

Гравиметрический пункт в обсерватории «Светлое» радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО»

© Л. Ф. Витушкин², И. С. Гаязов¹, Д. В. Иванов¹, А. В. Ипатов¹, Е. П. Кривцов²,
П. П. Кролицкий², В. В. Наливаев², О. А. Орлов², И. А. Рахимов¹, С. Г. Смоленцев¹

¹ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

²ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

В рамках Федерального проекта «Развитие передовой инфраструктуры для проведения исследований и разработок в Российской Федерации» национального проекта «Наука и университеты» и в соответствии с планами совершенствования приборной базы радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО» в 2020 г. было принято решение о создании высокоточного гравиметрического пункта (ГП) для проведения постоянного гравиметрического мониторинга в обсерватории «Светлое». Это решение также соответствует инициативе Международной ассоциации геодезии (Резолюция № 2 от 2015 г.) по созданию глобально распределенной опорной гравиметрической системы, построенной на абсолютных измерениях ускорения свободного падения (УСП) и его вариаций во времени современными высокоточными средствами измерений: абсолютными баллистическими и относительными криогенными гравиметрами. Необходимая связь такой системы с Международной земной системой отсчета ITRF обеспечивается базовыми пунктами, оснащенными по принципу колокации всеми современными средствами наблюдений методами космической геодезии. Именно к таким пунктам относятся обсерватории комплекса «Квазар-КВО», которые являются действующими базовыми пунктами (core sites) Глобальной системы геодезических наблюдений (GGOS). Поэтому естественным развитием обсерваторий комплекса в соответствии с требованиями GGOS является колоцирование средств координатных измерений со средствами высокоточных измерений локальных характеристик гравитационного поля (пространственного распределения УСП и его вариаций во времени) с помощью абсолютных и относительных гравиметров.

Для выбора месторасположения нового ГП в обсерватории «Светлое» были проведены предварительные сейсмические исследования, необходимость которых связана с большим техногенным сейсмическим шумом, вызываемым работой 32-метрового радиотелескопа (РТ-32). В последнее время значительно возросла интенсивность радиоинтерферометрических наблюдений и сложно найти подходящее временное окно для проведения точных измерений абсолютного значения УСП. Кроме того, в 2019 г. в обсерватории был введен в строй второй радиотелескоп РТ-13. По результатам сейсмических исследований было выбрано оптимальное место для создания ГП. Был смонтирован специальный павильон с развязанным фундаментом, на котором возможна одновременная установка нескольких гравиметров. На новом ГП установлен отечественный лазерно-интерференционный абсолютный гравиметр с активной системой виброизоляции опорного отражателя лазерного интерферометра. По результатам анализа серии измерений показана возможность определения значений УСП со среднеквадратическим отклонением 4 мкГал даже при работающих антеннах радиотелескопов.

Ключевые слова: гравиметрические измерения, ускорение свободного падения, абсолютный гравиметр, сейсмический шум, система виброизоляции.

Контакты для связи: Гаязов Искандар Сафаевич (gayazov@iaaras.ru).

Для цитирования: Витушкин Л. Ф., Гаязов И. С., Иванов Д. В., Ипатов А. В., Кривцов Е. П., Кролицкий П. П., Наливаев В. В., Орлов О. А., Рахимов И. А., Смоленцев С. Г. Гравиметрический пункт в обсерватории «Светлое» радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН. 2025. Вып. 74. С. 3–15.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.74.3-15>

Gravimetric Station at the Svetloe Observatory of the Quasar Network

© L. F. Vitushkin², I. S. Gayazov¹, D. V. Ivanov¹, A. V. Ipatov¹, E. P. Krivtsov², P. P. Krolitsky²,
V. V. Nalivaev², O. A. Orlov², I. A. Rakhimov¹, S. G. Smolentsev¹

¹Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

²Institute of Metrology, Saint Petersburg, Russia

Abstract

Within the framework of the federal project “Development of Advanced Infrastructure for Research and Development in the Russian Federation” (part of the national “Science” project) and in accordance with the development plans for the instrumental base of the “Quasar-KVO” radio interferometric complex, a decision was made in 2020 to establish a high-precision gravimetric site (GS) for continuous gravity monitoring at the “Svetloe” Observatory. This decision also

aligns with the initiative of the International Association of Geodesy (Resolution No. 2, 2015) to establish a globally distributed absolute gravity reference system. This system is based on absolute measurements of the free fall acceleration and its temporal variations using modern high-precision instruments: absolute ballistic and relative superconducting gravimeters. A crucial link between this system and the International Terrestrial Reference Frame (ITRF) is provided by core stations equipped, based on the principle of collocation, with all modern space geodetic observation techniques. The observatories of the “Quasar-KVO” complex represent such stations, as they are operational core sites of the international Global Geodetic Observing System (GGOS). Therefore, a natural development for the observatories of the “Quasar-KVO” complex, in accordance with GGOS requirements, is the collocation of coordinate measurement systems with high-precision systems for measuring local gravitational field parameters. These parameters include the spatial distribution of the free fall acceleration and its temporal variations, measured using absolute and relative gravimeters.

Preliminary seismic investigations were conducted at the “Svetloe” Observatory to select a location for the new GS. These investigations were necessary due to the significant anthropogenic seismic noise generated by the operational 32-metr radio telescope (RT-32). Recently, the intensity of radio interferometric observations has increased significantly, making it difficult to find a suitable time window for conducting precise absolute gravity measurements. Furthermore, a second radio telescope (RT-13) was commissioned at the observatory in 2019. Based on the results of the seismic investigations, an optimal location for the GS was selected. A special pavilion with an isolated foundation was constructed, allowing for the simultaneous installation and operation of multiple gravimeters. A Russian-made laser-interferometric absolute gravimeter, featuring an active vibration isolation system for the reference reflector of the laser displacement interferometer, has been installed at the new GS. Analysis of a measurement series demonstrated the capability to determine the free fall acceleration with a standard deviation of $4 \mu\text{Gal}$, even while the radio telescope antennas are operational.

Keywords: gravity measurements, free fall acceleration, absolute gravimeter, seismic noise, vibration isolation system.

Contacts: Iskandar S. Gayazov (gayazov@iaaras.ru).

For citation: Vitushkin L. F., Gayazov I. S., Ivanov D. V., Ipatov A. V., Krivtsov E. P., Krolitsky P. P., Naliavaev V. V., Orlov O. A., Rakhimov I. A., Smolentsev S. G. Gravimetric station at the Svetloe Observatory of the Quasar network // Transactions of IAA RAS. 2025. Vol. 74. P. 3–15.

<https://doi.org/10.32876/AppAstron.74.3-15>

Введение

Основными целями Международного проекта «Глобальная система геодезических наблюдений» (Global Geodetic Observing System, GGOS) являются высокоточное определение и исследование следующих взаимосвязанных характеристик Земли: геометрии и кинематики поверхности, неравномерности вращения, структуры гравитационного поля и его вариаций. Для достижения этих целей будут использоваться все преимущества метода колокации — совместного использования различных средств измерений, базирующихся как на специализированных спутниках, так и на поверхности Земли.

В рамках реализации проекта GGOS в 2015 г. Международная ассоциация геодезии (International Association of Geodesy, IAG) приняла резолюцию № 2 «Об организации глобальной гравиметрической опорной системы» (International gravity reference system, IGRS). В соответствии с этой резолюцией предполагается создать опорную гравиметрическую систему ([Витушкин и др., 2021](#); [Wziontek et al., 2021](#)) глобально распределенных пунктов, на которых доступ к опорным значениям УСП будет обеспечен в любое время в рамках программ международных сличений абсолютных гравиметров. Опорные пункты должны быть связаны с Международной земной системой отсчета (International Terrestrial Reference System, ITRS), реализуемой под эгидой Международной службы вращения Земли и систем отсчета ([IERS Conven-](#)

[tions, 2010](#)) на основе принципа колокации различных средств наблюдений методами космической геодезии (РСДБ, КОС, ГНСС и др.).

В Российской Федерации к таким пунктам в первую очередь относятся обсерватории РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» ([ИПА РАН](#)), являющиеся действующими опорными пунктами (Active Core Sites) сети GGOS ([GGOS Core Sites](#)). В соответствии с требованиями проекта GGOS на опорных пунктах должны проводиться абсолютные измерения УСП на регулярной основе, а также вестись непрерывный мониторинг вариаций УСП с помощью относительных (криогенных) гравиметров. Таким образом, оснащение обсерваторий комплекса «Квазар-КВО» высокоточными средствами для измерения абсолютного значения УСП и мониторинга вариаций УСП является естественным развитием комплекса.

Оснащение обсерваторий такими средствами измерений требует создания специальных гравиметрических пунктов (ГП), которые должны удовлетворять определенным требованиям. Такой пункт представляет собой специальный павильон, в котором должен быть устроен развязанный фундамент с несколькими станциями для обеспечения возможности измерения УСП несколькими гравиметрами одновременно. В дальнейшем должна быть предусмотрена возможность оснащения пункта относительным криогенным гравиметром (КГ). Таким образом, можно будет обеспечить постоянный мониторинг вариаций УСП во времени. Это позволит экономить ресурс абсолютного бал-

листического гравиметра (АБГ), который должен только периодически контролировать абсолютное значение УСП и незначительный дрейф КГ.

Был разработан следующий план работ по оснащению обсерватории «Светлое» комплекса «Квазар-КВО» средствами измерений гравитационного поля:

- изучение микросейсмической обстановки на территории обсерватории;
- выбор места для размещения гравиметрического пункта;
- демонстрация возможности измерения УСП на уровне единиц мкГал;
- сооружение ГП и оснащение его высокоточным АБГ.

Эти работы проводились в ИПА РАН совместно со специалистами ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», которые имеют опыт создания высокоточных абсолютных гравиметров.

Следует отметить, что в обсерватории «Светлое» уже был ГП на цокольном этаже лабораторного корпуса (рис. 1) в помещении эталонной. На этом ГП в 2007 и 2013 гг. проводились измерения абсолютного значения УСП различными гравиметрами. Во время измерений антенна радиотелескопа РТ-32 не работала. Измерения проводились гравиметрами FG5-110, принадлежавшим ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД» ЦНИИ-ГАиК (в настоящее время — Публичная правовая компания «Роскадастр») и FG5X-221 финского геодезического института (Finnish Geodetic Institute, FGI), который постоянно принимает участие в ключевых международных сличениях. Измерения УСП, выполненные в 2013 г. с использованием гравиметра из финского геодезического института, подробно описаны в публикации ([Mäkinen et al., 2016](#)).

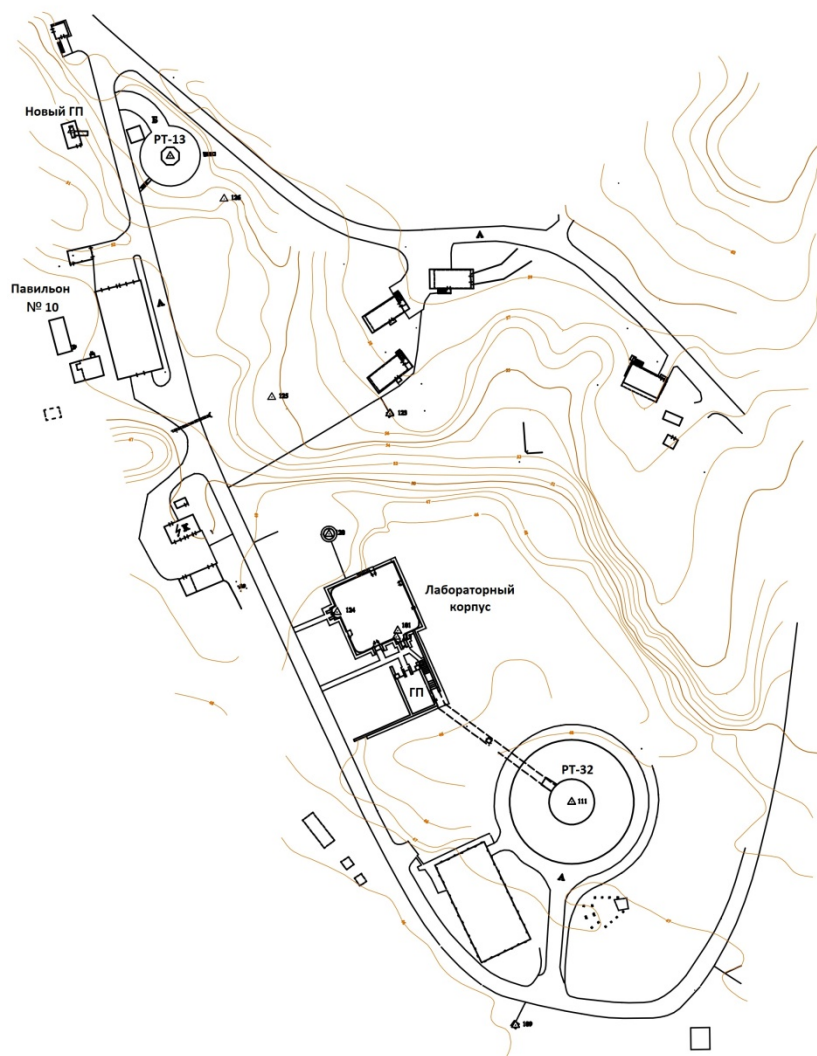


Рис. 1. План обсерватории «Светлое»

Главный недостаток существующего пункта заключается в том, что на нем имеется высокий уровень техногенного сейсмического шума, связанного с работой антенны радиотелескопа РТ-32. Расстояние от ГП до рельсовых путей РТ-32 составляет чуть более 40 м. Кроме того, в силу конструктивных особенностей лабораторный корпус имеет общий фундамент с самой антенной и на этом же фундаменте установлено несколько компрессоров, постоянно обеспечивающих криогенные температуры для приёмников РТ-32. В настоящее время уже сложно найти временное окно до 10–12 час, когда РТ-32 не задействован в проведении РСДБ-наблюдений. Помимо этого, в 2020 г. были начаты регулярные наблюдения с использованием второго радиотелескопа с 13-метровой антенной (РТ-13), введенного в строй на территории обсерватории в 2019 г. Поэтому была поставлена задача изучить возможность создания нового ГП, который бы позволял проводить постоянные гравиметрические измерения независимо от работы радиотелескопов РТ-32 и РТ-13.

Выбор места для павильона нового гравиметрического пункта

Одно из основных требований к ГП для высокоточных измерений УСП — это минимальный уровень естественных и техногенных микросейсмических колебаний, которые существенно влияют на точность измерений. Поэтому начальный этап оснащения обсерватории «Светлое» средствами гравиметрических измерений был связан с изучением микросейсмической обстановки на территории обсерватории и выбором места для размещения ГП. С целью разработки рекомендаций по выбору места для создания ГП на территории обсерватории были проведены исследования сейсмического фона и выполнены контрольные измерения УСП с помощью АБГ.

Измерения сейсмического фона

Для проведения измерений сейсмического фона использовался широкополосный высокочувствительный трехкомпонентный сейсмометр SMG-3T, который имеет следующие основные характеристики:

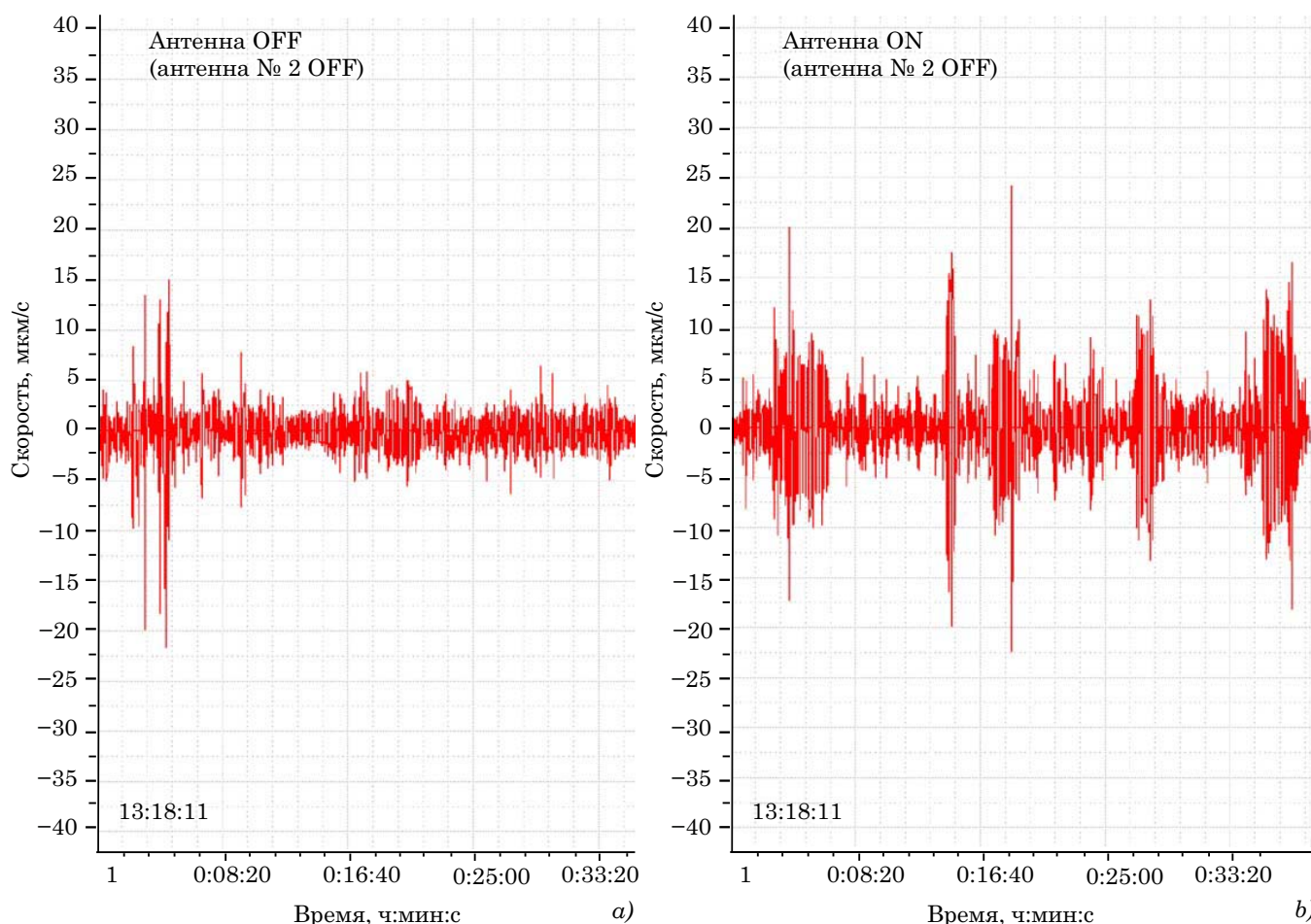


Рис. 2. Временные записи сейсмического сигнала на ГП в помещении эталонной в двух состояниях антенны РТ-32: а) в состоянии покоя и б) при вращении

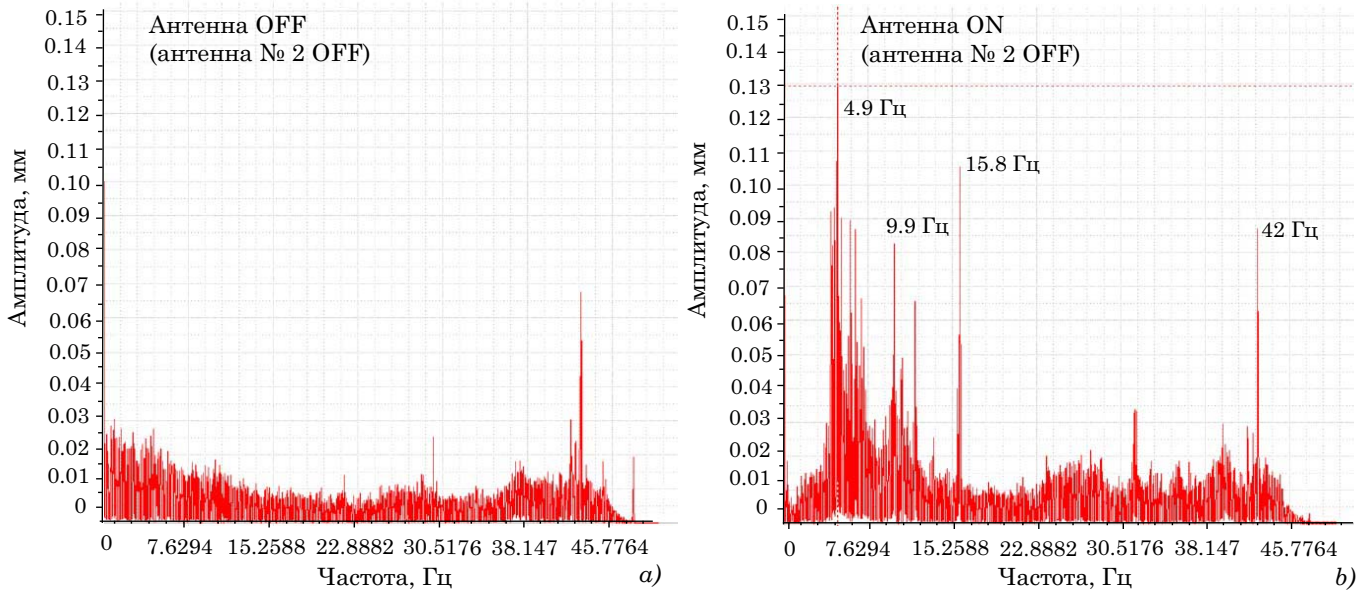


Рис. 3. Спектр сейсмического сигнала на ГП в помещении эталонной в двух состояниях антенны РТ-32: а) в состоянии покоя и б) при вращении

- частотный диапазон от 0.017 до 100 Гц;
- собственный шум ниже минимального уровня сейсмического шума по модели Питерсона (United States Geological Survey, USGS; New Low Noise Model, NLNM) в диапазоне частот от 0.017 до 20 Гц (для вертикальной компоненты);
- динамический диапазон более чем 140 дБ во всей полосе пропускания (по данным USGS);
- высокая линейность: горизонтальные компоненты >107 дБ, вертикальная компонента — 111 дБ (по данным USGS);

С учетом выполнения задачи высокоточных измерений УСП на ГП, измерения сейсмического фона записывались в память велосиметра CMG-3T только по вертикальной компоненте.

Согласно разработанному плану, сначала измерения проводились в цокольном помещении лабораторного корпуса (ГП на рис. 1) на специальной площадке, где ранее проводились измерения УСП.

Измерения проводились в двух режимах:

— «режим покоя» — радиотелескоп РТ-32 не движется, но работает всё установленное оборудование;

— «режим работы» — характерный режим работы РТ-32 — многократные трогания и торможения антенной системы РТ-32, настройка по горизонтали и вертикали при перебросах от одного радиоисточника к другому.

На рис. 2 и 3 представлены временные записи и спектры сейсмического сигнала, полученные с помощью велосиметра CMG-3T на ГП в помещении эталонной при вращающейся антенне РТ-32 и РТ-32 в состоянии покоя.

В режиме покоя РТ-32 сейсмический фон в основном лежит в диапазоне ± 2 мкм/с. В режиме

работы возникают нежелательные для АБГ сейсмические волны с частотами 5, 10 и 15 Гц и амплитудами до 15–20 мкм/с. Таким образом, работа радиотелескопа РТ-32 значительно увеличивает техногенный сейсмический фон на ГП в лабораторном корпусе, и полноценные гравиметрические измерения на этом пункте возможны только в режиме покоя РТ-32.

На следующем этапе измерительная аппаратура была перенесена в павильон № 10, находящийся на значительном удалении от антенны РТ-32 (рис. 1). Как показывают результаты проведенных измерений в павильоне № 10 (рис. 4, 5), в режиме покоя РТ-32 сейсмический фон в основном лежит в диапазоне ± 1 мкм/с. В режиме работы возникает дополнительный шум с амплитудами до 2 мкм/с. Видно, что техногенное воздействие работающего РТ-32 значительно ниже в павильоне № 10 по сравнению с ГП в помещении эталонной. Таким образом, гравиметрические измерения в окрестности павильона № 10 могут быть проведены при любом режиме работы антенны. Всплески сигнала связаны с движением автомобилей по центральной дороге. В павильоне № 10 было также исследовано влияние движения антенны радиотелескопа РТ-13 на сейсмический шум. Оказалось, что техногенный фон этой антенны значительно меньше фона от антенны РТ-32, несмотря на то что РТ-13 находится на расстоянии в несколько раз ближе РТ-32. Кроме того, спектр частотного шума от антенны РТ-13 лежит в высокочастотной области (выше 50 Гц), и, как показали результаты измерений, при использовании гравиметра со встроенной активной системой виброизоляции шумы с такими частотами хорошо фильтруются.

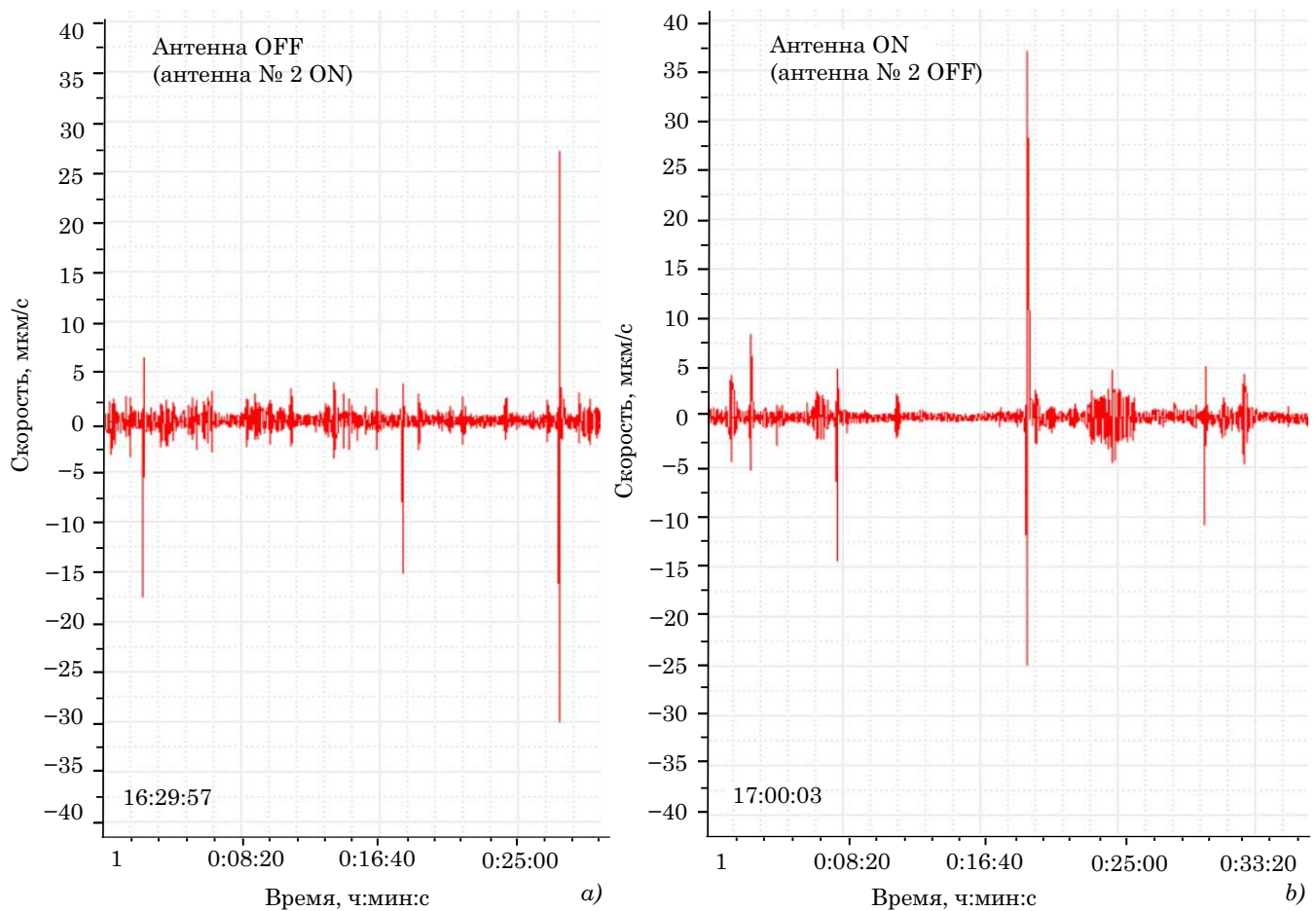


Рис. 4. Запись сейсмических шумов в павильоне № 10 в различных режимах работы двух антенн: а) РТ-32 в состоянии покоя, РТ-13 работает; б) РТ-32 работает, РТ-13 в состоянии покоя

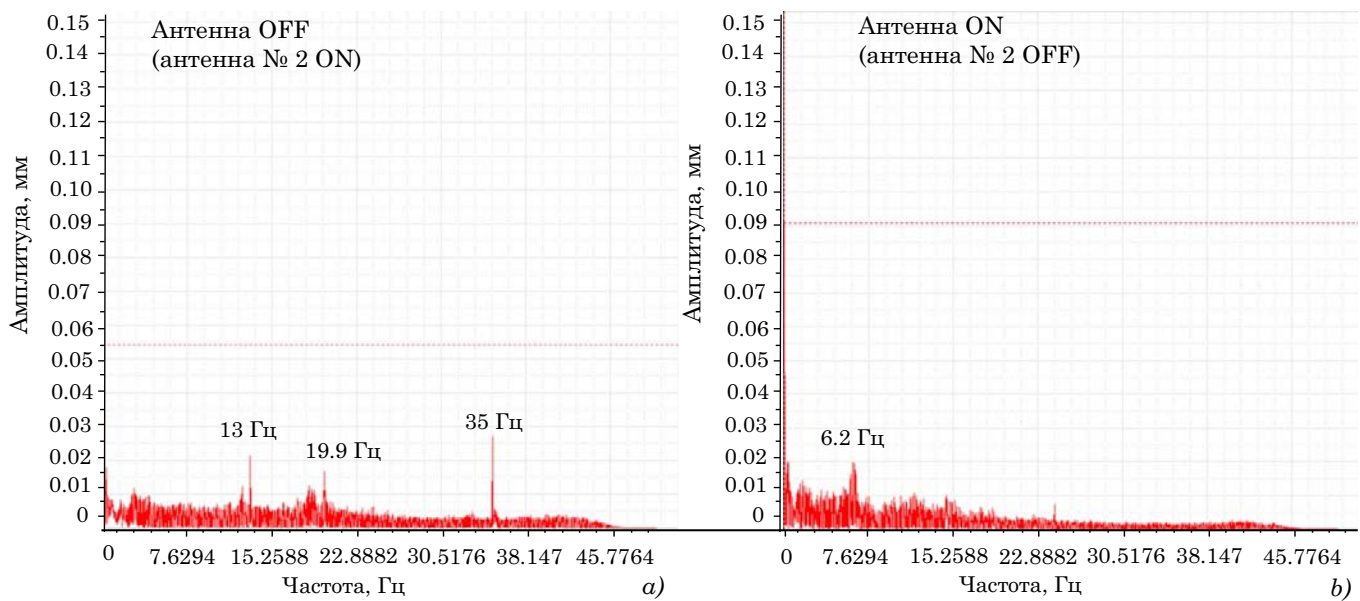


Рис. 5. Спектр сейсмического сигнала в павильоне № 10 в различных режимах работы двух антенн: а) РТ-32 в состоянии покоя, РТ-13 работает; б) РТ-32 работает, РТ-13 в состоянии покоя

Измерения УСП с помощью АБГ

На основании проведённых сейсмических исследований был сделан вывод, что вследствие высокой техногенной сейсмики на территории обсерватории для проведения высокоточных измерений абсолютных значений УСП АБГ должен быть оснащён специальной системой виброизоляции. Поэтому для проведения тестовых измерений на территории обсерватории «Светлое» во ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» был разработан макет транспортируемого АБГ (рис. 6) с двухступенчатой активной системой виброизоляции опорного отражателя лазерного интерферометра. С помощью этого АБГ были выполнены пробные короткие (по 200 бросков) серии измерений УСП на ГП в лабораторном корпусе, а также в павильоне № 10. При этом также велась запись сейсмического сигнала с датчика ЕР-300, входящего в систему виброизоляции АБГ. Характеристики измерений, которые были проведены в режиме покоя антенны РТ-32 и при ее вращении, представлены на рис. 7 и 8.

Анализ данных измерений с датчика ЕЗ-300, установленного в АБГ, показал, что использованная в гравиметре комбинированная система виброизоляции позволяет значительно уменьшить влияние исходных сейсмических флуктуаций на пункте на всех частотах выше 1.5 Гц. Влияние движения антенны РТ-32 проявляется главным образом на частотах ниже 1.5 Гц. Измерения показали, что движение антенны РТ-32 не только вызывает увеличение СКО примерно на 30 %, но и приводит к смещению среднего значения УСП примерно на 20 мкГал.

Измерения УСП в двух состояниях антенны РТ-32 были проведены также в павильоне № 10. Результаты представлены на рис. 9 и 10.

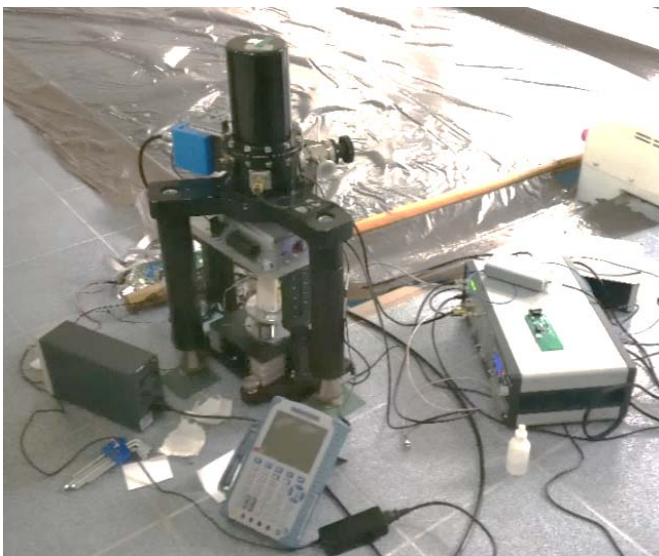


Рис. 6. Макет транспортируемого АБГ с активной системой виброизоляции опорного отражателя

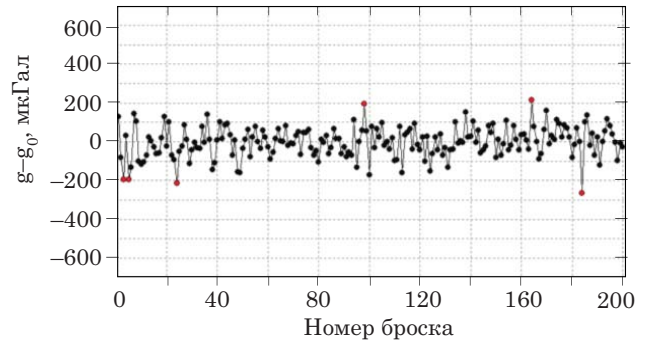


Рис. 7. Отклонения от среднего значения измерений УСП на ГП в лабораторном корпусе в «режиме покоя» РТ-32; СКО после исключения выбросов (отмечены красными точками) равно 5.1 мкГал.

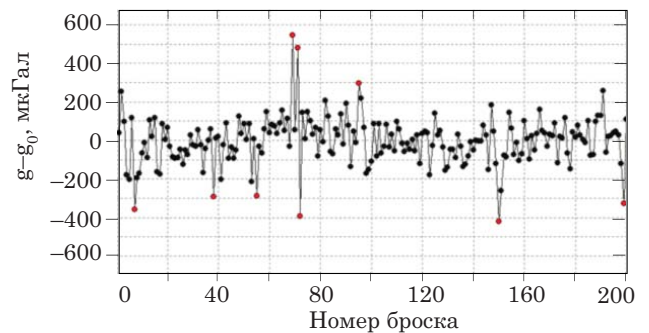


Рис. 8. Отклонения от среднего значения измерений УСП на ГП в лабораторном корпусе («рабочий режим» РТ-32); СКО после исключения выбросов равно 7.0 мкГал

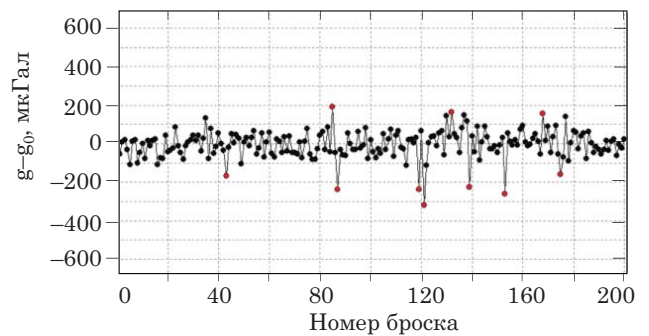


Рис. 9. Отклонения от среднего значения измерений УСП в павильоне № 10 в «режиме покоя» РТ-32; СКО равно 3.9 мкГал

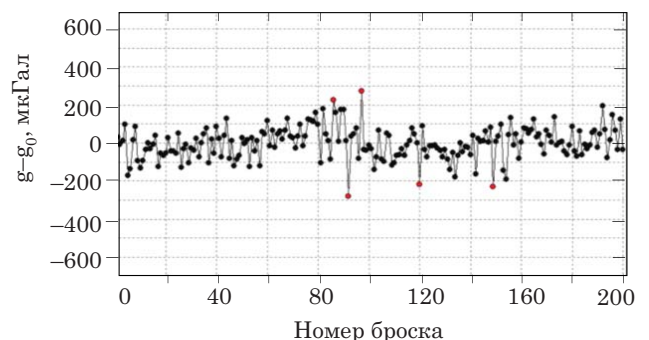


Рис. 10. Отклонения от среднего значения измерений УСП в павильоне № 10 («рабочий режим» РТ-32); СКО равно 5.5 мкГал

СКО измерений, выполненных в павильоне № 10, меньше примерно на 25 % в обоих режимах, связанных с состоянием РТ-32. Отдельные выбросы были вызваны движением автомобилей по дороге.

Выводы по результатам измерений

На основании результатов анализа проведённых сейсмических и гравиметрических измерений были выданы рекомендации по определению оптимального места для организации нового ГП.

На существующем ГП выполнять такие измерения нежелательно по причине близости антенны РТ-32 и связанного фундамента. На территории обсерватории «Светлое» можно проводить высокоточные гравиметрические измерения, если создать ГП на максимально возможном удалении от антенны РТ-32. В качестве места для установки специализированного стенда с целью выполнения высокоточных гравиметрических измерений предпочтительным является район расположения павильона № 10.

Антенна РТ-13 создает меньший уровень сейсмических шумов, и частотный спектр шума от нее лежит в высокочастотной области (выше 50 Гц). Такие шумы лучше фильтруются активной комбинированной системой виброизоляции опорного отражателя гравиметра и оказывают гораздо меньшее влияние на измерения УСП. Отсюда следует, что именно такой системой виброизоляции должен быть снабжен АБГ, разрабатываемый для установки на новом пункте.

Новый павильон гравиметрического пункта

С учетом результатов, полученных из анализа сейсмических и гравиметрических измерений, было определено место для строительства нового ГП на территории обсерватории на максимальном удалении от антенны РТ-32 (Новый ГП на рис. 1). Конструирование и сооружение специального павильона для нового ГП (рис. 11) выполнялись также с учетом необходимых требований, связанных с уменьшением влияния техногенных факторов.

Внутри павильона для проведения гравиметрических измерений создана специальная площадка на изолированном фундаменте размерами 1.5×4 м и глубиной 1.5 м. На площадке организованы 4 станции (рис. 12 и 13), на которых возможно проведение одновременных измерений с помощью различных гравиметров. Предполагается, что на одной из станций будет располагаться АБГ для периодического измерения абсолютного значения УСП, а на второй — криогенный гравиметр для непрерывного мониторинга вариаций УСП.



Рис.11. Павильон для нового ГП

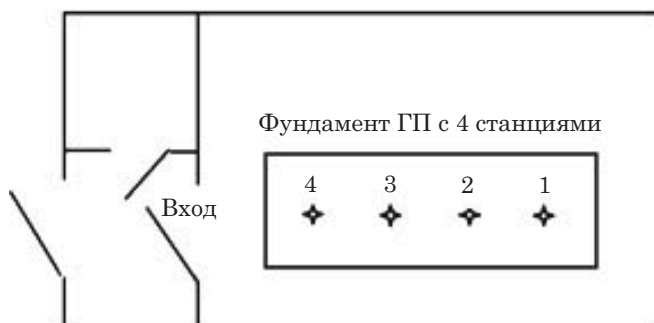


Рис.12. План расположения станций внутри павильона

В связи с тем, что новый пункт находится значительно ближе к антенне РТ-13 по сравнению с павильоном № 10, были выполнены дополнительные сейсмические исследования нового фундамента. Они показали, что на новом пункте имеются техногенные шумы, вызванные работой антенны РТ-13, однако спектр её шумов лежит в более высокочастотной области по сравнению с шумами от РТ 32, и с такими шумами хорошо справляется система активной виброизоляции опорного отражателя лазерного интерферометра.



Рис. 13. Стенд для проведения гравиметрических измерений с отмеченными маркерами станций

Гравиметр ЛИАГ-4

Для установки на новом ГП обсерватории «Светлое» ООО «Диал-Трейд СПб» был разработан и изготовлен новый абсолютный баллистический гравиметр ЛИАГ-4. В состав ЛИАГ-4 входят:

- 1) блок баллистический с вакуумной камерой;
- 2) интерферометр лазерный с опорным столом;
- 3) блок электронный;
- 4) лазер одночастотный стабилизированный с оптоволоконном;
- 5) система виброизоляции;
- 6) ноутбук с установленным системным и прикладным программным обеспечением;
- 7) источник бесперебойного питания «Бастиян»;
- 8) комплект кабелей;
- 9) комплект вспомогательного оборудования;
- 10) руководство по эксплуатации и паспорт.

В комплект вспомогательного оборудования входят:

- метеостанция;
- система предварительной откачки вакуумированной камеры, состоящая из вакуумного поста TPS-Mini, широкодиапазонного датчика, тройника и шланга для подключения к вакуумной камере баллистического блока АБГ.

Для уменьшения веса, габаритов и упрощения процедуры запуска в ЛИАГ-4 используется один опорный стол со встроенным интерферометром и системой виброизоляции. Вес всего оптико-механического блока составляет около 30 кг.

АБГ ЛИАГ-4 предназначен для проведения высокоточных измерений абсолютных значений УСП. В табл. 1 приведены метрологические характеристики АБГ ЛИАГ-4, которые были подтверждены в ходе проведения испытаний на эталонном гравиметрическом пункте «Ломоносов 1» ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» (Витушкин и др., 2020).

Прибор используется для проведения измерений УСП в нормальных лабораторных условиях:

- Температура $20 \pm 5^\circ\text{C}$
- Относительная влажность 30–80 %
- Атмосферное давление 700–800 мм.рт.ст.

На рис. 14 представлен АБГ ЛИАГ-4 на новом гравиметрическом пункте.

Таблица 1
Метрологические характеристики АБГ ЛИАГ-4

Характеристика	Значение
Диапазон измерения абсолютных значений УСП, м/с^2	9.77–9.85
Нестабильности частоты лазера на интервалах времени 1–1000 с	10^{-11}
Средняя квадратическая погрешность измерения значения УСП по результатам обработки рядов единичных измерений (12 серий по 100 бросков), м/с^2	$4 \cdot 10^{-8}$



Рис. 14. АБГ ЛИАГ 4

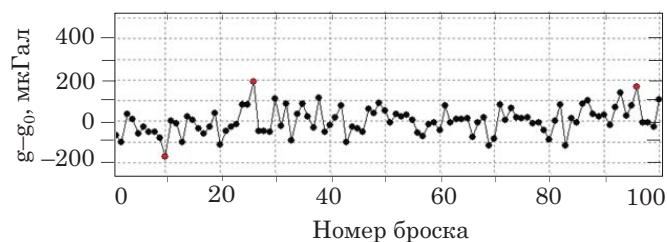


Рис. 15. Отклонения от среднего значения измерений УСП в одной серии из 100 бросков (СКО равно 60 мкГал)

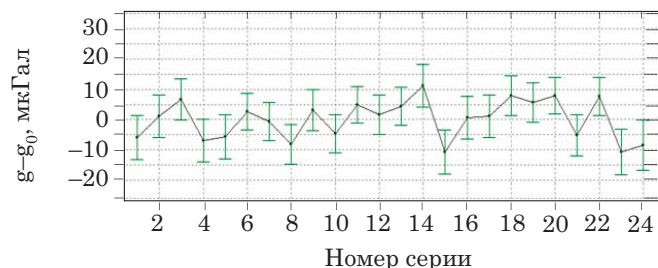


Рис. 16. Отклонения от среднего значения УСП в много-серийных измерениях (СКО по 24 сериям равно 1.3 мкГал)

Измерения УСП на новом гравиметрическом пункте

Характеристики измерений УСП, проведенных на новом ГП с помощью АБГ ЛИАГ 4, представлены на рис. 15 и 16.

Определение пространственного распределения УСП и вертикального градиента на новом ГП

На следующем этапе работ по созданию нового ГП в обсерватории «Светлое» были проведены работы по измерению пространственного распределения УСП на новом пункте с использованием методики относительных измерений.

Использованная аппаратура

Измерения для определения пространственного распределения УСП на станциях нового ГП обсерватории «Светлое» выполнялись с помощью транспортируемого относительного гравиметра Scintrex CG-6 Autograv утвержденного типа (пер. № 77100-19), основные технические и метрологические характеристики которого представлены в табл. 2.

В относительном гравиметре Scintrex CG-6 Autograv используется специальная программа, которая позволяет автоматически вводить в результаты измерений коррекцию собственного дрейфа, поправки за лунно-солнечные приливы, а также барометрическую и температурные поправки.

Измерения на пункте проводились при следующих условиях:

- температура воздуха находилась в пределах от 18°C до 25°C;
- относительная влажность воздуха находилась в пределах от 30 % до 60 %;
- атмосферное давление находилось в пределах от 84 до 106 кПа.

Для введения поправки за лунно-солнечные приливы были использованы географические координаты гравиметрического пункта и высота над уровнем моря.

Определение пространственного распределения УСП

Для определения пространственного распределения УСП на новом ГП использовались измерения, выполненные на 4 станциях пункта (план на рис. 12) с помощью относительного гравиметра Scintrex CG-6 Autograv (рис. 17). Измерения выполнялись относительно опорной станции «1», значение УСП на которой было принято за 0. На

Таблица 2

Характеристики гравиметра Scintrex CG-6 Autograv

Тип датчика	Датчик на основе плавленного кварца, с использованием электростатического обнуления
Разрешение	0.1 мкГал
СКО	< 5 мкГал
Рабочий диапазон	8 000 мГал без переустановки
Остаточный дрейф	< 20 мкГал/день
Некомпенсированный дрейф	< 200 мкГал/день
Диапазон автоматической компенсации наклона	±200 угл. град.
Резкое изменение показаний	Обычно < 5 мкГал для толчков до 20 g
Автоматически вводимые поправки	На земные приливы, на наклон прибора, на температуру, на дрейф
Скорость вывода данных	До 10 Гц

Таблица 3

Результаты относительных измерений УСП на станциях нового ГП

Номер станции	Количество измерений	Среднее значение, мкГал	СКО, мкГал	СКО среднего, мкГал	Приращение, мкГал
1	40	7347248.19	1.3	0.2	0
2	30	7347245.34	0.9	0.16	-2.9
3	30	7347240.57	1.1	0.2	-7.6
4	30	7347239.49	0.9	0.16	-8.7

каждой станции проводились серии из 40 или 30 измерений с минутным осреднением отсчета. По каждой серии измерений определялось среднее значение УСП, СКО в серии и СКО среднего значения по данной серии. Результаты измерений на четырёх гравиметрических станциях нового ГП «Светлое» представлены в табл. 3.

Как видно из результатов, представленных в табл. 3, на фундаменте нового ГП обсерватории «Светлое» имеется явно выраженный градиент вдоль длинной стороны фундамента. Его необходимо учитывать при проведении измерений на разных станциях.

Измерения вертикального градиента УСП на ГП

Измерения для определения вертикального градиента УСП на новом пункте проводились на станциях 2 и 3, расположенных в средней части фундамента. При этом использовались специальные металлические подставки (рис. 18), которые позволяли проводить последовательные серии измерений УСП на трёх уровнях: на фундаменте и на высотах 50 см и 100 см.

СКО относительных измерений УСП и СКО средних значений, полученных по сериям измерений на каждом уровне, и приращения УСП на соответствующей высоте приведены в табл. 4.



Рис. 17. Измерение УСП на станции 2 нового ГП с помощью относительного гравиметра Scintrex CG-6 Autograv

По сериям измерений, соответствующим максимальной разности высот (1 м), было определено среднее значение вертикального градиента на новом ГП, равное 312.7 мкГал/м.



Рис. 18. Измерение для определения вертикального градиента УСП на станции 3 нового ГП

Таблица 4

Результаты относительных измерений УСП для определения вертикального градиента на новом ГП

Пункт	Кол-во измерений в серии по 60 с	Среднее значение УСП, мкГал	СКО, мкГал	СКО среднего, мкГал	Приращение УСП, мкГал
S3-0	20	7347245.8	0.9	0.2	0
S3-05	30	7347087.9	3.4	0.6	157.9
S3-1	20	7346932.0	1.6	0.4	313.8
S2-1	10	7346941.4	0.9	0.3	311.6
S2-05	10	7347087.5	1.1	0.3	165.5
S2-0	9	7347253.0	1.3	0.4	0

Установление гравиметрической связи между старым и новым ГП

В рамках работ по созданию нового ГП в обсерватории «Светлое» также было выполнено установление гравиметрической связи между старым и новым ГП, расстояние между которыми в плане (рис. 1) составляет около 250 м.

Определение абсолютного значения УСП на новом ГП проводилось путем измерения приращений УСП относительно старого ГП, для которого абсолютное значение УСП считалось известным из ранее проведенных серий измерений, выполненных с помощью абсолютных гравиметров ЦНИИГАиК и финского геодезического института (Mäkinen et al., 2016).

Передача значения УСП на новый ГП осуществлялась по сериям последовательных измерений на обоих пунктах с помощью относительного гравиметра Scintrex CG-6 Autograv. Передвижение между старым и новым пунктами осуществлялось в режиме «пешком». Выполнялись 10 рейсов со длительностью каждого около 20 мин. Полученные по каждому рейсу разности относительных измерений УСП (Δg) усреднялись для определения среднего значения приращения $\Delta \bar{g}$, которое необходимо использовать при переходе от старого ГП к новому. Результаты измерений и вычислений представлены в табл. 5.

Таким образом, по результатам относительных гравиметрических измерений было получено, что абсолютное значение УСП на новом ГП обсерватории «Светлое» ИПА РАН на 956 мкГал меньше, чем на старом ГП.

Заключение

Создан новый гравиметрический пункт в обсерватории «Светлое», оснащенный абсолютным баллистическим гравиметром ЛИАГ-4, который позволяет проводить абсолютные измерения УСП с погрешностью в несколько микрогал. Место для нового гравиметрического пункта было выбрано на основе изучения микросейсмической обстановки на территории обсерватории при работающих

Таблица 5

Результаты определения приращения УСП для перехода к новому ГП от старого

Приращение УСП		
Δg , мкГал	$\Delta \bar{g}$, мкГал	СКО, мкГал
–953.8	–956	1
–955.5		
–956.2		
–956.1		
–954.9		
–955.8		
–954.9		
–955.0		
–957.0		
–956.2		

радиотелескопах РТ-32 и РТ-13. На гравиметрическом пункте организованы 4 гравиметрические станции, на которых могут проводиться одновременные измерения УСП в различных режимах: в рамках сличений различных гравиметров или в сочетании периодических измерений абсолютного значения УСП с помощью АБГ и постоянного мониторинга вариаций УСП с помощью криогенного гравиметра.

С помощью высокоточного относительного гравиметра выполнены измерения для вычисления вертикального градиента УСП на новом пункте, горизонтального градиента на линии расположения измерительных станций, а также для установления гравиметрической связи между старым и новым пунктами.

Новый гравиметрический пункт может служить основой для построения отечественной системы базовых гравиметрических пунктов колоцированной системы геометрических и гравиметрических наблюдений, которые могут войти как базовые (core stations) в выстраиваемую в настоящее время Международной Ассоциацией Геодезии международную систему абсолютных гравиметрических опорных пунктов.

Литература

Витушкин Л. Ф., Иванов Д. В., Кривцов Е. П., Непоклонов В. Б. Метрология в гравиметрии и международная гравиметрическая система // Законодательная и прикладная метрология. 2021, № 3. С. 8–13.

Витушкин Л. Ф., Карпешин Ф. Ф., Кривцов Е. П. и др. Государственный первичный специальный эталон ускорения для гравиметрии ГЭТ 190-2019 // Измерительная техника. 2020, № 7. С. 3–8.

Институт прикладной астрономии РАН [Электронный ресурс]. URL: <http://iaaras.ru> (дата обращения: 19.05.2025).

GGOS Core Sites [Электронный ресурс]. URL: <https://ggos.org/item/ggos-core-sites/> (дата обращения: 19.05.2025).

IERS Conventions 2010 (IERS Technical Note 36) / ed. by G. Petit, B. Luzum. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 p.

Mäkinen J., Sermyagin R. A., Oshchepkov I. A., et al. RFCAG2013: Russian- Finnish comparison of absolute gravimeters in 2013 // Journal of Geodetic Science. 2016. Vol. 6. P. 103–110.

Wziontek H., Bonvalot S., Falk R., et al. Status of the International gravity reference system and frame // Journal of Geodesy. 2021. Vol. 95, no 1. 9 p.