



# Перспективы использования российской космической геодезической системы в научной и социально-экономической сфере

В.Б. Непоклонов<sup>1,2</sup>✉, И.В. Гусев<sup>3</sup>,  
О.В. Вшивкова<sup>1</sup>, И.Ю. Васютинский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup> АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», Королёв, Московская обл., Россия

✉ vbnep@miigaik.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Непоклонов В.Б., Гусев И.В., Вшивкова О.В., Васютинский И.Ю. Перспективы использования российской космической геодезической системы в научной и социально-экономической сфере // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2023. Т. 67. № 4. С. 6–25. DOI:10.30533/GiA-2023-016.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** геодезическое обеспечение, геодезическая модель, гравитационное поле Земли, космическая геодезическая система, орбитальная группировка, наземный специальный комплекс, функциональное дополнение

**АННОТАЦИЯ** В статье рассмотрена возможность применения российской космической геодезической системы следующего поколения в интересах научно-технологического и социально-экономического развития Российской Федерации, а также представлены разработанные предложения к предполагаемым требованиям и способам их выполнения, назначению и результатам в рамках миссии перспективной отечественной космической геодезической системы. Выполнение этих требований обусловлено необходимостью комплексного улучшения знаний о Земле в геодезическом отношении, включая уточнение базовых геодезических моделей как традиционных координатных и гравитационных моделей Земли, так и динамических с потребностью дальнейшего повышения точности определения геодезических параметров с учетом их изменений во времени. Отмечено, что в перспективе при постановке и решении этой тройственной задачи упор будет приходиться на динамическую

составляющую. Исходя из новых обстоятельств установлено, что перспективная российская космическая геодезическая система по своему облику должна существенно отличаться от работающей в настоящее время системы «ГЕО-ИК-2»: и в части орбитальной группировки, и в части наземного специального комплекса. Основным отличием орбитальной группировки должно стать использование сегмента низкоорбитальных космических аппаратов для высокоточного измерения параметров гравитационного поля Земли и их изменений во времени. Модернизированный наземный специальный комплекс должен предусматривать использование различных функциональных дополнений, в том числе использование мобильных гравиметрических комплексов, геофизических обсерваторий, станций ионосферного мониторинга, измерительных систем, действующих по принципу квантового нивелира. В качестве важных особенностей перспективной космической геодезической системы как объекта двойного назначения отмечены мультизадачность и междисциплинарность.

## 1 Введение

Обеспечение технологического суверенитета критических отраслей экономики Российской Федерации требует концентрации усилий на приоритетных направлениях их развития, включая повышение эффективности геодезического обеспечения страны как основы национальной системы пространственных данных<sup>1</sup>.

Концепция развития отрасли геодезии и картографии, утвержденная распоряжением Правительства РФ от 17.12.2010 г. № 2378-р, определяет систему геодезического обеспечения как «генеральную совокупность параметров фигуры Земли и внешнего гравитационного поля Земли, реализуемых на территории РФ через государственную координатную основу и структуру государственных сетей». В данном определении превалирует информационный аспект. Другие источники дают несколько иные трактовки геодезического обеспечения, например: «производственный процесс, заключающийся в создании геодезических информационных ресурсов» [1]; «комплекс мероприятий по созданию геодезических информационных ресурсов»<sup>2</sup>; «комплекс процессов создания, представления, актуализации и использования пространственной информации на основе геодезического метода определения пространственного положения и формы предметов» [2]; «комплекс мероприятий по подготовке и доведению до потребителей исходных астрономо-геодезических и гравиметрических данных»<sup>3</sup>. В этих определениях присутствует операционный (производственный) аспект геодезического обеспечения. Таким образом, система геодезического обеспечения может рассматриваться как совокупность взаимодействующих технических, технологических

1 Постановление Правительства РФ от 1 декабря 2021 г. № 2148 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Национальная система пространственных данных».

2 Словарь современных терминов. Геодезия, картография, геоинформатика, кадастр, дистанционное зондирование / А.Е. Алтынов, И.П. Герасимов, В.В. Голубев и др. М.: МИИГАиК, 2019. 368 с.

3 Министерство обороны Российской Федерации. Энциклопедия. Топогеодезическое обеспечение. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=11044@morfDictionary> (дата обращения: 20.12.2023).

и информационных компонентов для достижения определенных целей<sup>4</sup>, связанных с удовлетворением потребностей различных органов управления, а также юридических и физических лиц с необходимыми для них геодезическими данными и продуктами их переработки в соответствии с установленными требованиями к составу, точности, полноте, подробности и актуальности данной системы [3].

Важной и неотъемлемой составляющей современных систем геодезического обеспечения являются космические геодезические системы (КГС) и космические геодезические комплексы (КГК). Согласно действующему стандарту<sup>5</sup>, под КГС понимается совокупность одного или нескольких космических комплексов, а также специальных комплексов, предназначенных для решения целевых задач геодезической направленности. А под КГК понимается совокупность функционально взаимосвязанных орбитальных и наземных технических средств, обеспечивающих как самостоятельное решение целевых задач на основе использования космического пространства, так и в составе КГС.

История российских КГС (КГК) началась более 50 лет назад с создания комплекса «Сфера» (1968–1980 гг.). Следующим стал КГК второго поколения «ГЕО-ИК» (1981–1999 гг.). Наряду с традиционными для того времени методами космической геодезии (геометрическими, орбитальными и динамическими) впервые в практике РФ для решения геодезических задач был использован метод спутниковой альтиметрии. В настоящее время развернута КГС третьего поколения «ГЕО-ИК-2» из двух геодезических космических аппаратов (КА) с высокоточными радиовысотомерами. Перспективы дальнейшего развития связаны с созданием КГС нового поколения «ГЕО-ИК-3», которая должна иметь улучшенные точностные характеристики и расширенные функциональные возможности, в том числе за счет использования низкоорбитальных КА для исследований гравитационного поля Земли (ГПЗ) [4, 5].

Однако возможный вклад перспективной российской КГС в развитие геодезического обеспечения страны и способы повышения эффективности ее использования в общенациональном масштабе проработаны не в полной мере. Это послужило предпосылкой для проведения исследования, направленного на разработку предложений по использованию данной системы в интересах научно-технологического и социально-экономического развития РФ. Основные результаты этого исследования представлены в данной статье.

## 2 Постановка задачи и методы исследования

В России космические геодезические системы и комплексы традиционно создавались в интересах обороны, что обуславливалось в значительной мере необходимостью сосредоточения усилий на уточнении геоцентрической системы координат и параметров ГПЗ в целях обеспечения паритета

<sup>4</sup> ГОСТ Р ИСО МЭК 15288-2005 «Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем».

<sup>5</sup> ГОСТ Р 53802-2010 «Системы и комплексы космические. Термины и определения».

с западными странами в области стратегического вооружения и наращивания потенциала сил сдерживания.

В отличие от этого за рубежом КГС уже довольно давно, на протяжении нескольких десятилетий, служат многофункциональной платформой, обеспечивающей:

- 1) реализацию технологий двойного назначения, в том числе не только за счет использования военных разработок в гражданских целях (англ. — «spin-off» — «спин-офф»), но и обратного процесса (англ. — «spin-on» — «спин-он») — трансфера технологий из гражданского сектора в военный;
- 2) объединение усилий стран и организаций при создании и использовании космических систем (комплексов) геодезического назначения. Примерами могут служить миссии TOPEX/Poseidon, Jason-1/2, ERS-1/2, ENVISAT, GRACE, GRACE-FO и др.;
- 3) использование промежуточных и конечных результатов решения геодезических задач в интересах развития исследований и разработок в смежных областях научной деятельности таких как геология, сейсмология, геодинамика, гидрология, океанография и др. [5, 6].

Достигнутый уровень геодезического обеспечения зарубежных стран, лидирующих в области космической геодезии (США, ФРГ, Франция, КНР и др.) показывает, что современный этап развития КГС за рубежом в значительной мере определяется гражданскими приложениями, в том числе и в первую очередь приложениями научного характера. Следовательно, это обуславливает целесообразность создания новой КГС РФ с учетом потребностей геодезического обеспечения научно-технологического и социально-экономического развития общества. С другой стороны, при проектировании новой российской КГС необходимо учитывать и такой аспект, как обеспечение преемственности новой системы по отношению к методам, средствам и технологиям решения целевых задач предшествующих систем (комплексов).

Исходя из отмеченных обстоятельств, исследование, описанное в данной работе, включает в себя разработку предложений по содержанию перспективной российской КГС и ориентировочным требованиям к результатам решения ее целевых задач в аспекте космической системы научного и социально-экономического назначения, а также разработку предложений по возможным способам реализации этих требований, учитывая опыт России и зарубежных стран.

## 3 Результаты и обсуждение

### 3.1 Анализ задач перспективной КГС в научной и социально-экономической сферах

Целевые задачи перспективной КГС как системы двойного назначения должны формироваться с учетом реальных потребностей научно-технологического и социально-экономического развития страны. При этом они в первую очередь должны быть увязаны с требованиями

к точностным характеристикам фундаментальных геодезических параметров<sup>6</sup>. Прогнозные оценки этих требований на ближайшую (2025–2030 гг.) и дальнейшую (2035–2040 гг.) перспективы представлены в Таблице 1 значениями среднеквадратической погрешности (СКП).

**Таблица 1** ➔  
Прогнозные оценки требований к точностным характеристикам фундаментальных геодезических параметров.

| Вид параметров   | Уровень требований (СКП) |                     |
|--|--------------------------|---------------------|
|  | 2025–2030 гг.            | 2035–2040 гг.       |
| <b>Параметры общеземного эллипсоида (ОЗЭ)</b>                      |                          |                     |
| Большая полуось, м   | 0,1                      | 0,1                 |
| Знаменатель сжатия   | 0,0001                   | 0,0001              |
| <b>Параметры государственной геоцентрической системы координат</b> |                          |                     |
| Координаты пунктов, м  | 0,02...0,03              | 0,005...0,01        |
| Взаимное положение пунктов, м                                      | 0,004                    | 0,003               |
| Скорость смещения пунктов (среднегодовая), м/год                   | 0,001                    | 0,005               |
| <b>Параметры (характеристики) глобальной модели геопотенциала</b>  |                          |                     |
| Разрешающая способность по длинам волн геоида, км                  | 25...30                  | 15...20             |
| Гармонические коэффициенты геопотенциала, ед. 10 <sup>-9</sup>     | 1...4                    | 1...3               |
| Временные вариации гармонических коэффициентов                     | 4×10 <sup>-10</sup>      | 3×10 <sup>-10</sup> |
| Высоты квазигеоида (глобально), м                                  | 0,15...0,20              | 0,10...0,15         |

В качестве факторов, определяющих конкретное содержание целевых задач, следует отметить:

- преемственность по отношению к КГС (КГК) РФ предшествующих поколений и созданному с их помощью научно-практическому заделу;
- рациональное использование зарубежного опыта применения средств, методов и технологий космической геодезии;
- создание кооперации, объединяющей разработчиков и потребителей КГС, в целях максимально возможного исключения избыточности и дублирования решаемых задач;
- эффективность реализации результатов целевого применения КГС в научно-технологической и социально-экономической сфере.

Необходимо учитывать также, что геодезическое обеспечение научно-технологического и социально-экономического развития страны в современных условиях базируется на геодезических моделях трех классов: координатные, гравитационные и динамические модели Земли, с характеристиками, указанными в Таблице 2. Объединяет эти модели, в частности, то, что все они связаны, в той или иной степени, с использованием методов, средств и технологий космической геодезии. Это обусловливается глобальностью решаемых задач, составом определяемых параметров, их многообразием, требуемой высокой точностью и сжатыми сроками получения конечных результатов. При этом подход с позиции использования КГС позволяет ставить и решать сложные научно-технические проблемы на стыке геодезических моделей разных классов [7, 8], что способствует продвижению к созданию комплексной геодезической модели Земли.

<sup>6</sup> ГОСТ Р 55536-2013. Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических работ. Общие требования к фундаментальным геодезическим параметрам.

Таблица 2 

Прогнозные оценки требований к точностным характеристикам фундаментальных геодезических параметров.

| Класс моделей                            | Назначение  | Основные компоненты   | Область применения   |
|--|---|---|--|
| <b>Координатные модели Земли (КМЗ)</b>   | Описание формы и размеров Земли. Определение координат, высот и взаимного положения точек земной поверхности на начальную эпоху.                                      | Параметры ОЗЭ, общеземной геоцентрической системы координат (ОГСК) и системы нормальных высот, цифровые модели рельефа суши, дна Мирового океана и квазистационарной морской поверхности.                               | Обеспечение единства и согласованности координатных определений, координатно-временное и навигационное обеспечение различных категорий потребителей, картографирование территорий и морских акваторий.   |
| <b>Гравитационные модели Земли (ГМЗ)</b> | Определение параметров и характеристик внешнего ГПЗ на начальную эпоху.   | Параметры гравиметрической системы, гармонические коэффициенты потенциала, цифровые модели аномалий силы тяжести (АСТ), высот квазигеоида (ВКГ) и уклонов отвесных линий (УОЛ).   | Обработка геодезических измерений, проведение геофизических исследований, выполнение орбитальных расчетов, решение навигационных задач.  |
| <b>Динамические модели Земли (ДМЗ)</b>   | Определение и учет изменений фигуры, ориентации, вращения и ГПЗ под влиянием геодинамических, климатических и антропогенных факторов на интервале от начальной эпохи. | Параметры вращения Земли, тектонических движений блоков земной коры, приливных колебаний земной поверхности и гравитационного потенциала, неприливных изменений силы тяжести и динамической топографии Мирового океана. | Поддержание КМЗ и ГМЗ в актуальном состоянии, согласование результатов разновременных определений геодезических параметров, геодинамическое районирование, геодезический мониторинг, оптимизация инфраструктуры государственных и специальных геодезических сетей. |

Вклад КГС России в улучшение КМЗ связывается с созданием, поддержанием, распространением и уточнением государственных геоцентрических систем координат ГСК-2011 и ПЗ-90.11, реализуемых государственной геодезической сетью<sup>7</sup> и космической геодезической сетью [5]. Точность согласования системы координат ПЗ-90.11, распространяемой системой ГЛОНАСС посредством навигационных сообщений, с Международной земной системой координат ITRF2020 оценивается на уровне 10 см [9]. Однако потребности развития геодезического обеспечения страны обуславливают необходимость дальнейшего улучшения отечественной КМЗ.

Совершенствование ГМЗ связывается, в первую очередь, с повышением точности и разрешающей способности глобальных моделей ГПЗ в виде сферических гармоник геопотенциала. Достигнутый в России уровень изученности планетарного ГПЗ официально отражают модели ПЗ-2002/360 и ГАО-2012 [10]. Однако, их характеристики по точности (погрешность определения ВКГ в целом по земному шару – около 0,5 м) и детальности (разрешающая способность по длинам волн геоида – около 110 км) существенно (в несколько раз) уступают зарубежным аналогам.

При всех последних достижениях космической геодезии, включая реализацию новых методов, использующих измерения параметров ГПЗ на низкоорбитальных КА, планетарные модели ГПЗ, создаваемые по спутниковым данным, имеют ограничения по разрешающей способности, в лучшем

<sup>7</sup> Приказ Минэкономразвития России от 29 марта 2017 г. №138 «Об установлении структуры государственной геодезической сети и требований к созданию государственной геодезической сети, включая требования к геодезическим пунктам».



случае — на уровне около 140 км. Это существенно (в несколько раз) уступает уровню современных и перспективных требований геодезического обеспечения научно-технологической и социально-экономической сфер к определению детальных характеристик аномального ГПЗ (Табл. 3).

**Таблица 3** ➔

Обобщенные показатели требований к цифровым моделям ВКГ, АСТ и УОЛ.

| Определяемая величина | Область определения   | Точность определения (СКП) | Дискретность определения |         |
|-----------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------|---------|
|                       |                       |                            | угл. мин                 | км      |
| ВКГ                   | Россия                | 5 см                       | 0,5...1                  | 1...2   |
|                       | Мировой океан         | 5 см                       | 1...2                    | 2...4   |
|                       | Зарубежные территории | 5...10 см                  | 2...5                    | 4...10  |
| АСТ                   | Россия                | 1–2 мГал                   | 0,3...1                  | 0,7...2 |
|                       | Мировой океан         | 3...5 мГал                 | 1...2                    | 2...4   |
| УОЛ                   | Россия                | 0,5"                       | 0,3...1                  | 0,7...2 |
|                       | Мировой океан         | 1,0"                       | 1...2                    | 2...4   |

В этой связи перед современными КГС ранее и сейчас ставятся задачи не только по повышению точности и разрешающей способности планетарных моделей геопотенциала, но и по уточнению детальных характеристик аномального ГПЗ: ВКГ, АСТ, УОЛ. Как известно, основной вклад в решение второй задачи дает использование метода спутниковой альтиметрии, обеспечивающего в настоящее время сантиметровую точность определения высот геоида с пространственным разрешением по длинам волн геоида на уровне 10 км. Однако этот метод может использоваться только в океанах (не работает на суше) и сталкивается с ограничениями в высоких широтах и районах с неблагоприятной ледовой обстановкой. Вследствие этого, требуемое повышение точности и детальности глобальных моделей ГПЗ возможно лишь при комплексировании спутниковых моделей геопотенциала и данных альтиметрии с наземной гравиметрической информацией в виде средних значений АСТ по географическим трапециям достаточно малых размеров. Наиболее востребованный на сегодняшний день размер трапеций — 5×5'. Однако формирование достаточно полного и точного каталога АСТ такой детальности по имеющейся исходной информации затруднительно вследствие недостаточной изученности в гравиметрическом отношении значительной части зарубежных территорий.

Повышение требований к точности КМЗ и ГМЗ неизбежно сталкивается с необходимостью решения динамических задач, поскольку дальнейшее уточнение значительной части геодезических параметров становится возможным только при учете изменений этих параметров с течением времени. За рубежом тенденции комплексирования КМЗ и ГМЗ с динамическими моделями прослеживаются с конца 1990-х годов. Приоритетными задачами ДМЗ являются повышение точности определения и учета колебаний уровня Мирового океана, приливов в твердой Земле и океанах, движения полюсов, неравномерности вращения Земли, смещения ее центра масс Земли, горизонтальных и вертикальных движений земной коры, эволюции планетарного ГПЗ под влиянием различных природных факторов, включая глобальные изменения климата, вариации водного баланса, таяние ледников и т.п. [11].

Свой вклад в решение динамических задач может внести перспективная КГС России. Более того, с учетом зарубежного опыта и тенденций развития

космической геодезии одной из отличительных особенностей КГС следующего поколения, вероятно, может стать перенос акцента с решения традиционных координатных и гравитационных задач на создание (уточнение) ДМЗ, актуальность которых на современном этапе развития геодезии неуклонно повышается. Растущий интерес к ДМЗ обусловлен тем, что помимо периодической актуализации традиционных геодезических параметров они нужны для лучшего понимания процессов, которые происходят внутри Земли, на ее поверхности и в атмосфере. Такие модели востребованы в приложениях, связанных, в частности, с изучением распределения и перемещения масс в оболочках Земли (атмосфере, континентальной гидросфере и океанах, литосфере), внутреннего строения Земли, косейсмических и постсейсмических процессов, динамической топографии Мирового океана.

Отечественный опыт показывает, что единство подходов к решению целевых задач КГС, включая координатные, гравитационные и динамические задачи, обеспечивается централизованным доведением этих задач до конечного результата в наземном специальном комплексе (НСК). Под НСК понимается специальный комплекс КГС, предназначенный для обеспечения потребителей целевой информацией на основе сквозной технологии, включающей планирование работы измерительных систем, проведение траекторных измерений с наземных пунктов наблюдений, сбор и хранение измерительной и дополнительной информации, ее предварительную и конечную обработку, верификацию и выдачу результирующей информации потребителям. Очевидно, дополнение перспективной КГС задачами научно-технологической и социально-экономической направленности неизбежно отразится на НСК, потребует его модернизации, включая реализацию новых методов космической геодезии и наращивание возможностей по составу определяемых параметров, объему и оперативности обработки поступающей измерительной информации.

Таким образом, трансформация перспективной КГС в систему двойного назначения должна осуществляться, начиная со стадии ее проектирования. При этом целесообразным является определение проектного облика системы с учетом обеспечения ее мультизадачности и междисциплинарности.

### **3.2 Определение возможных способов решения целевых задач и повышения эффективности использования перспективной КГС в научной и социально-экономической сферах**

Решение целевых задач перспективной КГС с учетом увеличения их объемов, сложности и требований к результатам может быть обеспечено за счет:

- наращивания состава орбитальной группировки КГС, использования новых типов космических аппаратов, в том числе низкоорбитальных КА, и новых классов орбит;
- повышения точности традиционных измерительных средств космической геодезии (радиотехнических, квантово-оптических);
- расширения состава бортовой специальной аппаратуры;
- увеличения срока службы целевых КА;
- дальнейшей модернизации наземного специального комплекса (НСК);



- совершенствования и развития методов и технологий обработки измерительной информации.

Наращивание состава орбитальной группировки перспективной КГС, в том числе за счет новых типов КА, обусловливается целесообразностью использования различных инструментальных методов спутниковой геодезии с максимальной эффективностью. Исходя из этого, на перспективу предлагается расширенная схема орбитального построения КГС, предусматривающая дополнение прототипа (КГС «ГЕО-ИК-2») следующими новыми компонентами: пассивным КА с лазерными отражателями типа «Блиц» для использования в среднем диапазоне высот (1000...3000 км) в целях уточнения масштаба ОГСК, параметров вращения Земли и ее внешнего гравитационного поля в диапазоне длинных волн (до нескольких тысяч километров) [12]; низкоорбитальными КА (высота орбиты до нескольких сотен километров), обеспечивающими реализацию спутниковых методов измерения ГПЗ, в том числе методов межспутникового слежения и спутниковой градиентометрии.

Группировка среднеорбитальных КА в базовом составе может быть ограничена двумя спутниками, однако при этом возможны различные схемы ее использования. Один из возможных вариантов – использование обоих спутников для выполнения, по сути, одной и той же программы измерений, например, программы, предусматривающей последовательный набор высотомерной информации для построения опорного каркаса повторяющихся (изомаршрутных) подспутниковых трасс и его сгущения с использованием одиночных заполняющих трасс (при наличии возможности коррекции орбиты КА). В качестве альтернативного варианта можно предложить схему, при которой каждый из спутников среднего яруса используется для выполнения своей программы измерений, например, один из этих спутников обеспечивает решение геодезических задач, связанных с повышением точности определения детальных характеристик ГПЗ в Мировом океане, а другой обеспечивает решение океанографических задач, связанных с повышением точности определения уровня Мирового океана и его изменений во времени. Каждый из этих вариантов имеет свои преимущества и недостатки. Первый вариант более технологичен, второй вариант более функционален, вплоть до использования на каждом КА радиовысотомера, конструкция и характеристики которого наилучшим образом отвечают его предназначению.

Группировка низкоорбитальных КА с учетом опыта реализации зарубежных спутниковых геодезических миссий GRACE, GOCE и GRACE-FO в базовом варианте должна включать в себя: два КА, движущихся по одной и той же орбите с расстоянием около 200 км между ними и обеспечивающих проведение высокоточных измерений межспутниковой дальности с инструментальной погрешностью не более 10 нм; один КА, обеспечивающий проведение измерений полного тензора вторых производных геопотенциала с инструментальной погрешностью не более 0,001 Этвеш. Комплексирование двух методов спутниковой гравиметрии, а именно, метода межспутниковой дальнометрии и метода спутниковой градиентометрии, направленных на повышение чувствительности и разрешающей способности системы в части гравитационных аномалий и их изменений во времени. Ожидаемым результатом является расширение возможностей КГС в плане наращивания точности, повышения детальности и увеличения периодичности обновления спутниковых моделей ГПЗ.

Повышение эффективности применения методов спутниковой гравиметрии связано не только с уменьшением высоты орбиты КА, обусловленным целесообразностью повышения чувствительности новых измерительных систем к гравитационным аномалиям, но и с увеличением полноты покрытия земного шара высокоточной измерительной информацией, в первую очередь, за счет более полного охвата полярных областей Земли.

В состав группировки низкоорбитальных КА перспективной КГС могут войти также один или несколько КА, обеспечивающих реализацию так называемого метода ГНСС-альтиметрии, сущность которого состоит в следующем. На борту КА (высота орбиты 400–500 км) регистрируются сигналы навигационных спутников системы ГЛОНАСС и других ГНСС. Параллельно осуществляется прием этих же сигналов, отраженных от морской поверхности. По задержкам прямого и отраженного сигналов определяются средние высоты морской поверхности. Достижимая точность оценивается на уровне нескольких (2–3) дециметров. По оценкам, с орбиты высотой 400 км можно обеспечить практически однородное покрытие морской поверхности трассами с шагом 75 км примерно за одни сутки. На интервале 10 суток акватория Мирового океана практически на любом ее участке может быть покрыта измерениями с плотностью одно измерение на 3–5 км<sup>2</sup>. Таким образом, включение в состав орбитальной группировки перспективной КГС объектов, обеспечивающих реализацию метода низкоорбитальной ГНСС-альтиметрии, позволит повысить детальность и оперативность определения высот морской топографической поверхности до уровня, выходящего за рамки возможностей традиционных систем спутниковой радиолокационной альтиметрии.

Повышение точности традиционных измерительных средств, под которыми понимаются наземные и спутниковые средства траекторных измерений, необходимо для более точного определения орбит КА, лежащего в основе решения большинства современных задач космической геодезии. Развитие российской космической геодезии практически все время шло по такому пути. Как следствие, одно из основных различий российских КГС (КГК) нового и предшествующего поколений практически во всех случаях выразилось именно в повышении точности традиционных (переходящих из поколения в поколение) измерительных средств. Вместе с этим, следующее поколение практически всегда отличалось применением принципиально новых видов специальной аппаратуры. В комплексе «ГЕОИК» это был спутниковый радиовысотометр, в системе «ГЕО-ИК-2» – бортовая аппаратура спутниковой (ГНСС) навигации.

Расширение состава бортовой специальной аппаратуры перспективной КГС обуславливается, в первую очередь, повышением точности и детальности определения параметров ГПЗ с использованием развивающихся и новых методов космической геодезии. Соответственно, комплекс бортовой специальной аппаратуры расширенного состава должен включать в себя ряд инновационных измерительных систем, в том числе радиотехническую или/и квантово-оптическую систему высокоточного межспутникового слежения и спутниковый гравитационный градиентометр. К ним может добавиться аппаратура для приема и регистрации отраженных от морской поверхности сигналов навигационных КА системы ГЛОНАСС и других ГНСС.

Кроме этого, комплекс бортовой специальной аппаратуры перспективной КГС расширенного состава должен включать в себя дополнительные

аппаратные средства вспомогательного назначения в том числе: микроволновый радиометр, обеспечивающий повышение точности определения поправок за влажность водяных паров в тропосфере; системы компенсации (учета) негравитационных возмущений движения КА, обеспечивающую исключение (минимизацию) влияния негравитационных возмущающих ускорений на результаты измерения параметров ГПЗ. Компенсация (учет) негравитационных возмущений имеет особое значение с точки зрения эффективного применения метода спутниковой градиентометрии. Решение этой проблемы может обеспечиваться использованием в составе бортового оборудования спутника высокоточных трехосных акселерометров и пропорциональных реактивных двигателей.

Увеличение срока службы КА обуславливается целесообразностью обеспечения непрерывного долговременного набора различных видов целевой измерительной информации в требуемых объемах, в интересах, в первую очередь, решения динамических задач, и в том числе задач, связанных с мониторингом изменения планетарных характеристик ГПЗ во времени. Минимальные сроки службы КА различного назначения оцениваются следующими ориентировочными показателями: для реализации метода спутниковой альтиметрии — 5 лет; для реализации метода межспутниковых измерений — 10 лет; для реализации метода спутниковой градиентометрии — не менее 3 лет.

Необходимость дальнейшей модернизации наземного специального комплекса, как одного из необходимых условий успешного решения целевых задач перспективной КГС, вызывается тем, что его характеристики и возможности относятся к факторам, оказывающим существенное влияние на эффективность и качество решения целевых задач КГС. Согласно ГОСТ Р 53802-2010, под наземным специальным комплексом понимается специальный комплекс космической системы, технические средства которого размещаются на стационарных или мобильных объектах наземного базирования, предназначенный для обеспечения потребителей целевой информацией и результатами ее обработки.

В соответствии с современными представлениями в состав наземного специального комплекса КГС должны входить: наземные пункты наблюдений КА (НПН); полигон(ы) калибровки высокоточного радиовысотомера (ПК ВРВ); пункты приема специальной информации геодезических КА по телеметрическим каналам (ППСИ); специализированный центр обработки данных (СЦОД); автоматизированная система управления (АСУ).

В числе основных функциональных задач НСК можно отметить: планирование работы наземных и бортовых измерительных средств КГС; проведение лазерных и радиотехнических измерений на наземных пунктах наблюдений; проведение радионавигационных и гидрографических определений на объектах ПК ВРВ; прием специальной информации; передачу измерительной и служебной информации с НПН, пунктов приема ППСИ и ПК ВРВ в СЦОД по каналам связи; сбор, накопление, хранение и обработку для решения целевых задач КГС; выдачу результатов решения этих задач потребителям.

Целью модернизации НСК является приведение его возможностей в соответствие с требованиями перспективной КГС. Это предполагает: совершенствование существующих и разработку новых методов и технологий, обеспечивающих обработку измерительной информации КГС в расширенном составе и с улучшенными точностными характеристиками;

развитие инфраструктуры, включая создание дополнительных полигонов калибровки ВРВ и необходимого количества полигонов калибровки спутникового градиентометра; создание новых НПН на базе пунктов российской системы дифференциальной коррекции и мониторинга ГНСС и обсерваторий радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО» [13] для повышения точности реализации и поддержания ОГСК на уровне перспективных требований; создание и развитие необходимых функциональных дополнений НСК.

Целесообразность использования указанных функциональных дополнений обусловлена тем, что решение части целевых геодезических задач с требуемой полнотой, точностью и достоверностью только на базе применения методов и средств космической геодезии в настоящее время не представляется возможным. Исходя из терминологии ГОСТ Р 52928-2010 «Система спутниковая навигационная глобальная. Термины и определения», под функциональным дополнением НСК предлагается понимать комплекс технических и программных средств, предназначенных для обеспечения целевых геодезических задач дополнительной информацией, позволяющей улучшить результаты решения этих задач.

Примерами некоторых возможных направлений использования указанных функциональных дополнений могут служить:

- 1) повышение точности и детальности определения аномалий силы тяжести в районах, недоступных или проблемных для изучения методом спутниковой альтиметрии (удаленные и труднодоступные районы РФ, отдельные зарубежные территории, включая Антарктиду, а также морские акватории в районах континентального шельфа, высоких широт и неблагоприятной ледовой обстановки), в целях улучшения точностных характеристик и пространственного разрешения глобальных и региональных моделей аномального ГПЗ;
- 2) повышение точности, достоверности и оперативности мониторинга вертикальных движений земной коры в районах расположения НПН в целях повышения точности и достоверности обработки траекторной измерительной информации НПН;
- 3) оперативное уточнение параметров ионосферы в целях повышения точности и достоверности измерительной информации, получаемой с использованием спутниковых радиодальномерных систем особенно в аномальных ионосферных условиях.

В качестве возможных функциональных дополнений, обеспечивающих реализацию перечисленных направлений, можно рассматривать:


- для первого направления: гравиметрические комплексы, способные функционировать на подвижных носителях — морских судах и (или) летательных аппаратах (самолетах, вертолетах и др.)<sup>8</sup> [14];
- для второго направления: автоматизированные геофизические комплексы (обсерватории), колоцированные с НПН и включающие в себя высокоточные абсолютные и (или) относительные гравиметры, трехкомпонентные сейсмостанции и другое оборудование [15, 16];
- для третьего направления: системы оперативного мониторинга состояния ионосферы по сигналам ГНСС на базе сети постоянно действующих станций ионосферного мониторинга стационарного

8 Конешов В.Н., Костицын В.И. Аппаратура и технологии гравиразведки и магниторазведки: авиационные и морские гравиметры: учебное пособие // Пермский государственный национальный исследовательский университет. Пермь, 2021. 108 с.

типа, подвижных объектов, оснащенных навигационными приемниками сигналов ГНСС геодезического класса (низкоорбитальных космических аппаратов, воздушных, морских и речных судов, объектов железнодорожного и автомобильного транспорта), а также аппаратно-программных средств сбора и обработки измерительной информации [17].

Отдельным функциональным дополнением могут стать перспективные измерительные системы, построенные по принципу квантового нивелира – нового геодезического инструмента, использующего для регистрации изменения высоты прецизионные измерения релятивистских эффектов с применением высокостабильных перебазируемых стандартов частоты и времени (СЧВ) и методов их синхронизации [18].

Одним из необходимых и важных условий эффективного применения модернизированного НСК и перспективной КГС является совершенствование и развитие методов и технологий обработки измерительной информации. Это определяется, с одной стороны, прогнозируемо высоким уровнем требований к характеристикам выходных данных, с другой стороны, целесообразностью реализации мультизадачности и междисциплинарного подхода, что обуславливается, в том числе, многообразием возможных потребителей (по областям применения данных). Это показано в Таблице 4 на примере ГМЗ.

**Таблица 4**   
 Обобщенные показатели требований к характеристикам ГМЗ в зависимости от области применения.

| Область применения                | Определяемый параметр | Область действия            | Точность (СКП) | Разрешение (полуволна геоида), км |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------------|
| Океанология, гидрография          | ВГ, см                | Мировой океан               | 1...2          | 10...100                          |
|                                   |                       |                             | 0,1            | 1000                              |
| Физика литосферы и верхней мантии | АСТ, мГал             | Суша                        | 1 – 2          | 10...100                          |
|                                   |                       |                             | 0,5 – 1,0      | 100...200                         |
| Геотектоника                      | АСТ, мГал             | Суша                        | 1 – 2          | 100...500                         |
| Сейсмология                       | АСТ, мГал             | Суша                        | 0,5...1        | 100                               |
| Геодезия                          | ВГ                    | Земной шар                  | 1              | 100...1000                        |
| Инерциальная навигация            | АСТ, мГал             | Земной шар (до высот 15 км) | 1 – 5          | 5...100                           |
|                                   | УОЛ, угл. с           | Земной шар (до высот 15 км) | 0,5 – 1,0      | 1...10                            |
| Космическая баллистика            | АСТ, мГал             | Околосферное пространство   | 1 – 3          | 100...1000                        |

Проведенный анализ возможных направлений совершенствования и развития методов и технологий обработки измерительной информации перспективной КГС показал, что к ним можно отнести ряд направлений, связанных с реализацией повышенной точности традиционных измерительных средств, применяемых в космической геодезии; с эффективным использованием новых видов измерительной геодезической информации, включая данные межспутниковых измерений и спутниковой градиентометрии, а также информацию, получаемую с использованием перечисленных выше функциональных дополнений НСК; с продвижением системы базовых геодезических моделей в направлении расширения состава создаваемых и поддерживаемых в актуальном состоянии динамических моделей, улучшения их характеристик по точности, достоверности и разрешающей способности. В интегральном смысле одно из ключевых направлений



ожидаемо будет связано с повышением точности и пространственно-временного разрешения глобальных и региональных геодезических моделей. Это потребует создания аппаратно-программных комплексов, обеспечивающих реализацию достаточно новых для геодезической практики методов и технологий обработки измерительной и дополнительной информации, в том числе с использованием методов интеллектуального анализа, нейросетевого моделирования, машинного обучения и самоорганизации моделей, технологий параллельных вычислений, распределенной обработки и больших данных.

В контексте междисциплинарного подхода одно из возможных требований к технологиям обработки измерительной информации перспективной КГС состоит в том, что они должны обеспечивать дополнение индустрии традиционных геодезических моделей получением проблемно-ориентированных решений, улучшающих понимание различных процессов, происходящих внутри Земли, на ее поверхности и в атмосфере. Такие проблемно-ориентированные модели уже сегодня представляют интерес с точки зрения изучения распределения и перемещения масс в наружных оболочках Земли (атмосфере, континентальной гидросфере и океанах, литосфере), уточнения представлений о внутреннем строении Земли, унификации систем абсолютных высот, исследования косейсмических и постсейсмических процессов крупных землетрясений. В океанографии это может привести к лучшему пониманию средних (или «абсолютных») океанических циркуляций. В свою очередь, новые знания в области океанических циркуляций способны привести к значительному улучшению оценок перемещения огромных потоков тепла, соленых и пресных вод, а также к лучшему пониманию углеродных циклов.

Возможности междисциплинарного подхода к использованию данных перспективной КГС можно проиллюстрировать на примере спутниковой альтиметрии. Непосредственно по данным радиолокационной спутниковой альтиметрии могут определяться: средняя (квазистационарная) и динамическая составляющие топографии океана; изменчивость уровня Мирового океана, значимая высота волн, коэффициент обратного рассеяния, высота подстилающей поверхности. Полученные данные о средней топографии морской поверхности позволяют вычислять детальные характеристики аномального ГПЗ: ВГ, УОЛ и АСТ, а также аномалии высот морской поверхности. Дальнейшее применение этой информации связано с уточнением ОГСК и глобальной модели ГПЗ, реализацией общемировой системы высот, решением навигационных задач, картографированием и исследованием рельефа дна Мирового океана, изучением внутреннего строения Земли и движения тектонических плит. Данные о динамической топографии морской поверхности могут использоваться для уточнения глобальных моделей приливов. Возможные направления использования информации о колебаниях уровня морской поверхности связаны с изучением современных вертикальных движений земной коры, климатических циркуляций и синоптической изменчивости вод Мирового океана и отдельных акваторий, волн цунами, планетарных волн Россби, Кельвина и градиентно-вихревых волн. Данные о значимой высоте волн могут представлять интерес с точки зрения изучения динамики ветрового волнения и климатической изменчивости высот волн в Мировом океане. Значения коэффициента обратного рассеяния могут служить источником ценной информации о сплоченности морских льдов, характеристиках ледовой



обстановки на акваториях крупных озер, рек и водохранилищ, а также, например, о климатической изменчивости скорости приводного ветра и заболоченности местности. Результаты определения высот подстилающей поверхности могут использоваться в интересах мониторинга и изучения изменчивости толщины ледниковых щитов Антарктиды и Гренландии.

Таким образом, данные спутниковой альтиметрии и результаты их тематической обработки могут повысить эффективность научных исследований и разработок в различных областях знаний, включая геодезию, гравиметрию, геофизику, геологию, гидрографию, навигацию, океанологию, гидрологию, гляциологию, климатологию, ландшафтоведение и др.

Еще одним направлением повышения эффективности целевого использования измерительной информации перспективной КГС в научно-технологической и социально-экономической сфере может стать дополнение традиционных задач, связанных с уточнением геодезических моделей, новыми задачами, в частности, задачами спутникового мониторинга и изучения неприливых изменений ГПЗ, актуальность которых в последние годы обострилась в связи с происходящими глобальными изменениями.

Традиционно вариации силы тяжести изучаются с использованием высокоточных гравиметрических наблюдений и геодезических измерений в специально оборудованных местах. Однако на сегодняшний день требуется не только локальный, но и глобальный мониторинг, который невозможен без использования спутниковых наблюдений по всему земному шару. По опыту современных зарубежных космических геодезических миссий, в настоящее время задачи спутникового мониторинга изменений ГПЗ наиболее успешно и эффективно решаются по данным высокоточной низкоорбитальной межспутниковой дальнометрии, что подтверждают миссии GRACE и GRACE-FO.

Спутники GRACE, запущенные в 2002 г., и спутники GRACE-FO, запущенные в 2018 г., успешно продемонстрировали возможность уточнения параметров ГПЗ на основе радиометрических (микроволновых) и лазерных измерений межспутникового расстояния с высокой точностью, в системе GRACE – на микрометровом уровне; в системе GRACE-FO – на субнанометровом уровне. Основным результатом миссий GRACE и GRACE-FO является значительное повышение точности определения сферических гармоник геопотенциала и их изменений во времени в диапазоне длинных и средних волн геоида. При этом показано, что межспутниковые измерения в геодезических системах типа GRACE и GRACE-FO позволяют выявлять временные изменения гармонических коэффициентов геопотенциала не только с годичной, квартальной и месячной периодичностью, но и на более коротких, декадных, недельных и даже суточных интервалах<sup>9</sup> [19, 20]. Регистрируемые по данным низкоорбитальных межспутниковых измерений неприливые вариации параметров ГПЗ во времени можно эффективно использовать в целях мониторинга изменений запасов подземных вод на суше, колебания массы морской воды, вызванного циркуляцией океана, изменения массы полярного льда, глобального изменения уровня моря и т.д. [21–23].

Одной из основных задач обработки измерительной информации перспективной КГС в части данных спутниковой градиентометрии будет

<sup>9</sup> International Centre for Global Earth Models (ICGEM). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://icgem.gfz-potsdam.de/home> (дата обращения: 20.12.2023).

повышение точности и детальности определения стационарной компоненты ГПЗ в диапазоне средних длин волн. Статистика современных глобальных моделей ГПЗ показывает, что данные спутниковой градиентометрии, полученные в ходе реализации миссии GOCE, позволяют до 1,5 раз повысить разрешающую способность спутниковых моделей геопотенциала, характеризуемых сантиметровой точностью определения ВКГ и миллигальной точностью определения АСТ<sup>9</sup>. Такие модели представляют интерес, например, в плане повышения точности и достоверности определения отклонений квазистационарной морской поверхности от геоида, включая обнаружение океанских течений. В свою очередь, учет этих отклонений имеет существенное значение при обработке данных спутниковой альтиметрии.

Возможные пути дальнейшего повышения эффективности метода спутниковой градиентометрии предполагают разработку и реализацию решений, затрагивающих различные аспекты применения данного метода, включая, в частности, улучшение точностных характеристик измерительных систем, в том числе за счет создания и применения градиентометров на новых физических принципах, повышение точности траекторной координатно-временной привязки измеренных градиентов силы тяжести, уменьшение высоты полета КА (до 250 км и менее), совершенствование систем компенсации (учета) негравитационных возмущений орбиты спутника, оптимизацией методик обработки градиентометрической информации [24, 25]. В методическом плане особое значение имеет минимизация влияния на точность восстановления параметров ГПЗ некорректностей, обусловленных отсутствием покрытия измерительной информацией полярных зон из-за наклона орбиты спутникового градиентометра (для КА типа GOCE с наклоном орбиты  $96,5^\circ$  размеры этих зон характеризуются угловым радиусом около  $6^\circ$ ). В качестве научного задела по этой проблеме можно отметить различные алгоритмы регуляризации процедуры гармонического анализа, описанный, в частности, в работах [26].

Существенный эффект в плане уточнения спутниковых моделей ГПЗ может дать комплексирование данных спутниковой градиентометрии и межспутниковых измерений, как с точки зрения повышения точности определения сферических гармоник геопотенциала в области низких частот, так и с точки зрения решения проблемы полярных зон. Последнее обусловлено тем, что система «спутник-спутник» может быть реализована с использованием околополярной орбиты (по опыту миссий GRACE и GRACE-FO, с наклоном  $89,5^\circ$ ).

Следует отметить также, что одним из ключевых факторов, позволяющих повысить заинтересованность представителей научно-технологической и социально-экономической сферы в перспективной российской КГС, является доступность измерительной информации и результатов ее обработки. Решить возможные проблемы с обеспечением доступа и информационного взаимодействия различных категорий потребителей этих данных позволит, с одной стороны, создание в структуре НСК специализированных сервисов, обеспечивающих информирование о наличии, прием и обслуживание запросов потребителей на выдачу требуемых данных, с другой стороны, внедрение стандарта, обеспечивающего использование единых подходов к систематизации измерительной информации и результатов ее обработки.

По заслуживающему внимания опыту Европейского космического агентства и НАСА данные космических геодезических миссий в процессе их получения и обработки целесообразно делить на четыре класса (уровня): телеметрическая информация, «сырые» измерения; продукты предварительной (первичной) обработки с различной степенью глубины; продукты начального уровня тематической обработки информации, прошедшей первичную обработку; продукты углубленной (специализированной) тематической обработки измерительной информации. В свою очередь, каждый из этих уровней, за исключением первого, может иметь несколько подуровней, отражающих различную глубину и направленность обрабатываемых процедур в соответствии с запросами потребителей.

Таким образом, целесообразность создания перспективной российской КГС обусловлена повышением требований различных категорий потребителей геодезической информации к точности и другим характеристикам решения координатных, гравитационных и динамических задач. При этом прогнозируется, что одним из основных отличий перспективной КГС будет увеличение объема и весомости динамических задач. Соответственно, потребуются включение в состав КГС спутников с достаточно большими сроками активного существования (до 10 лет и более), а также осуществление повторных запусков КА для восстановления (пополнения) орбитальной группировки для пролонгации программ спутниковых наблюдений в режиме глобального мониторинга.

Эффективность российской КГС следующего поколения может быть повышена при следующих условиях – это должна быть система, отличающаяся от предшествующих КГС и КГК РФ нацеленностью на решение широкого круга задач, в том числе задач научно-технологического и социально-экономического характера, реализацией междисциплинарного подхода к получению и обработке измерительной информации, глубокой модернизацией орбитальной группировки и наземного специального комплекса. Орбитальная группировка перспективной КГС должна иметь многоярусное построение, обеспечивающее непрерывный сбор информации о геодезических и геофизических параметрах и их вариациях во времени в глобальном масштабе (глобально по поверхности Земли) путем проведения траекторных, альтиметрических, межспутниковых и градиентометрических измерений. Соответственно, в состав КГС должны входить: комплекс траекторных измерений, включающий в себя бортовую аппаратуру ГНСС-навигации для использования на СКА и НКА, наземную и бортовую аппаратуру доплеровских псевдодальномерных измерений, наземные и бортовые средства лазерных дальномерных измерений; комплекс спутниковых альтиметрических измерений в составе двух среднеорбитальных КА с бортовой аппаратурой, включающей высокоточный радиовысотомер и микроволновый радиометр; комплекс межспутниковых измерений в составе двух низкоорбитальных КА с бортовой аппаратурой, обеспечивающей проведение высокоточных радиотехнических и/или лазерных измерений расстояния между этими КА; комплекс спутниковой градиентометрии на базе низкоорбитального КА, оборудованного системой высокоточных измерений вторых производных гравитационного геопотенциала и системой компенсации (учета) негравитационных возмущений; комплекс средств синхронизации измерительной информации; модернизированный НСК, включающий в себя ЦОД, АСУ, необходимое количество НПН, ППСИ, ПК ВРВ, а также рассмотренные выше функциональные дополнения.

## 4 Выводы

На основе проведенного исследования сформулирован ряд концептуальных предложений по созданию новой КГС России с учетом ее возможного использования в интересах научно-технологического и социально-экономического развития РФ. Такой аспект обусловлен дальнейшим совершенствованием всей системы геодезического обеспечения страны, повышением эффективности освоения космического пространства и использования высокоточных космических систем (комплексов), а также с укреплением технологического суверенитета России в области геодезии и смежных видов деятельности. Исходя из опыта применения ГНСС (GPS, ГЛОНАСС) и реализации ряда зарубежных космических геодезических миссий, в том числе GRACE и GOCE, предпочтительно создание перспективной российской КГС не только как системы двойного назначения, но и как системы, которая в определенной мере характеризуется междисциплинарностью и мультизадачностью. Приведенные прогнозные оценки перспективных требований геодезического обеспечения научно-технологического и социально-экономического развития страны обуславливают целесообразность создания КГС следующего поколения с реализацией ряда новых для геодезического обеспечения страны технических и технологических решений. В первую очередь, это расширение спутниковой группировки за счет использования низкоорбитальных геодезических КА, обеспечивающих повышение точности и разрешающей способности спутниковых моделей геопотенциала, а также мониторинг изменений глобального ГПЗ во времени. Во-вторых, это модернизация наземного специального комплекса, предполагающая совершенствование существующих и разработку новых методов и технологий, обеспечивающих обработку измерительной информации КГС в расширенном составе и с улучшенными точностными характеристиками; развитие инфраструктуры, включая создание полигонов калибровки ВРВ и спутникового градиентометра; создание новых НПН на базе пунктов СДКМ и обсерваторий радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО». Отдельно следует отметить целесообразность создания функциональных дополнений НСК, в том числе: аэрогравиметрических комплексов для повышения точности определения АСТ в удаленных и труднодоступных районах; геофизических обсерваторий для мониторинга вертикальных движений земной коры в районах НПН; систем оперативного мониторинга ионосферы для повышения точности спутникового позиционирования и реализации ОГСК; систем измерения релятивистских эффектов по принципу квантового нивелира для повышения точности реализации государственной системы высот в удаленных и труднодоступных районах. Также целесообразно создание в структуре НСК специализированных сервисов для информационного обслуживания различных категорий потребителей КГС и внедрение единых подходов к систематизации измерительной информации и результатов ее обработки.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование частично проведено в рамках госзадания Минобрнауки РФ FSFE-2023-0005 «Фундаментальные и поисковые исследования путей повышения эффективности комплексного использования разнородных пространственных данных в интересах ускорения цифровой трансформации экономики и обеспечения устойчивого развития территорий Российской Федерации».

- БИБЛИОГРАФИЯ**
1. Геодезия, картография, топография, фотограмметрия, геоинформационные системы, пространственные данные. Справочник стандартных (нормативных) терминов / Под общ. ред. В.Г. Плешкова, Г.Г. Побединского. М.: ООО «Издательство «Проспект», 2015. 672 с.
  2. Карпик А.П. Современное состояние и проблемы геоинформационного обеспечения территорий // ИНТЕРЭКСПО ГЕОСИБИРЬ. 2012. № 5. С. 3–8.
  3. Цветков В.Я., Ознамец В.В., Филатов В.Н. Геодезическое обеспечение как сложная система // Информация и космос. 2019. № 2. С. 88–92.
  4. Косенко В.Е. Комплексные исследования по обоснованию путей создания, принципов построения, определению проектного облика космической системы глобального геодезического мониторинга // Альманах современной метрологии. 2015. № 3. С. 9–20.
  5. Тестоедов Н.А., Карутин С.Н. Космическая геодезия, связь и навигация: история развития, состояние и перспективы // Вестник РАН. 2021. Т. 91. № 11. С. 1074–1082.
  6. Wdowski S., Eriksson S. Geodesy in the 21st Century // EOS Transactions. 2009. Vol. 90. P. 153–154.
  7. Машимов М.М. Координатно-гравитационная задача как одна из главных в астрономо-геодезии нового времени // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2000. № 3. С. 42–80.
  8. Суздалев А.С., Вовк И.Г., Артемьева Н.П. Пространственно-временные вариации гравитационного поля Земли // ИНТЕРЭКСПО ГЕОСИБИРЬ. 2012. Т. 3. С. 20–25.
  9. Гусев И.В. Оценка согласованности системы координат ПЗ-90 с Международной земной системой координат ITRF // Геодезия и картография. 2023. № 6. С. 2–11. DOI:10.22389/0016-7126-2023-996-6-2-11.
  10. Конешов В.Н., Непоклонов В.Б., Спиридонова Е.С., Максимова М.В. Особенности сравнительной оценки глобальных моделей гравитационного поля Земли // Физика Земли. 2020. № 2. С. 115–126.
  11. Суздалев А.С. Изучение в волновой области эволюции гравитационного поля Земли // ИНТЕРЭКСПО ГЕОСИБИРЬ. 2009. Т. 1. № 2. С. 45–50.
  12. Соколов А.Л., Меренкова Ю.И., Медведева Г.И. и др. Ретрорефлекторные сферические системы стеклянных спутников «Блиц» // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2022. № 4(141). С. 108–122.
  13. Финкельштейн А.М., Ипатов А.В., Кайдановский М.Н. и др. Радиоинтерферометрическая сеть «Квазар-КВО» – базовая система фундаментального координатно-временного обеспечения // Труды ИПА РАН. 2005. Вып. 13. С. 104–138.
  14. Конешов В.Н. Современные методы морской и аэрогравиметрии, созданные с участием ИФЗ РАН // Земля и Вселенная. 2018. № 6. С. 13–20.
  15. Дробышев М.Н., Конешов В.Н., Непоклонов В.Б. Уточнение вертикального положения точки на земной поверхности по геофизическим данным // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2016. № 1. С. 14–18.
  16. Витушкин Л.Ф., Гаязов И.С., Иванов Д.В. и др. Гравиметрический пункт в обсерватории «Светлое» радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО» // IX Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2021). СПб.: ИПА РАН. 2021.
  17. Куприянов А.О., Тихонов В.В., Морозов Д.А., Перминов А.Ю. Оперативный мониторинг параметров ионосферы в локальной области по результатам мультиматричных ГНСС-измерений // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2018. Т. 62. № 6. С. 616–623.




18. Фатеев В.Ф. Релятивистская теория и применение квантового нивелира и сети «Квантовый футшток» // Альманах современной метрологии. 2020. № 3(23). С. 11–52.
19. Bruinsma S., Lemoine J., Biancale R., Valès N. CNES/GRGS 10-day gravity field models (release 2) and their evaluation // Adv. Space Res. 2010. Vol. 45. No. 4. P. 587–601.
20. Zenner L., Bergmann-Wolf I., Dobsław H. et al. Comparison of Daily GRACE Gravity Field and Numerical Water Storage Models for De-aliasing of Satellite Gravimetry Observations // Surv. Geophys. 2014. Vol. 35. P. 1251–1266.
21. Frappart F., Ramillien G. Monitoring Groundwater Storage Changes Using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Satellite Mission: A Review // Remote Sensing. 2018. No. 10. P. 829.
22. Groh A., Horwath M. Antarctic Ice Mass Change Products from GRACE/GRACE-FO Using Tailored Sensitivity Kernels // Remote Sensing. 2021. Vol. 13(9). No. 1736.
23. Jeon T., Seo K.W., Youm K. et al. Global sea level change signatures observed by GRACE satellite gravimetry // 2018. No. 8(13519).
24. Zhu Z., Liao H., Tu H., Duan X., Zhao Y. Spaceborne Atom-Interferometry Gravity Gradiometry Design towards Future Satellite Gradiometric Missions // Aerospace. 2022. Vol. 9(5). No. 253.
25. Нейман Ю.М., Сугаипова Л.С. Основы разномасштабной аппроксимации геопотенциала: монография. М.: МИИГАиК, 2016. 218 с.
26. Brockmann J.M., Schubert T., Schuh W.D. An Improved Model of the Earth's Static Gravity Field Solely Derived from Reprocessed GOCE Data // Surv. Geophys. 2021. Vol. 42. P. 277–316.

**АВТОРЫ****Непеклонов Виктор Борисович**


ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия;

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук  
кафедра высшей геодезии, геодезический факультет  
д-р техн. наук, старший научный сотрудник

 0000-0003-1241-1117

**Гусев Игорь Витальевич**


АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»  
канд. техн. наук

 0000-0002-5843-2688

**Вшивкова Ольга Владимировна**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия

кафедра высшей геодезии, геодезический факультет  
д-р техн. наук, профессор РАН

 0000-0002-0315-7201

**Васютинский Игорь Юрьевич**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия

кафедра геодезии, геодезический факультет  
д-р техн. наук, профессор

Поступила 08.04.2023. Принята к публикации 21.08.2023. Опубликовано 28.08.2023.