

ИЗМЕРЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МИКРОСПУТНИКА

А.В. Агарков, И.В. Григораш, С.А. Матвиенко

Государственное конструкторское бюро «Южное»,
49008 Днепропетровск, Криворожская, 3
E-mail: info@yuzhnoye.com

Предложено создание геофизического микроспутника для изучения гравитационного поля Земли с применением лазерно-локационного метода. Приведена оценка точности определения ускорения свободного падения в зависимости от точности определения радиуса орбиты и скорости движения космического аппарата. Рассмотрена возможность применения лазерно-локационных станций и наземных средств измерения Украины для реализации данного метода исследований.

Космические исследования Земли по геофизическим параметрам являются одним из наиболее динамично развивающихся направлений дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Предметом исследований при этом является осадочный чехол, кристаллический фундамент, земная кора и верхняя мантия с общей глубиной до 100 км. Из всех геофизических полей наиболее перспективным при проведении космических исследований представляется изучение гравитационного и магнитного полей Земли, в частности исследование их аномалий. Наличие таких аномалий обусловлено тем, что распределение параметров геофизических полей на поверхности Земли, в воздушной оболочке или в околоземном пространстве зависит не только от общего строения Земли и околоземного пространства, т. е. от нормального поля, но также и от залегающих под поверхностью Земли плотных неоднородностей и тектонических процессов в глубинах планеты, создающих аномальные поля [1].

Детальное изучение геофизических полей способствует моделированию и исследованию сил, являющихся причинами смещения тектонических плит, возможных изменений структуры мантии, литосферных движений, расширяет возможности поиска месторождений полезных ископаемых и наши знания о причинах земных катаклизмов.

Решение задач глобального изучения геофизических полей только наземными средствами не представляется возможным как с экономической, так и с технической точки зрения (большая часть земной поверхности покрыта океаном или труднодоступна). Использование космических средств мониторинга совместно с наземными средствами измерения (там, где это возможно) позволит производить измерения на больших площадях, оперативно выявлять скоротечные изменения в структуре геофизических полей и изменения кривизны и высот геоида, происходящие в момент или накануне землетрясений, извержений вулканов и других природных изменений регионального масштаба.

ГКБ «Южное» совместно с Днепропетровским национальным университетом занимается разработкой геофизического микроспутника. Целью данного проекта является исследование гравитационного поля Земли с помощью лазерно-локационного метода с использованием лазерно-локационных станций (ЛЛС) и угольковых отражателей, устанавливаемых на борту космического аппарата (КА).

В основе метода лежит зависимость радиуса орбиты КА от значения ускорения свободного падения. Эта зависимость следует из равенства силы притяжения и центробежной силы при движении КА по круговой орбите:

$$F_{\pi} = F_{цб}, \quad (1)$$

где:

F_{π} - сила притяжения;

$F_{цб}$ - центробежная сила,
или

$$mg_0 = mR\omega^2 = \frac{mv^2}{R}, \quad (2)$$

где:

m – масса КА;

g_0 – ускорение свободного падения на орбите;

ω – угловая скорость движения КА по орбите;

v – линейная скорость движения КА по орбите;

R – радиус орбиты КА.

Откуда значение ускорения свободного падения в любой точке орбиты:

$$g_0 = \frac{v^2}{R}. \quad (3)$$

Значение ускорения свободного падения в подспутниковой точке на референц-эллипсоиде:

$$g = \frac{g_0 R^2}{r_e^2}, \quad (4)$$

где r_e – радиус референц-эллипсоида.

Погрешность определения ускорения свободного падения определяется точностью определения положения КА на орбите лазерно-локационным методом. Внешнетраекторные измерения с помощью ЛЛС позволяют определять скорость КА с точностью до 10 см/с, а радиус орбиты КА с точностью до 10 см. По этим данным рассчитываются значения ускорения свободного падения в подспутниковой точке.

Оценим абсолютную погрешность определения ускорения свободного падения в зависимости от точности определения радиуса орбиты КА:

$$\Delta g_R = \frac{\partial g}{\partial R} \Delta R = \frac{2\mu}{R^3} \Delta R = \frac{2 \cdot 398604 \cdot 10^9}{(7040 \cdot 10^3)^3} \cdot 10^{-1} = 2,29 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2 = 2,29 \cdot 10^{-2} \text{ мГал}, \quad (5)$$

где:

$\mu = 398604 \cdot 10^9 \text{ м}^3/\text{с}^2$ - гравитационная постоянная Земли;

$R = 7040 \cdot 10^3 \text{ м}$ - радиус орбиты КА;

$\Delta R = 0,1 \text{ м}$ - точность определения радиуса орбиты КА.

Оценим абсолютную погрешность определения ускорения свободного падения в зависимости от точности определения скорости КА:

$$\Delta g_v = \frac{\partial g}{\partial v} \Delta v = \frac{2v}{R} \Delta v = \frac{2 \cdot 8 \cdot 10^3}{7040 \cdot 10^3} \cdot 10^{-1} = 2,27 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2 = 22,7 \text{ мГал}, \quad (6)$$

где:

$v = 8 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ - скорость КА на орбите;

$\Delta v = 0,1 \text{ м/с}$ - точность определения скорости КА.

Для учета негравитационных возмущений в движении КА (влияние атмосферы, давление солнечного ветра и другие факторы) на борту КА должен быть установлен блок акселерометров. Полученные от акселерометров данные должны учитываться при обработке результатов измерений.

Для компенсации инструментальных погрешностей определения ускорения свободного падения необходимо использовать юстировочный полигон, значения ускорения свободного падения на котором определены с максимально возможной точностью. В качестве юстировочного полигона можно использовать Яворовский научный эталонный полигон. По результатам анализа отклонений измеренных значений от эталонных вводится необходимая поправка.

По данным измерений ЛЛС рассчитываются значения ускорения свободного падения в подспутниковых точках.

Использование данных наземных измерений совместно с данными космических измерений ускорения свободного падения, приведенными к референц-эллипсоиду, даст возможность выявить гравитационные аномалии, расположенные между поверхностью Земли и референц-эллипсоидом. В результате анализа этих аномалий могут быть выявлены признаки залегания полезных ископаемых, определены районы сейсмоактивности.

Для реализации радиолокационного метода исследования гравитационного поля Земли Украина располагает шестью ЛЛС, оснащенными лазерными дальномерами ТПЛ:

- Крымская астрономическая обсерватория, г. Симеиз;
- Крымская лазерная обсерватория НАНУ, г. Кацивели;
- Львовский национальный университет, г. Брюховичи;
- Государственная астрономическая обсерватория НАНУ, г. Киев;
- Государственный межвузовский центр «Орион», г. Исаково;
- Ужгородский национальный университет, г. Деренивка.

Точность измерения дальности с помощью ЛЛС в основном определяется длительностью импульса лазера и параметрами импульса фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), в первую очередь джиттером (нестабильность времени пролёта электронов в ФЭУ). На украинских станциях используются ФЭУ фирмы Hamamatsu и ФЭУ-79 (на станции Симеиз-1873), работающий с лазерными импульсами длительностью 0,3 - 0,4 нс.

Ниже в таблице приводятся данные по среднеквадратической погрешности (СКП) ЛЛС по результатам проведения измерений в нескольких сеансах:

Таблица 1. Результаты измерений на ЛЛС

Станция	Количество сеансов	СКП, мм
Симеиз	14	44,75
Кацивели	5	29,5
Рига	24	43,72

Из таблицы видно, что данные измерений ЛЛС в Симеизе и Кацивели вполне приемлемы. При этом, хотя в Риге работает лазер с современным ФЭУ с длительностью импульса около ста пикосекунд, результаты украинских станций одного с ним уровня [2].

В качестве наземных средств измерения возможно использование комплекса машин геофизического обеспечения 73П (комплекс МГО) разработки ГКБ «Южное», который оснащён аппаратурой спутниковой навигации на базе приемников GPS и комплектом гравиметрической аппаратуры.

На основании вышеизложенного можно сделать следующее заключение. Реализация лазерно-локационного метода исследования гравитационного поля Земли с помощью уголковых отражателей, установленных на борту геофизического микроспутника и шести существующих на Украине ЛЛС позволит:

- обеспечить определение ускорения свободного падения с точностью порядка 25 мГал;
- создать уточненную карту гравитационного поля Украины;
- реализовать комплексный метод ДЗЗ по геофизическим и геохимическим параметрам с целью определения месторождений полезных ископаемых и зон повышенной сейсмической активности.

Литература

1. Геофизические методы исследования: Учебное пособие для вузов. Под ред. В.К. Хмелевского. – М.: Недра, 1988. 396 с.
2. Минин О.А., Дмитроца А.И., Штирберг Л.С. О возможности получения сантиметровых точностей на ФЭУ-79. Международная научная конференция «Астрономическая школа молодых учёных». Белая Церковь, 2003. С. 29.