

А. В. Агарков¹, А. Л. Макаров¹, С. А. Матвиенко¹,
А. В. Мелешко¹, Ю. А. Селиванов²

¹Державне конструкторське бюро «Південне», Дніпропетровськ;

²Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, Київ

Комплексное исследование территории Украины по геофизическим параметрам с помощью космических систем «Січ-1М» и «Микроспутник»

Розглянуто можливість використання космічних систем «Січ-1М» і «Мікроспутник» для дистанційного зондування Землі за геофізичними параметрами.

На данный момент считаются доказанными аномальные изменения геофизических, геохимических и биохимических процессов в пределах нефтегазовых структур [4] и в зонах с повышенной сейсмоактивностью. Ландшафт над залежью углеводородов характеризуется локальным изменением физико-химических параметров его элементов [7].

В настоящее время дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) с помощью космических аппаратов оптико-электронного наблюдения производится только по геохимическим и биохимическим параметрам — по изменениям спектральных характеристик отраженного солнечного излучения верхним слоем оболочки Земли. В то же время одним из главных направлений эффективного изучения зон залегания полезных ископаемых считается изучение геофизических полей. Однако методики изучения аномалий по геофизическим параметрам нет [6]. Среди различных геофизических аномалий: магнитных, гравитационных, тепловых, радиационных, упруго-деформационных, сейсмоакустических и др. наиболее важными являются магнитные и гравитационные аномалии (рис. 1).

Кроме того, изучение тонкой структуры гравитационного и магнитного полей Земли (ГМПЗ) будет способствовать моделированию и исследованию сил, являющихся причинами смещения тектонических плит, возможных изменений структуры ман-

тии, литосферных движений, расширит возможности поиска месторождений полезных ископаемых и предсказания земных катаклизмов и позволит определить степень воздействия ГМПЗ на психофизическое состояние людей.

Решение задач глобального изучения ГМПЗ только наземными средствами не представляется возможным как с экономической, так и с технической точки зрения (70 % земной поверхности труднодоступны). Использование космических средств мониторинга совместно с наземными измерениями ГМПЗ (там, где это доступно) позволит оперативно выявлять скоротечные изменения в структуре ГМПЗ, изменения кривизны и высот геоида, которые происходят в момент или накануне землетрясений, извержений вулканов и других природных изменений регионального масштаба.

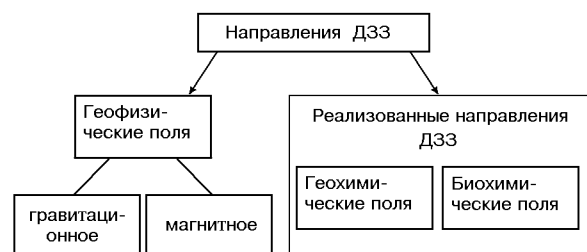


Рис. 1. Направления дистанционного зондирования Земли

Уточнение модели ГМПЗ автономными аэрокосмическими средствами может быть достигнуто путем разработки спутникового гравитационного градиентометра (СГГ) с погрешностями определения вторых производных гравитационного потенциала 10^{-2} — 10^{-3} Эгв. Исследования, проведенные в ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор» [3], показали принципиальную возможность создания СГГ на основе схем и технологий криогенных чувствительных элементов. Аналогичные исследования выполняются за рубежом в рамках программ «Aristoteles», «Step», «Geoid», которые приблизились к этапу проведения экспериментов на борту КА [1, 2, 9, 11—14].

В настоящее время при разработке перспективных градиентометров для научных исследований (в особенности космических), приборам традиционной конструкции на базе крутильных весов предпочитают конструкции, базирующиеся на парах акселерометров [2, 11, 14].

По предварительной оценке, масса СГГ разработки ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор» составит 80—90 кг, энергопотребление порядка 50 Вт. Следует отметить, что создание СГГ с пороговой чувствительностью на уровне 10^{-2} — 10^{-3} Эгв является сложной технической проблемой мирового уровня. До настоящего времени в России не создано ни одного промышленного образца СГГ [9].

Проведенные в ЦНИИМаш [9] оценки возможности реализации проекта показали, что с технической точки зрения при соответствующем финансировании создание предлагаемого геофизического КА возможно в ближайшие 5-6 лет.

Задачу измерения гравитационного поля Земли (ГПЗ) в проекте GRACE (Германия) решают по данным точного позиционирования КА с помощью GPS и лазерной локации спутников. Для этого используется специально разработанный приемник «BlackJack», обеспечивающий точность определения координат 2-3 см. Параметры гравитационного поля Земли определяются по эволюции орбит КА.

Однако в проекте GRACE определение параметров гравитационного поля по изменению расстояния между двумя КА имеет тот недостаток, что использование только двух КА не дает возможности точно определить пространственное направление изменения взаимного положения. Отсюда возможны дополнительные погрешности в вычислениях.

Представляет, также, интерес изучение ГПЗ с помощью метода спутниковой альтиметрии.

Метод был предложен для океанографических исследований в начале 70-х годов, и первое его практическое применение началось с запуском спутников GEOS-3 в 1975 г. и SEASAT в 1978 г.

Полученные вследствие обработки данных спутниковой альтиметрии высоты уровня моря позволяют построить геоид как в глобальном, так и в региональном масштабах.

При обработке альтиметрических данных в измеренных высотах уровня моря производится учет влияния орбитальных и инструментальных ошибок, геофизических факторов (состояние моря, рефракция, гидрометеоры) и океанических вариаций (течения, ветры, приливы и т. д.). Далее исправленные альтиметрические данные уравниваются для того, чтобы получить однородный набор исходных данных. В процессе уравнивания минимизируют расхождения между высотами уровня моря в точках пересечения подспутниковых трасс.

Спутниковая альтиметрия сегодня дает наиболее полную информацию о профилях геоида в акваториях Мирового океана. Кроме того, метод достаточно оперативен. В комбинации с наземными, спутниковыми, астрономо-геодезическими и гравиметрическими данными метод спутниковой альтиметрии позволяет определять высоты геоида над уровнем эллипсоида с сантиметровой точностью.

Основное уравнение спутниковой альтиметрии имеет вид

$$h = r_s - \rho - r_e,$$

где h — геометрическая высота (SSH) поверхности океана над референц-эллипсоидом; r_s — радиальное расстояние до спутника, которое вычисляется из эфемерид, полученных по траекториям лучших орбит всех существующих альтиметрических спутников; ρ — известное «точное» расстояние от центра масс КА до поверхности океана; r_e — радиальное расстояние до подспутниковых точек на общем эллипсоиде.

На основе полученных методом спутниковой альтиметрии высот геоида с использованием методов коллокации и регуляризации рассчитываются численные значения поля аномалий силы тяжести [8].

Точность построения поля аномалий силы тяжести, полученного методом спутниковой альтиметрии, составляет 4–7 мГал [8].

В украинских системах ДЗЗ не предполагалось проводить исследования по геофизическим параметрам. Однако специалисты ГКБ «Южное» совместно со специалистами ИКИ и ЦАКИЗ на совещании в ГКБ «Южное» от 23.07.03 нашли такую возможность. Прежде всего представляет интерес изучение магнитного поля Земли и создание карты магнитных полей Украины по информации научной аппаратуры «Вариант» КА «Січ-1М» и магнитометра КА «Микроспутник».

Определение параметров гравитационного поля Земли с помощью лазерно-локационного метода с использованием лазерно-локационных станций (ЛЛС) и уголковых отражателей на борту КА «Січ-1М» не представляет особых технических проблем.

С помощью лазерно-локационного метода космических гравиметрических исследований определяются значения ускорения силы тяжести на поверхности референц-эллипсоида. В основе метода лежит зависимость высоты орбиты спутника от значения ускорения силы тяжести, которая вытекает из второго закона Ньютона и закона всемирного тяготения и заключается в равенстве силы притяжения и центробежной силы при движении КА по круговой орбите:

$$F_{\tau} = F_{цб},$$

или

$$mg_0 = m\omega^2 R = \frac{mV^2}{R},$$

где m — масса КА; g_0 — ускорение свободного падения; ω — угловая скорость движения КА по орбите; V — линейная скорость движения КА по орбите; R — радиус орбиты КА.

Отсюда значение ускорения свободного падения в любой точке орбиты равно

$$g_0 = \frac{V^2}{R},$$

а значение g в подспутниковой точке на референц-эллипсоиде —

$$g = \frac{g_0 R^2}{r_e^2}.$$

Разрешающая способность данного метода определяется из точности определения координат КА лазерно-локационным методом:

$$\begin{aligned} \Delta g &= \frac{\partial g}{\partial r} \Delta R = \frac{2\mu}{R^3} \Delta R = \frac{2 \cdot 398604}{7040^3} 10^{-4} = \\ &= 2.29 \cdot 10^{-10} \text{ км/с}^2 = 2.29 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2, \end{aligned}$$

где $\mu = gr^2 = 398604 \text{ км}^3/\text{с}^2$ — гравитационная постоянная Земли, $R = 7040 \text{ км}$ — радиус орбиты КА, $\Delta R = 0.1 \text{ м}$ — приращение радиуса орбиты, фиксируемое ЛЛС.

Для решения задачи построения гравитационной карты с помощью лазерно-локационного метода требуются такие исходные данные:

- скорость движения спутника на орбите;
- текущий радиус орбиты спутника;
- текущее положение подспутниковой точки на референц-эллипсоиде;

- высота орбиты над референц-эллипсоидом.

Эти исходные данные рассчитываются по данным ЛЛС.

Для компенсации инструментальных погрешностей определения ускорения силы тяжести необходимо использовать юстировочный полигон, значения g на котором определены с максимальной возможной точностью. 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 в совокупности с данными космических измерений ускорения свободного падения, приведенными к референц-эллипсоиду, даст возможность выявить аномалии, расположенные между поверхностью Земли и референц-эллипсоидом. В результате анализа этих аномалий могут быть выявлены признаки залегания полезных ископаемых, определены районы сейсмоактивности, и может быть установлена связь между аномалиями и психофизическим состоянием людей в этом районе.

Украина в настоящее время располагает возможностью обработки метода космических геофизических исследований на базе КА «Січ-1М» с использованием аппаратуры изучения магнитного поля Земли типа «Вариант», а также с использованием ЛЛС на базе телескопов ТПЛ (рис. 2). На Украине имеется шесть таких телескопов:

- 1 — Симеизская станция НИИ «Крымская астрономическая обсерватория» (Симеиз).
- 2 — Крымская лазерная обсерватория ГАО НАН Украины (Кацивели).
- 3 — Астрономическая обсерватория Львовского национального университета имени И. Франка (Львов — Брюховичи).
- 4 — Главная астрономическая обсерватория НАН Украины (Киев).
- 5 — Государственный межвузовский центр «Орион» (Алчевск — Исаково).
- 6 — Лаборатория космических исследований Ужгородского национального университета (Ужгород — Деренивка).

Точность измерения дальности с помощью ЛЛС в основном определяется длительностью импульса лазера и параметрами импульса фотоумножителя (ФЭУ), в первую очередь джиттером (нестабильность времени пролета электронов в ФЭУ).

На украинских станциях используются ФЭУ фирмы Hamamatsu и ФЭУ-79 (на станции Simeiz-1873), работающий с лазерными импульсами длительностью 0.3—0.4 нс.

Значения средней квадратичной погрешности (СКП) ЛЛС по результатам проведения измерений в нескольких сеансах

Станция	Количество сеансов	СКП, мм
Симеиз	14	44.75
Кацивели	5	29.5
Рига	24	43.72

В таблице приводятся значения средней квадратичной погрешности (СКП) ЛЛС по результатам проведения измерений в нескольких сеансах.

Видно, что данные измерений Симеиза 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 [5].

В качестве юстировочного полигона можно использовать контрольно-калибровочный полигон Кацивели.

Перспективным вариантом реализации радиофизического метода изучения ГПЗ представляется выведение на геостационарную орбиту источника излучения с несущей частотой 35 ГГц и 45 ГГц на базе водородного стандарта, имеющего относительную стабильность частоты не хуже 10^{-15} . В этом случае, располагая приемник в нужной точке на поверхности Земли, можно определить в ней значение гравитационного потенциала. Такая система хорошо согласуется с перспективной европейской навигационной системой.

Оценку точности измерения силы тяжести радиофизическим методом проведем согласно принципу эквивалентности общей теории относительности:

$$\eta f = \eta f_0 - \frac{\eta g l f_0}{c^2} = \eta f_0 \left(1 - \frac{g l}{c^2} \right),$$

$$f = f_0 \left(1 - \frac{g l}{c^2} \right),$$

$$g = \frac{c^2}{l} \cdot \frac{\Delta f}{f_0},$$

где η — постоянная Планка, l — высота взаимного расположения излучателя и приемника, f_0 — частота источника излучения, f — принимаемая частота, c — скорость света.

Для круговой орбиты

$$k = \frac{c^2}{l} = \text{const.}$$

Следовательно, ускорение свободного падения зависит прямо пропорционально от относительного

изменения частоты:

$$g = k \frac{\Delta f}{f_0}.$$

Точность определения значения g определяется точностью определения принимаемой частоты и будет не лучше, чем стабильность частоты источника излучения (10^{-15}).

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

Дооснащение комплекса МГО дополнительными датчиками контактных измерений в составе наземной платформы сбора данных ДИПОС-1 позволит его использовать в качестве мобильной метеорологической станции.

В результате проведенного анализа необходимости и возможности создания космической системы ДЗЗ по геофизическим параметрам на базе КА «Січ-1М» и «Микроспутник» можно сделать следующее заключение. Космические исследования по геофизическим параметрам являются одним из наиболее динамично развивающихся направлений ДЗЗ. Реализация лазерно-локационного метода гравиметрических измерений с помощью угловых отражателей, расположенных на борту КА «Січ-1М», и шести существующих на Украине лазерно-локационных станций:

- не требует доработки КА «Січ-1М»;
- не требует доработок ЛЛС;
- обеспечит определение ускорения силы тяжести над территорией Украины с точностью порядка 10^{-7} м/с²;
- позволит создать высокоточные гравитационную и магнитную карты Украины;
- позволит реализовать комплексный метод ДЗЗ по геофизическим (ГКБ «Южное», ИКИ) и геохимическим параметрам (ЦАКИЗ, г. Киев) с целью определения месторасположения залежей полезных ископаемых, зон повышенной сейсмической активности и оценить степень воздействия геофизических полей на психофизическое состояние людей.

На рис. 3 в качестве примера показан результат совмещения снимков с КА «Океан-О» (с отмеченными линеаментами) с картой гравитационного поля (изолинии нанесены через 2 мкм/с²

1. Жернаков О. А., Егоров Д. А. Современное состояние и перспективы развития зарубежной гравиметрической техники // Гироскопия и навигация.—1998.—№ 1(20).— С. 35—47.

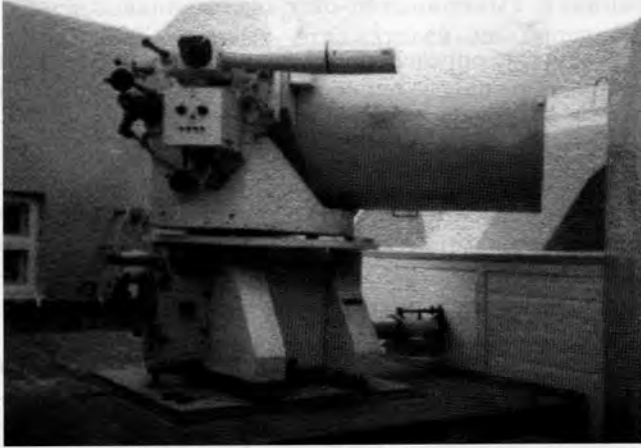


Рис. 2. Телескоп ТПЛ-1М

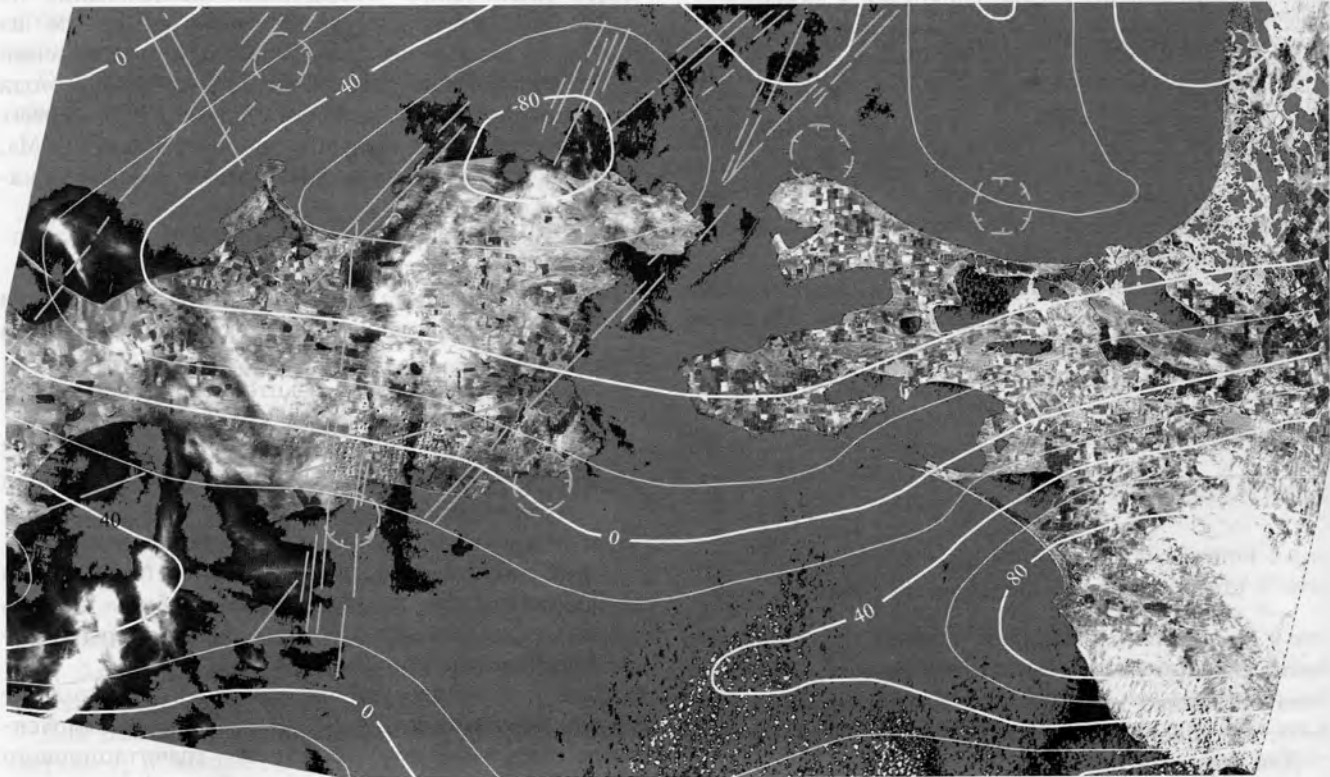


Рис. 3. Результат совмещения снимка с КА «Океан-О» с картой гравитационного поля

2. Жернаков О. А., Фрезинский В. С. Криогенные чувствительные элементы инерциальных навигационных систем: Обзор. — Л.: ЦНИИ «Румб», 1998.—200 с.
3. Жернаков О. А. Принципы создания спутникового гравитационного градиентометра // III-я Междунар. конф. «Малые спутники. Новые технологии, миниатюризация, области эффективного применения в XXI веке», 27—31 мая 2002 г., г. Королев, ЦНИИмаш. — Королев, 2002.—С. 115.
4. Зорькин Л. М., Карус Е. В., Кузнецов О. Л. и др. Явление парагенезиса субвертикальных зонально-кольцевых геофизических, геохимических и биохимических полей в осадочном чехле // Открытие № 234 от 24.07.80.
5. Минин О. А., Дмитроца А. И., Штирберг Л. С. О возможности получения сантиметровых точностей на ФЭУ-79 // Междунар. науч. конф. «Астрономическая школа молодых ученых». — Белая Церковь, 2003.—С. 29.
6. Перерва В. М., Костина Т. И. Прогнозирование зон развития вторичных коллекторов по спутниковым данным // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 197—200.
7. Перерва В. М., Левчик Е. И., Архипов А. И. и др. Некоторые аспекты механизма формирования полезного сигнала в оптическом поле ландшафтов над залежами углеводородов // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 187—197.
8. Тартачинская З. Р. Определение высот геоида и аномалий силы тяжести по данным спутниковой альтиметрии: Автореф. дис... канд. техн. наук: / Национальный ун-т «Львівська політехніка». — Л., 2002.—18 с.
9. Успенский Г. Р. Проект перспективного геофизического КА // III-я Междунар. конф. «Малые спутники. Новые технологии, миниатюризация, области эффективного применения в XXI веке», 27—31 мая 2002 г., г. Королев, ЦНИИ-маш. — Королев, 2002.—Кн. 2.—С. 123.
10. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике — М.: Наука, 1985.—С. 80.
11. European Space Agency. The Solid-State Mission ARISTOTILES // Proc. of an International Workshop, Anacardi, Italy, 23—24, 1991 / Ed. by C. Mattock. — European Space Agency Spec. Publ., 1991.—P. 13750.—(ESA SP-329).
12. Nerem R. S., Jekeli C., Kaula W. M. Gravity field determination and characteristics: Retrospective and prospective // J. Geophys. Res.—1995.—100, N B8.—P. 15053—15074.
13. Paik H. J. Superconducting gravity gradiometer on STEP // STEP — Testing the Equivalence Principle in Space: Proc. of an International Symp., Pisa, Italy, 6—8 April 1993 / Ed. by R. Reinhard. — European Space Agency, ESA WPP-115, 1996.—P. 321—334.
14. Rummel R. Geodesy with STEP // STEP — Testing the Equivalence Principle in Space: Proc. of an International Symp., Pisa, Italy, 6—8 April 1993 / Ed. by R. Reinhard. — European Space Agency, ESA WPP-115, 1996.—P. 320—321.

A COMBINED INVESTIGATION OF THE TERRITORY OF UKRAINE ON THE BASIS OF GEOPHYSICAL PARAMETERS WITH THE USE OF “SICH-1M” AND “MICROSPUTNIK” SPACE SYSTEMS

A. V. Agarkov, A. L. Makarov, S. A. Matvienko, A. V. Meleshko, Yu. A. Selivanov

We consider the possibility of the use of “Sich-1M” and “Microsputnik” space systems for the Earth remote sounding with respect to geophysical parameters.