УДК 531.383

ПРОЕКТ *HYPER* ЕВРОПЕЙСКОГО КОСМИЧЕСКОГО АГЕНТСТВА – АСИММЕТРИЧНЫЙ ОТВЕТ ПРОЕКТУ *GRAVITY PROBE B* СТЭНФОРДСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Кробка Н.И.

Филиал Центра эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры НИИ прикладной механики имени академика В.И. Кузнецова, Москва, Российская Федерация

Проект *Gravity Probe B* (GP-B) [1, 2] Стэнфордского университета по проверке двух эффектов [3–5] общей теории относительности (ОТО), его история [6, 7] и результаты [8–11] широко известны [12, 13].

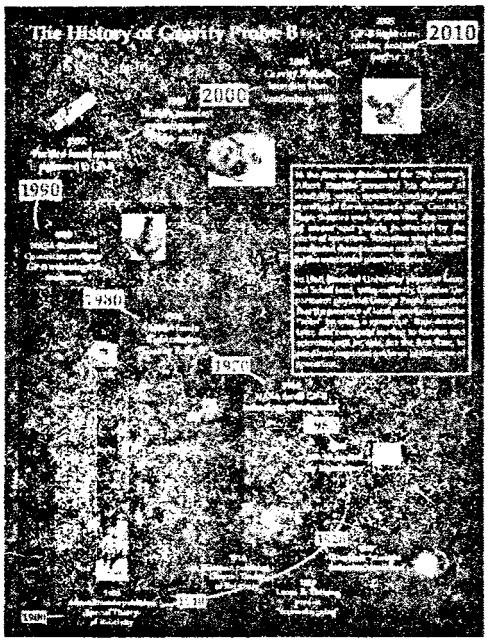

Рисунок 1 – Хронология проекта *Gravity Probe B* [9]

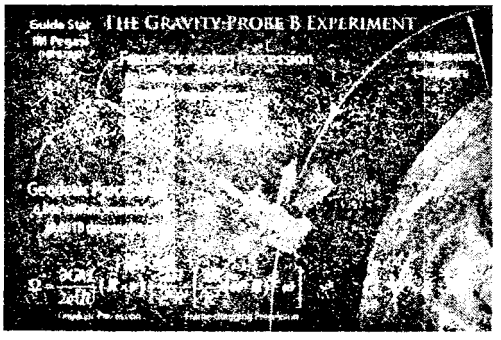

Рисунок 2 – Эффекты эйнштейновской ОТО, проверявшиеся в проекте *Gravity Probe B* [9]: эффект геодезической прецессии (ЭГП) [4] и эффект Лензе-Тирринга (ЭЛТ) [5]

ЭГП состоит в изменении направления оси вращения движущегося в искривлённом пространстве-времени вращающегося тела [4], а ЭЛТ – в увлечении системы отсчета массивным вращающимся телом [5]. В формуле (1) первое слагаемое соответствует ЭГП, второе – ЭЛТ (G – гравитационная постоянная, c – скорость света, M, I и $\vec{\omega}$ - масса, момент инерции и угловая скорость вращения Земли, $\vec{R}$ и $\vec{v}$ – радиус-вектор и скорость гироскопа) [7]:

$$\vec{\Omega}=\frac{3}{2}\frac{GM}{c^2R^3}(\vec{R}\times\vec{v})+\frac{GI}{c^2R^3}[3\frac{\vec{R}}{(\vec{R}\cdot\vec{R})}(\vec{R}\cdot\vec{\omega})-\vec{\omega}]. \qquad (1)$$

Для конкретной орбиты космического зонда НАСА GP-B с высотой 642 км ЭГП и ЭЛТ составляют соответственно $2\cdot10^{-7}$ град/час и $1{,}2\cdot10^{-9}$ град/час. В проекте GP-B планировалась разработка криогенных электростатических гироскопов (ЭСГ) с точностью 10^{-11} град/час для проверки и ЭГП, и ЭЛТ с погрешностью не более 1 % [10]. В результате многолетней постобработки данных измерений GP-B и моделирования источников дрейфов гироскопов ЭГП подтвержден с погрешностью менее 1 %, но ЭЛТ подтвердить не удалось – точность ЭСГ проекта GP-B (с учетом постобработки данных и осреднения) составила $2\cdot10^{-9}$ град/час.

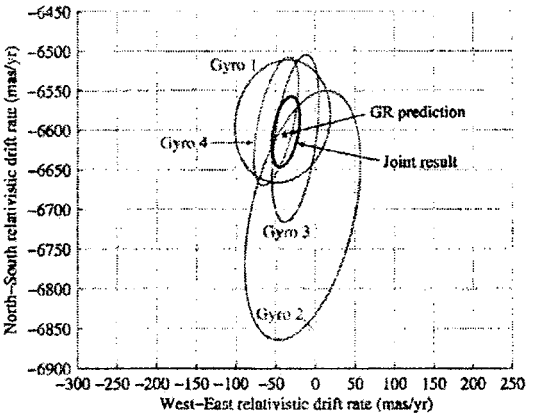

Рисунок 3 – Результат постобработки данныхпроекта *Gravity Probe B* [11]

ЭЛТ был подтвержден в 2004 г. с оценкой погрешности ± 10 % по результатам другого известного проекта – LAGEOS [14].

Менее известно, что с 1999 г. Европейское космическое агентство развивает проект HYPER (HYPER-PRECISION ATOM INTERFEROMETRY IN SPACE) [15, 16] для проверки ЭЛТ.

В гироскопической технике готовится прорыв – третье поколение гироскопов на эффекте Саньяка (ГЭС-III) [17–19] – на волнах де Бройля (ВБ), Бозе-

Эйнштейна конденсатах (БЭК) и сверхтекучести гелия (СГ).

Прогнозируемая точность ГЭС-III на ВБ может превысить точность лазерных гироскопов (ЛГ) и волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) (современная точность ЛГ и ВОГ 10^{-4} град/час) в 10^4 раз [20] и составить 10^{-8} град/час [21]. При использовании атомных интерферометров с двумя входами в запутанных состояниях [22] возможно дополнительное повышение точности ГЭС-III по сравнению с традиционной схемой в 10^6 раз [22], что соответствует беспрецедентной точности гироскопа ~ 10^{-14} град/час [21].

Технология атомной оптики в интересах разработок ГЭС-III интенсивно развивается.

Путь к созданию ГЭС-III с точностями (10^{-8}...10^{-14}) град/час не простой и не близкий, но именно такого уровня точности ГЭС-III создаются для проекта HYPER (запуск спутника перенесен с 2010 г. на 2015 г.).



Рисунок 4 – Миссия HYPER по проверке ЭЛТ [16]

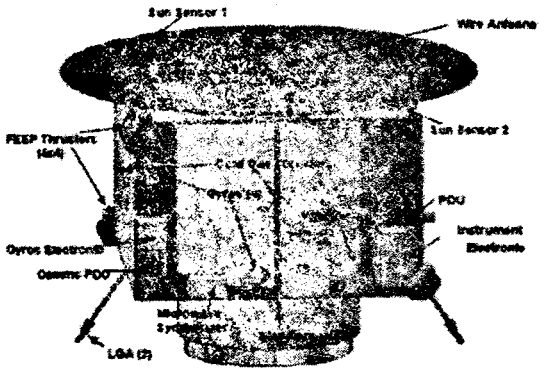

Рисунок 5 – Эскиз спутника миссии HYPER [15]

1. http://www.gravityprobeb.com.
2. http://einstein.stanford.edu.
3. Lense, J. Über den Einfluss der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Gravitationstheorie J. Lense, H. Thirring // Phys. Z. – 1918. – V. 19. – P. 156–163.
4. http://en.wikipedia.org/wiki/Geodetic_effect.
5. http://en.wikipedia.org/wiki/Frame-dragging.
6. Schiff, L.I. Possible New Experimental Test of General Relativity Theory /L.I. Schiff // Phys. Rev. Lett. – 1960. – Vol. 4. – Iss. 5. – Pp. 215–217.
7. Schiff, L.I. Motion of a Gyroscope According to Einstein's Theory of Gravitation / L.I. Schiff // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 1960. – Vol. 46. – P. 871–882.
8. http://einstein.stanford.edu/content/press_releases/SU/pr-aps-041807.pdf.
9. Gravity Probe B – Post Flight Analysis / Final Report, 2007. – 616 p.
10. The Gravity Probe B experiment "Testing Einstein's Universe" / Science Results – NASA Final Report, 2008. – 80 p.
11. Everitt, C.W.F. *et al.* Gravity Probe B: Final Results of a Space Experiment to Test General Relativity / C.W.F. Everitt *[et al.]* // Phys. Rev. Lett. – 2011. – Vol. 106. – Iss. 22. – Pp. 221101 [5 pages].
12. Журавлев, В.Ф. О некоторых деталях уникального эксперимента «GRAVITY PROBE-B» / В.Ф. Журавлев // Гироскопия и навигация. – 2009. – № 1 (64). – С. 3–9.
13. Пешехонов В.Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем / В.Г. Пешехонов // Гироскопия и навигация. – 2011. – № 1 (72). – С. 3–16.
14. Ciufolini, I. A confirmation of the general relativistic prediction of the Lense–Thirring effect / I. Ciufolini, E.C. Pavlis // Nature. – 2004. – Vol. 431. – No. 7011. – P. 958–960.
15. CDF STUDY REPORT "HYPER: HYPER-PRECISION ATOM INTERFEROMETRY IN SPACE" HYPER. Assessment Study. Report: CDF-09, September 2000. – 96 p.
16. Jentsch, C. HYPER: A Satellite Mission in Fundamental Physics Based on High Precision Atom Interferometry / C. Jentsch *[et al.]*// General Relativity and Gravitation. – 2004. – Vol. 36. – No. 10. – Pp. 2197–2221.
17. Кробка, Н.И. Генезис гироскопии на эффекте Саньяка / Н.И. Кробка // VII МНТК «Гиротехнологии, навигация, управление движением и конструирование авиационно-космической техники» (23–24 апреля 2009, КПИ, Киев). Сборник докладов. Ч. I. – Киев : НТУУ КПИ, 2009. – С. 26–35.
18. Кробка, Н.И. Квантовая микромеханика: гироскопы на волнах де Бройля и квантовых свойствах сверхтекучих жидкостей. Тенденции развития и состояние разработок / Н.И. Кробка // Гироскопия и навигация. – 2009. – № 3. – С. 36–55.
19. Кробка, Н.И. Гироскопия на эффекте Саньяка: Вчера, сегодня и завтра. Обзор состояния и тенденций развития / Н.И. Кробка // Материалы 2-й МНТК «Приборостроение–2009» (11–13 ноября 2009 г., БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь). – Минск : БНТУ, 2009. – С. 129–130.
20. Scully, M.O. Quantum-noise limits to matter-wave interferometry / M.O. Scully, J.P. Dowling // Phys. Rev. A. – 1993. – Vol. 48. – Iss. 4. – Pp. 3186–3190.
21. Кробка, Н.И. Новый этап гироскопии на эффекте Саньяка: Состояние работ и тенденции развития / Н.И. Кробка // VIII МНТК «Гиро-

технологии, навигация, управление движением и конструирование авиационно-космической техники» (21–22 апреля 2011г. НТУУ «КПИ», Киев, Украина). Сб. докл. Ч. 1. – Киев : НТУУ «КПИ», 2011. – С. 98–102.

22. Dowling, J.P. Correlated input-port, matter-wave interferometer: Quantum-noise limits to the atom-laser gyroscope / J.P. Dowling // Phys. Rev. A. – 1998. – Vol. 57. – Iss. 6. – Pp. 4736–4746.

УДК 681.7

СПЕКТРОРАДИОМЕТР МС-14 ДЛЯ БЛОКА ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «АВИС»

Крот Ю.А., Беляев Ю.В., Хомицевич А.Д., Домарацкий А.В.

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем им.А.Н.Севченко» БГУ, Минск, Республика Беларусь

В настоящее время Республике Беларусь создается единая система многоуровневого (космического и авиационного) мониторинга территорий РБ и развитие работы по сбору информации с авиационных аппаратно-программных средств регистрации монохромных, спектрозональных и тепловых изображений высокого пространственного разрешения, а также спектров отражения подстилающих поверхностей для решения задач в интересах различных ведомств Республики Беларусь. В связи с этим в рамках Государственной научно-технической программы «Космические системы и технологии» в НИИ прикладных физических проблем разработана авиационная спектрозональная система (АВИС), которая предназначена для регистрации спектрозональных и тепловых изображений земной поверхности при авиационном мониторинге, а так же, получения спектров подстилающих поверхностей высокого спектрального разрешения.

Блок оптических датчиков включает в свой состав следующие основные модули:

– модуль спектрозонального видеонаблюдения (МСВ), состоящий из трех камер высокого пространственного разрешения со сменными кассетами с интерференционными светофильтрами;

– инфракрасную камеру, предназначенную для регистрации теплового излучения подстилающих поверхностей и объектов в ИК области спектра 8÷13 мкм;

– лазерный высотомер для точного определения высоты носителя над поверхностью во время съемок и записи этих данных в блок служебной информации РС;

– камеру видеосопровождения;

– спектрорадиометр на область 400–1000 нм для управления МСВ и получения спектров высокого разрешения.

Система АВИС разработана с учетом эксплуатации на самолете-зондировщике Ан-2 Министерства по чрезвычайным ситуациям РБ. Для компенсации нестабильности полета носителя аппаратура устанавливается на гироплатформу.

Разработан ряд режимов работы блока оптических датчиков. Модуль спектрорадиометра, помимо выполнения основной функции – спектрометрирование подстилающих поверхностей, предназначен и для определения оптимальных времен экспозиции камер МСВ в зависимости от отражательных характеристик и условий освещения подстилающих поверхностей. Применение именно спектрорадиометра в качестве экспонометра позволяет одинаково эффективно подобрать времена экспозиций для каждой из камер МСВ с учетом коэффициентов спектрального пропускания используемых узкополосных интерференционных фильтров.

С учетом всех предъявляемых требований был разработан малогабаритный спектрорадиометр МС-14 (рисунок 1). Полихроматор спектрорадиометра построен на базе вогнутой голографической дифракционной решетки по равноплечной оптической схеме. В качестве приемника излучения применена спектрометрическая ПЗС-линейка Toshiba TCD1304DG. Управление и передача данных осуществляется по USB интерфейсу.

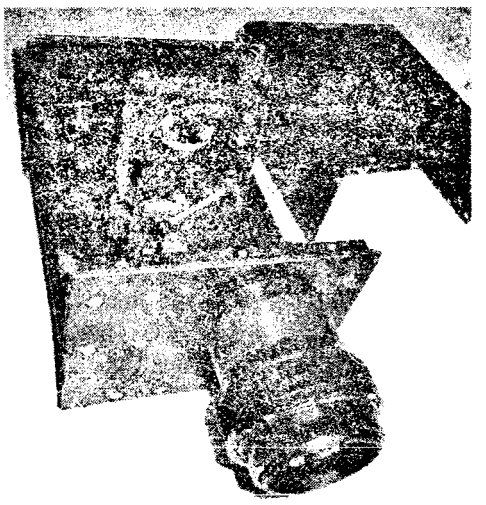

Рисунок 1 – Внешний вид спектрорадиометра МС-14

Спектрально-энергетические калибровки модуля спектрорадиометра проводились на метрологическом комплексе «Камелия-М».