокоточного определения орбит КА, глобального картографирования ГПЗ, установления единой системы нормальных высот, геодинамических исследований;

- повышение точности определения параметров ГПЗ в Мировом океане (в комбинации с альтиметрическим методом) в интересах геодезического обеспечения систем навигации и управления объектов морского базирования, исследование топографии поверхности Мирового океана;

- создание специализированных пространственных моделей ГПЗ для обеспечения перспективных систем навигации эталонной информацией о ГПЗ.

Организационно-технологическим отличием КГС «ГЕО-ИК-3» является статус космической системы двойного назначения с потенциалом использования международных информационных ресурсов (прежде всего данных наблюдений гравитационных спутников) и включения собственно КГС «ГЕО-ИК-3» в крупные международные космические геодезические проекты (GGOS, GEOSS).

О состоянии разработки спутниковой градиентометрии и альтиметрии

На сегодняшний день в России отсутствуют организации, имеющие опыт создания бортовых гравиградиентометров. Для создания бортового гравиградиентометра потребуется не менее 10-15 лет (на разработку КА GOCE потребовалось более 8 лет) [2].

Утерян опыт создания радиовысотомеров в ОАО «Российские космические системы». Для создания потребуется не менее 10 лет.

Одним из мировых лидеров в разработке гравиградиентометра и альтиметров является Thales Alenia Space (Франция).

Thales Alenia Space разработала целый ряд космических высотомеров:

- RA и RA2 для спутников ERS1/ERS2 и Envisat соответственно;

- Poseidon для спутника Topex/Poseidon;

- Poseidon 2 для спутника Jason-1;

- Poseidon 3 для спутника Jason-2;

- Poseidon 3B для спутника Jason-3;

- SIRAL для спутника CryoSat;

- SIRAL 2 для спутника CryoSat 2;

- Alti-KA (вместе с CNES) для спутника SARAL. В разработке находятся высотомеры Poseidon 4 для спутника Jason-CS, KaRin для спутника SWOT, SRAL для спутника Sentinel 3, 3B, SWIN для спутника

Альманах современной метрологии, 2015, №3

CFO-Sat.

С целью создания перспективной КГС «ГЕО-ИК-3» в 2013 году состоялось несколько встреч с компанией THALES ALENIA SPACE по вопросам сотрудничества в области создания гравиградиентометра и альтиметра нового поколения. На этих встречах было достигнуто понимание о целесообразности продолжения совместных работ в данном направлении. На встрече 9-10 июля 2014 в г. Железногорске (Красноярский край) был согласован пакет документов для проведения совместных работ.

Предложения по порядку создания КГС «ГЕО-ИК-3»

Существующие и создаваемые в настоящее время космические средства геодезического обеспечения, в том числе КГС «ГЕО-ИК-2», по своим характеристикам не могут обеспечить выполнение всех современных, а тем более – перспективных требований к фундаментальным геодезическим параметрам. Для удовлетворения перспективных требований военных и гражданских потребителей к геодезическим параметрам на уровне 2025 г. и ликвидации отставания России от ведущих зарубежных стран необходимо форсировать работы по созданию КГС «ГЕО-ИК-3».

Учитывая, что фундаментальные геодезические параметры являются ключевыми для системы ГЛОНАСС, создание КГС «ГЕО-ИК-3» целесообразно проводить в рамках работ по созданию и развитию системы ГЛОНАСС. Работы следует рассматривать и как составную часть комплекса средств фундаментального обеспечения системы ГЛОНАСС, и как фундаментальное дополнение системы ГЛОНАСС. При этом в качестве первоочередных мероприятий предлагается в рамках ФЦП «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы» провести в 2015-2017 годах комплексную НИР по исследованию путей создания многоярусной космической системы «ГЕО-ИК-3» с привлечением европейских компаний, имеющих опыт создания аналогичных КА, и разработать аванпроект на систему.

Предложения по созданию единой системы геодезического обеспечения РФ

В настоящее время актуальным является создание единой системы геодезического обеспечения РФ (ЕСГО РФ), которая позволит объединить научный, производственный и финансовый потенциал и всех заинтересованных ведомств в решении задач геодезического обеспечения широкого круга потребителей. Одним из основных проблемных аспектов формирования ЕСГО РФ на сегодняшний день является организационно-управленческий.

Основными ключевыми элементами ЕСГО РФ являются система ГЛОНАСС и космические геодезические системы.

Характеристики ЕСГО оказывают существенное влияние на точностные
Альманах современной метрологии, 2015, №3

характеристики системы ГЛОНАСС. Во-первых, непосредственно, через систему геодезического обеспечения ГЛОНАСС. Во-вторых, косвенно, через растущие запросы потребителей геодезической информации, которые, с одной стороны, стимулируются наращиванием потенциала системы ГЛОНАСС, с другой стороны, подталкивают разработчиков системы к дальнейшему улучшению ее тактико-технических характеристик.

Сложность и амбициозность достижения высоких точностей при решении геодезических задач требует не только объединения усилий отечественных ведомств, но и сотрудничества с ведущими международными научными организациями и участия в международных проектах.

КГС «ГЕО-ИК-3» в международном проекте GGOS

Международное партнёрство рассматривается не как идея, а как конкретное участие в международном проекте Global Geodetic Observing System (GGOS) [3, 4, 5], входящем в более крупный международный проект Global Earth Observing System of Systems (GEOSS) под эгидой ООН.

GGOS предназначена для сбора, архивирования и обеспечения доступности геодезических наблюдений, результатов и моделей, охватывающих три основные области геодезии:

- геометрия и кинематика поверхности Земли;
- ориентации и вращение Земли;
- гравитационное поле Земли и его изменчивость.

GGOS должна определить полный набор геодезических продуктов в этих областях и установить требования в отношении точности продукции, временного разрешения и соответствия. GGOS будет выявлять возможные пробелы в продуктах, предоставляемых службами IAG, и разрабатывать стратегии, чтобы восполнить их. Интенсивное сотрудничество между существующими и новыми службами IAG должно стимулировать и расширять научные исследования в области геодезии. С помощью этих средств должна быть достигнута максимальная польза для науки. GGOS является центральным связующим звеном между геодезией и научным сообществом и обществом в целом.

Основной целью GGOS является координация деятельности в рамках геодезии по следующим направлениям:

- поддержание стабильности временных рядов геометрических и гравиметрических систем отсчета;
- обеспечение согласованности между различными геодезическими стандартами, используемыми в геодезическом научном сообществе;
- улучшение геодезических моделей на уровне, требуемом для наблюдений;
- охват всех аспектов обеспечения соответствия геодезической и гравиметрической продукции.

В структуре GGOS в наземных мониторинговых сетях со стороны России

присутствуют станции всех международных мониторинговых служб (IVS, IGS, ILRS, IDS), а также система ГЛОНАСС.

Литература

1. PKT, № 34, 2007, с. 56 (Space News, 2007, 23/VII, v./ 18, № 29, p. 1, 4).
2. <http://www.ggos.org/>
3. Татевян С.К. Глобальная геодезическая система наблюдений GGOS. Научные задачи и перспективы развития. // Институт астрономии РАН. Сагитовские чтения. М.: ГАИШ МГУ, 2009.
4. Вдовин В.С. Актуальные вопросы использования геоцентрических и геодезических систем координат и сетей на предприятиях горной и нефтегазовой отраслей России. М.: Маркшейдерский вестник, 2010. №№ 4-6.
5. [http://www.geosec.org/documents/10-Year Plan Reference Document.pdf](http://www.geosec.org/documents/10-Year%20Plan%20Reference%20Document.pdf).