

УДК 621.371

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ РАЗВИТИЯ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ГЕОДЕЗИИ

*Матвиенко С.А.*

*Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное», г. Днепропетровск  
E-mail: [matvienko\\_2005@ukr.net](mailto:matvienko_2005@ukr.net)*

В настоящее время широко применяются глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), в том числе и для решения задач геодезии. Однако проблема определения параметров гравитационного поля Земли (ГПЗ) в произвольной точке в реальном масштабе времени (РМВ) до сих пор не решена. В статье анализируется возможность решения этой задачи с помощью ГНСС с использованием релятивистского эффекта смещения частоты электромагнитного излучения под действием силы тяжести, что получило название радиофизического метода определения ГПЗ.

**Ключевые слова:** ГНСС, ГПЗ, релятивистский эффект, радиофизический метод.

### ВВЕДЕНИЕ

Релятивистские эффекты уже давно превратились из экзотики в повседневную реальность не только для фундаментальных научных исследований, но и для целого ряда широко распространенных технических приложений. К числу таких приложений относятся, в частности, созданные ГНСС GPS (США) и ГЛОНАСС (Россия), а также находящиеся в стадии разработки аналогичные системы Galileo (Европейский Союз), Compass (Китай), QZSS (Япония). Указанные системы могут функционировать лишь при условии введения так называемой релятивистской поправки к частотам эталонных генераторов из состава бортовой аппаратуры КА, входящих в ГНСС. Положительный опыт учета релятивистских поправок в ГНСС явился мощным стимулом для активизации как фундаментальных, так и прикладных исследований, связанных с применением принципов теории относительности в науке и технике. Большое число публикаций, посвященных данной тематике, делает актуальным анализ современного состояния и перспектив развития обсуждаемого научного направления. Попытка такого анализа, прежде всего в части основных работ, представляющих интерес для геодезии и навигации, предпринята в настоящей работе.

### 1. АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ СПУТНИКОВОЙ ГРАВИМЕТРИИ

В рамках проекта CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) в 2000 году запущен специальный КА, оснащенный акселерометрами и GPS приемниками. Накоплен огромный объем информации, которая использована для разработки моделей гравитационного потенциала, описанных в большом числе публикаций, в том числе - представленных на сайте Центра наук о Земле в Потсдаме (GeoForschungsZentrum Potsdam) [13]. По литературным данным разработанные

модели обеспечивают определение ускорения силы тяжести с погрешностью не хуже 5 mGal при пространственном разрешении 400 км. В рамках проекта GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) в 2002 году запущены 2 идентичных КА, разнесенные на расстояние 220 км. КА оснащены сходной аппаратурой, а также СВЧ дальномером (для высокоточного измерения расстояния между спутниками) и отражателями лазерного излучения для контроля положения ИСЗ с помощью дальномеров с Земли. По сравнению с CHAMP разрешающая способность аппаратуры повышена примерно в 2 раза [14]. Запуск в апреле 2009 г. КА в рамках проекта GOCE (Global Ocean Circulation Experiment) позволит обеспечить погрешность восстановления ускорения силы тяжести до 1 mGal при пространственном разрешении 100 км [15]. У всех вышеприведенных методов и устройств зарубежных авторов [1–9] есть один существенный недостаток: **они вычисляют параметры ГПЗ на основе механических линейных измерений траекторий движения КА или пробных тел.** Такая технология лежит в основе космической геодезии [21].

Необходимо отметить, что Украина в лице ГП “КБ “Южное” обладает мировым приоритетом в использовании эффекта гравитационного смещения частоты электромагнитного излучения с борта КА. Еще в 1965 г. был запущен КА ДС-У2-М с водородным мазером на борту, предназначенным для исследования этого релятивистского эффекта [9]. Также на ГП “КБ “Южное” был предложен радиофизический метод восстановления параметров ГПЗ на основе эффекта гравитационного смещения частоты, что нашло отражение в статьях, докладах, отчетах и патентах [11–20] и который был практически реализован в рамках профинансированного ЕС проекта УНТЦ № 3856 “Измерение ГПЗ с использованием ГНСС” (рук. Матвиенко С.А.). Отметим еще, что европейский эксперимент ACES на борту МКС полностью повторяет патент [16]. Таким образом, на Украине впервые разработан и технически реализован радиофизический метод измерения параметров ГПЗ.

Дифференциальный способ радиотехнического метода измерения релятивистского сдвига частоты в беззапросных доплеровских космических системах получил название глобального радиофизического метода измерения параметров ГПЗ.

## 2. РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ.

Необходимо отметить, что определения значения силы тяжести в некоторой точке по гравитационному сдвигу частоты сигнала ГНСС, позволит решить, с помощью ГНСС, две основные задачи геодезии:

- определение размера и формы Земли;
  - определение значения силы тяжести на геоиде.
- Очевидно, что задача определения силы тяжести в любой точке пространства решается поэтапно:
- координатно-временная идентификация точки пространства;

- определение значений всех побочных возмущающих факторов, вызывающих изменение частоты радиосигнала ГНСС;

- определение значения гравитационного сдвига частоты радиосигнала ГНСС;

- определение значения силы тяжести в контролируемой точке пространства.

Координатно-временная задача полностью решается средствами ГНСС.

Перечисленные радиофизические эффекты, вызывающие изменения амплитуды, фазы, частоты, поляризации, времени распространения радиосигналов ГНСС, являются наиболее существенными и активно обсуждаются в литературе. Если ионосферные, тропосферные влияния, а также доплеровский сдвиг частоты достаточно хорошо изучены и учитываются в настоящее время при эксплуатации ГНСС, то гравитационное смещение частоты сигнала усреднённо компенсируется путём ввода систематического сдвига в фундаментальную частоту спутниковых часов, а именно, вместо частоты 10,23 МГц используется частота 10,22999999545 МГц, что позволяет принимать на Земле номинальную частоту.

В качестве характеристик точности методов, используемых в рамках вышеуказанных проектов, в литературе приводятся, прежде всего, погрешность определения ускорения силы тяжести  $g$  в заданной точке и пространственное разрешение метода. Чтобы перейти к данным характеристикам в наших оценках,

$$g = \frac{du}{dx}$$

воспользуемся известной связью  $g = \frac{du}{dx}$ , отражающей тот физический факт, что ускорение силы тяжести определяется как производная гравитационного потенциала по координате.

При задании потенциала в дискретных точках (разнесенных в соответствии с пространственным разрешением метода), переходя от дифференциалов к конечным приращениям, имеем

$$g = \frac{u_a - u_b}{x_a - x_b} = \frac{u_a - u_b}{\Delta x}, \quad (3)$$

где  $\Delta x = x_a - x_b$  – пространственное разрешение.

Из (3) имеем уравнение, связывающее погрешности измеряемых и искомых величин

$$m_g^2 = \frac{m_{ua}^2}{\Delta x^2} + \frac{m_{ub}^2}{\Delta x^2} + \left( \frac{u_a - u_b}{\Delta x} \right)^2 \cdot \left( \frac{m_{\Delta x}}{\Delta x} \right)^2,$$

где  $m_{\Delta x}$  – погрешность определения расстояния между точками пространства, в которых определяется гравитационный потенциал.

Отсюда, полагая, что  $m_{ua}^2 \approx m_{ub}^2 \approx m_u^2$ , имеем

$$\frac{m_g^2}{g^2} = 2 \frac{m_u^2}{(g \cdot \Delta x)^2} + \frac{m_{\Delta x}^2}{(\Delta x)^2} \quad (4)$$

С помощью уравнений (2), (4) можно найти требования к точности измерений частоты сигнала в рамках предлагаемого метода в условиях, характерных для

известных методов CHAMP, GRACE, GOCE. Данные соответствующих расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1

$m_g$ , мГал	1		5		10		100		500	
$\Delta x$ , км	100	400	100	400	100	400	100	400	100	400
$m_u$	0,7	2,8	3,5	14,0	7,0	28,0	70,0	280,0	350,0	1400,0
$\frac{m_f}{f} \cdot 10^{16}$	0,056	0,22	0,28	1,1	0,56	2,2	5,6	22,0	28,0	110,0
$\frac{1}{f}$	1,41									

При анализе данных таблицы 1 необходимо принять во внимание следующее: во-первых, в настоящее время уже достигнута относительная погрешность воспроизведения частоты на уровне  $3 \cdot 10^{-16}$  (для Н-мазера на временном интервале 1 час); во-вторых, согласно достижению погрешности  $1 \cdot 10^{-16}$  возможно в ближайшие год-два в рамках существующих подходов (для перехода к погрешности  $1 \cdot 10^{-17}$  необходимо предпринять определенные усилия по совершенствованию оптических эталонов].

В рамках проекта УНТЦ№3856 было измерено с точностью 0,1% гравитационное смещение частоты с КА системы GPS, которое составляет  $6,970E-10$ [18]. Тем самым, впервые продемонстрирована техническая возможность реализации релятивистского радиофизического метода и, как следствие, решение обоих основных задач геодезии с помощью ГНСС.

### 3. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОФИЗИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ГОРНОГО МАССИВА.

Рассмотрена модель упругих деформаций земной коры при условии постоянства объема в нутационной системе координат (нутационная система координат – система отчёта, определенным образом связанная с инерциальной системой отчёта). При построении математической модели горного массива получен степенной коэффициент, который определяет энергетическое состояние открытой системы включающей в себя горный массив, внешний и внутренний потенциалы.

Исследование математической модели показало, что полная энергия системы сохраняется при любых условиях. Если начальная энергия внутренней подсистемы  $E(h(0)) \leq 0$ , то в подсистеме возможен быстрый рост градиента смещения, который может приводить к взрыву. Если  $E(h(0)) > 0$ , то быстрый рост градиента смещения может приводить к структурному разлому.

Анализ и прогнозирование динамики градиента смещения будет проводиться на базе данных ГНСС. Новая система измерения координат реперной точки на

поверхности горного массива позволяет измерять смещения координаты точки в 1-2 мм. Радиофизический метод также позволяет определять гравитационный потенциал и абсолютное значение приращения силы тяжести.

В любой из геотектонических гипотез должны быть четко определены силы, участвующие в перемещениях или преобразованиях масс в земной коре, и источник энергии, поддерживающий эти силы в течении определенного периода времени. Модели горного массива, рассматриваемые при прогнозировании газодинамических явлений, основаны на детерминистическом причинном описании. Однако такое описание не всегда является адекватным. Главная причина этого состоит в том, что в макроскопических системах существование многих степеней свободы часто приводит к возникновению флуктуаций. После возникновения макроскопической флуктуации система ведет себя в соответствии с определенными феноменологическими законами. Флуктуации, хотя и являются измеримыми величинами, должны оставаться малыми по сравнению с макроскопическими величинами. Малые флуктуации при наличии критической точки усиливаются, достигают макроскопического уровня и переводят систему в новое состояние, т.е. приводят к возникновению новой фазы в системе].

В работах [1-3] для описания качественного поведения амплитуды вертикального смещения локальной области земной поверхности использовалась модель колебания упругой тонкой пластины под действием внешних массовых сил. Учитывая относительную локальность области, в которой рассматривается модель, можно пренебречь вращением Земли. В качестве внешних сил  $V_e$  рассматривается воздействие на земную поверхность комплекса экзогенных процессов и эрозионных волн, влияние долговременных тенденций изменения атмосферного давления, результаты гравитационного взаимодействия Земли с другими космическими телами (например, Солнцем, Луной) и т.п. В качестве внутренних сил  $V_i$  учитывается влияние вертикальных тектонических движений, возникающих как вследствие движения тектонических плит, так и в результате процессов физико-химической дифференциации вещества в недрах Земли. Получено модельное уравнение, которое учитывает зависимость амплитуды вертикального смещения, а, следовательно напряжений на земной поверхности, от взаимодействия внешнего и внутреннего суммарных потенциалов. В работе была рассмотрена модель упругих деформаций земной коры, которая при условии сохранения объема в нутационной системе координат (нутационная система координат – система отчёта, определенным образом связанная с инерциальной системой отчёта) для амплитуды вертикального смещения принимает следующий вид:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \Delta h + \frac{\partial f}{\partial h}, \quad (5)$$

где  $h=h(t,x,y)$  – вертикальное смещение, зависящее от времени  $t$  и декартовых координат  $x, y$ ;  $f=f(h)=V_e+V_i$  – сумма внешнего ( $V_e$ ) и внутреннего ( $V_i$ ) потенциалов, действующих на горный массив;  $\mu$  - параметр Ламе (Па);  $\rho$  - плотность (кг/м<sup>3</sup>);  $\Delta = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$  - оператор Лапласа.

Основной целью данной работы является определение значений некоторого положительного параметра  $\beta$ , который определяет динамику взаимодействия

внешних и внутренних сил в безразмерной математической модели (12), при которых в системе возможно нарушение энергетического баланса. Для этого необходимо выполнить:

1. переход к безразмерной форме в модели (5);
2. построение энергетической диаграммы для задачи;
3. анализ энергетической диаграммы.

Анализ фазового портрета математической модели показал возможность не только пространственного прогнозирования геодинамических катаклизмов, но и прогнозирование временных интервалов, в которых эти катаклизмы могут проявляться.

Применительно к Донецкому бассейну, этот подход позволит в дальнейшем рассчитать пространственно-временные вариации напряженного состояния горного массива в момент инверсии и на последующих этапах тектонической эволюции бассейна. Поскольку инверсионный режим вызывает подъем отложений, активизирует эрозионные процессы, нарушает системы первичного кливажа и приводит к перераспределению сформировавшихся на доинверсионной стадии углеводородных газов, полученные результаты могут быть использованы при реконструкциях процессов миграции и формирования скоплений метана в угленосной толще, а также для прогнозирования локализации газодинамических явлений в угольных шахтах.

Сопоставление полученных результатов с известными реконструкциями интенсивности денудации в Донбассе показывает, что соответствующий численный результат моделирования ( $h_{\text{мод}}$ ), удовлетворительно описывает плановое распределение асимметричного инверсионного подъема ( $h_{\text{факт}}$ ) в пределах тектонического блока между поперечными Донецко-Кадиевским и Еланчик-Ровенецким глубинными разломами, которое предшествовало складкообразованию в уральскую фазу складчатости герцинского орогенического цикла. Между фактическими и модельными данными уставлена значимая корреляционная зависимость  $h_{\text{факт}} = 0,933 \exp(0,195h_{\text{мод}})$ , коэффициент корреляции  $r = 0,76$ .

Рассмотренную математическую модель горного массива следует считать классической. При задании соответствующих геометрических параметров и краевых условий, эту математическую модель можно использовать для исследования динамики горных массивов в любой области земного шара.

### 3. ВЫВОДЫ

С учётом вышеизложенного можно сделать вывод о технической возможности реализации радиофизического метода измерения параметров ГПЗ в современных ГНСС, что было впервые продемонстрировано в рамках проекта УНТЦ№3856. Соответствие экспериментальных данных и теоретических исследований создаёт необходимую научную базу для развития релятивистской геодезии как науки, которая пришла на смену космической геодезии.

## Список литературы

1. The Future of Satellite Gravimetry// Report from the Workshop on The Future of Satellite Gravimetry 12 – 13 April 2007. – ESTEC, Noordwijk, The Netherlands. – P. 22.
2. Жернаков О.А. и др. Принципы создания спутникового гравитационного градиентометра // III Международ. конф. ЦНИИмаш, Королев Моск. обл., 27-31.05.02. – С. 326 – 331.
3. The Solid-State Mission ARISTOTILES // Proceedings of an International Workshop, Anacapri, Italy, 23-24, edited by C.Mattock, European Space Agency Spec. Publ. – ESA SP-329, 1991, P.13750.
4. Nerem R.S., Jekeli C., Kaula W.M. Gravity field determination and characteristics: Retrospective and prospective // J. Geophys. Res., vol.100, NO.B8, 1995. – P. 15053-15074.
5. R. Rummel Geodesy with STEP. Proceedings of an International Symposium // STEP – Testing the Equivalence Principle in Space, Pisa, Italy, 6-8 April 1993, edited by R. Reinhard, European Space Agency, ESA WPP-115, 1996. – P. 320-321.
6. Paik H.J. Superconducting gravity gradiometer on STEP. Proceedings of an International Symposium // STEP – Testing the Equivalence Principle in Space, Pisa, Italy, 6-8 April 1993, edited by R. Reinhard, European Space Agency, ESA WPP-115, 1996. – P. 321-334.
7. Жернаков О.А., Егоров Д.А. Современное состояние и перспективы развития зарубежной гравиметрической техники // Гироскопия и навигация. – №1(20). – С.-Петербург, 1998. – С.35-47.
8. Успенский Г.Р. Проект перспективного геофизического КА // III Междунар. конф. ЦНИИмаш Королев Моск. обл., 27-31.05.02. Книга 2, С. 123–128.
9. Ракеты и космические аппараты КБ “Южное” //– К. : Под общей ред. С.Н. Конюхова – Издательская компания КИТ, 2004. – С. 132-133.
10. Matvienko S.A., Global monitoring of Earth gravitational field utilizing space navigation systems. Proceedings of the 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. – 2005. – С. 39.
11. Matvienko S.A. Measurements of Earth Gravitational Field by Satellite Navigation Systems // Thematic International Conference on Bio-, Nano- and Space Technologies, EU & Science Centers Collaboration. – Ljubljana, Slovenia, March 10-12, 2008, [http://www.stcu.int/documents/reports/distribution/tpf/Slovenia/stcu-iste\\_space\\_11\\_March/analysis.pdf](http://www.stcu.int/documents/reports/distribution/tpf/Slovenia/stcu-iste_space_11_March/analysis.pdf). – P. 17.
12. Матвиенко С.А. Система измерения гравитационного поля Земли на базе навигационных спутниковых систем. // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч. – техн. ст. – 2008. – Вып.1. – Днепропетровск: ГП КБ “Южное”. – С. 65 – 80.
13. Коротич Е.В., Матвиенко С.А. Проектирование системы мониторинга гравитационного поля Земли с использованием EGNOS // Вестник ДНУ. – 2006, № 9/2. – С. 75.
14. Методы космических исследований ГПЗ: Науч. – техн. Отчет // ГП “КБ “Южное” ; Руководитель С.Н.Конюхов. – НТО Сич-1М 21.14599.156 ОТ, Инв.121/4-08. – Днепропетровск, 2003. – 38 С.
15. Матвиенко С.А. Анализ возможности использования эффекта гравитационного смещения частоты ЭМИ с целью мониторинга ГПЗ // Ученые записки ТНУ. Т.21(60). – 2008. – №1. – С. 81-87.
16. Prokopov A.V., Matvienko S.A. Meleshko A.V. and others. Relativistic effects in global satellite navigation systems // Acta Astronautica. – Volume 64, Number 1 January 2009.– P. 67-74.
17. Пат. 84704 Украины. Спутниковая радионавигационная система// Матвиенко С.А., 19.12.2005.
18. Пат. 83239 Украины. Способ измерения параметров гравитационного поля // Макаров А.Л., Матвиенко С.А., Мелешко А.В., Андросов М.А., 20.02.2006.

19. Заявка на пат. Украины а2008 14890. Спутниковая радионавигационная система // Матвиенко С.А., 24.12.2008.
20. Заявка на пат. Украины а2008 14892. Радиофизический гравиметр // Матвиенко С.А., Матвиенко А.П., Мелешко А.В., 24.12.2008.
21. Баранов В. Н., Бойко Е. Г., Краснорылов И. И. Космическая геодезия // М. : Недра, 1986. – С. 407

**Матвієнко С.А. Теоретичні й технічні передумови для розвитку релятивістської геодезії // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Географія. – 2009. – Т.22 (61). – №1 – С. 71-78.**

У цей час широко застосовуються глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС), у тому числі й для рішення завдань геодезії. Однак проблема визначення параметрів гравітаційного поля Землі (ГПЗ) у довільній крапці в реальному масштабі часу (РМВ) дотепер не вирішена. У статті аналізується можливість рішення цього завдання за допомогою ГНСС із використанням релятивістського ефекту зсуву частоти електромагнітного випромінювання під дією сили ваги, що одержало назву радіофізичного методу визначення ГПЗ.

**Ключові слова:** ГНСС, ГПЗ, релятивістський ефект, радіофізичний метод.

**Matvienko S.A. Theoretical and technical preconditions for development of the relativistic geodesy // Scientific Notes of Taurida V. Vernadsky National University. – Series: Geography. – 2009. – Vol. 22 (61). – №1 – P. 71-78.**

Now global navigating satellite systems (GNSS) are widely applied, including the decision of problems of a geodesy. However the problem of definition of parameters of a gravitational field of Earth (GFE) in an any point in real time (RT) till now is solved. In article is analyzed the opportunity of the decision of this problem with help GNSS with use of relativistic effect of displacement of electromagnetic radiation frequency by gravity, that has received the name of a radiophysical method of definition GFE.

**Key words:** GNSS, GFE, relativistic effect, radiophysical method.

*Поступила в редакцію 22.04.2009 з.*