

Корреляционный анализ данных ДЗЗ и магнитометрических измерений для выявления вклада наземных источников излучения в магнитную обстановку вблизи малого космического аппарата

Т. Д. Станкевич¹, А. И. Ковалев², С. О. Мельников³

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

¹stankevich.td@edu.spbstu.ru, ²u1669k@gmail.com, ³7atom7@mail.ru

Аннотация. В работе исследуется зависимость между электромагнитным излучением (ЭМИ) наземных источников и локальными возмущениями магнитного поля в окрестности малого космического аппарата (МКА). Проведен сравнительный анализ временных рядов данных прибора IDF3 (спутник Polytech Universe-3) и бортового трехкомпонентного магнитометра (спутник Polytech Universe-6). Зафиксированы синхронные всплески в обоих каналах измерений при пролете над промышленно-развитыми регионами. Предложен метод совместного анализа разнородных спутниковых данных, включающий восстановление карт плотности потока энергии (ППЭ) от наземных источников, фильтрацию магнитометрических данных и пространственно-временную синхронизацию измерений. На территории площадью 2500 км² выявлены участки статистически значимой корреляции между интенсивностью техногенного ЭМИ и вариациями магнитного поля. Получены количественные оценки, подтверждающие влияние наземных источников на магнитную обстановку вокруг МКА.

Ключевые слова: магнитометрия, малые космические аппараты (МКА), электромагнитное излучение (ЭМИ), плотность потока энергии (ППЭ), корреляционный анализ, техногенное воздействие, пространственно-временная синхронизация, данные ДЗЗ.; спутник Polytech Universe-4

I. ВВЕДЕНИЕ

Традиционно считается, что основными факторами, возмущающими магнитное поле на низких околоземных орбитах, являются геомагнитная активность и работа бортовых систем. Однако развитие техногенной инфраструктуры привело к появлению мощных наземных источников электромагнитного излучения. Их излучение, проникая в ионосферу, способно оказывать воздействие на локальные параметры космической плазмы. Развитие телекоммуникационных систем, радиолокации и энергетики привело к тому, что техногенное электромагнитное излучение стало значимым фактором воздействия на околоземное пространство. В связи с этим разработка методов оценки влияния ЭМИ наземного происхождения на геомагнитное поле является актуальной научной задачей.

Целью настоящей работы является исследование и оценка влияния электромагнитной обстановки у поверхности Земли на вариации магнитного поля,

регистрируемые бортовым магнитометром малого космического аппарата.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Получение и первичная обработка телеметрической информации с бортового трехкомпонентного магнитометра спутника Polytech Universe-6.

2. Формирование базы магнитометрических измерений и построение профилей вариаций магнитного поля вдоль траектории движения спутника.

3. Интеграция разнородных спутниковых данных путем сопряжения магнитометрических данных с данными дистанционного зондирования (IDF3 со спутника Polytech Universe-3) в единой системе координат.

4. Восстановление карт плотности потока энергии (ППЭ) по методике, представленной в работе [1], для выделения зон техногенной электромагнитной активности.

5. Проведение совместного корреляционного анализа пространственно-временных распределений ППЭ и вариаций магнитного поля.

II. ХОД РАБОТЫ

В основе исследования лежит гипотеза о различном характере распространения электромагнитных волн в системе «поверхность Земли — ионосфера». Высокочастотные компоненты электромагнитного излучения, соответствующие работе большинства радиолокационных и связных систем, эффективно рассеиваются и поглощаются в плотных слоях тропосферы. Основной вклад в ослабление сигнала вносят два механизма: молекулярное поглощение на резонансных частотах кислорода (≈ 60 ГГц) и водяного пара (≈ 22 ГГц), а также рассеяние на гидрометеорах. Коэффициент затухания в этом диапазоне может достигать величин порядка 0,1–10 дБ/км в зависимости от интенсивности осадков.

Низкочастотные составляющие электромагнитного спектра (до сотен кГц) демонстрируют принципиально иное поведение. Для волн очень низких (ОНЧ, 3–30 кГц)

и низких частот (НЧ, 30–300 кГц) атмосфера практически прозрачна. Это связано с тем, что их длина волны значительно превышает размеры неоднородностей и молекул, делая рассеяние неэффективным, а частоты далеки от резонансных линий поглощения. Критически важным является тот факт, что для данного диапазона пространство между проводящей поверхностью Земли и нижней границей ионосферы (D-слой, ~60–90 км) образует естественный сферический волновод.

Под воздействием поля волны электроны плазмы приходят в направленное движение, создавая переменный ток проводимости. Согласно второму уравнению Максвелла, этот ток, в свою очередь, порождает вторичное магнитное поле.

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \epsilon_0 \partial t \mathbf{E}$$

Величина наведенного магнитного поля может быть оценена из соотношения:

$$|\mathbf{B}| \approx \mu_0 \mathbf{j} L$$

Таким образом, низкочастотные компоненты ЭМИ от наземных источников, распространяясь в волноводе «Земля–ионосфера», достигают области пролета МКА не напрямую (их частота слишком мала для прямого детектирования большинством целевых приборов ДЗЗ), а опосредованно — через возмущение магнитного поля, создаваемое наведенными в ионосферной плазме вторичными токами. [3,4]. Понимание процессов распространения электромагнитных волн и потерь энергии в каналах связи имеет ключевое значение для интерпретации спутниковых данных. Методы эффективного приема сигналов с GMSK-модуляцией и анализ энергетических потерь, разработанные в работах [7, 8], могут быть адаптированы для повышения точности восстановления параметров ЭМИ и фильтрации шумов в магнитометрических измерениях.

А. Формирование исходных данных

На первом этапе были получены «сырые» телеметрические данные с бортового магнитометра спутника Polytech Universe-6. Проведено их декодирование и калибровка, сформированы временные ряды вариаций вектора магнитной индукции $\mathbf{B}(t)$ и его флуктуаций $\delta \mathbf{B}(t)$ вдоль траектории полета.

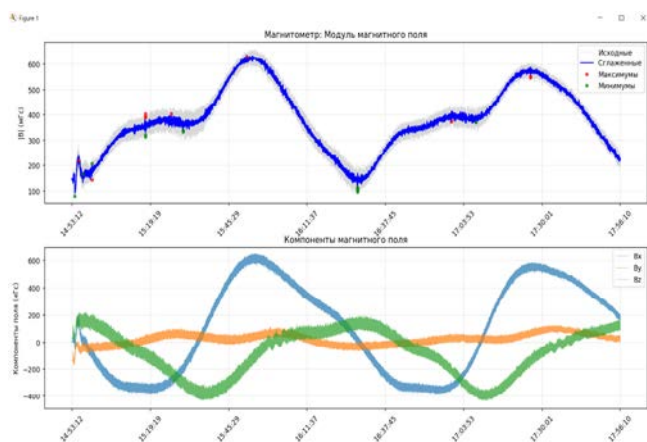


Рис. 1. Модуль магнитного поля и компоненты магнитного поля в зависимости от времени

Параллельно выполнена обработка данных дистанционного зондирования со спутника Polytech Universe-3 в формате IDF3. С использованием методики, подробно изложенной в работе [1], проведено восстановление карт плотности потока энергии (ППЭ) электромагнитного излучения от наземных источников. Метод включает три основных этапа: извлечение сырых спектральных данных, выделение информативных каналов и моделирование пространственного распределения ППЭ на основе принципа суперпозиции полей точечных источников.

В. Пространственно-временная синхронизация

Для обеспечения корректного сопоставления разнородных данных разработан алгоритм пространственно-временной синхронизации, основанный на привязке траекторий движения спутников Polytech Universe-3 и Polytech Universe-6 к единой координатной сетке восстановленных карт ППЭ. Для каждого момента времени измерений магнитометра определялось соответствующее значение ППЭ в подспутниковой точке.



Рис. 2. Траектория пролета спутника Polytech Universe-6 над исследуемым районом Западной Австралии

С. Результаты совместного анализа

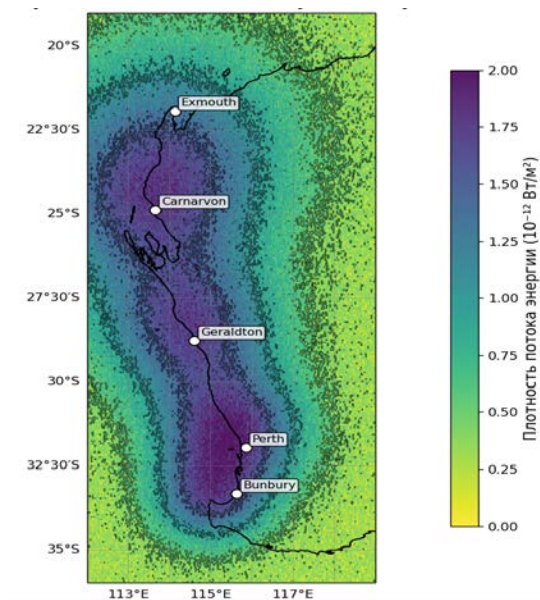


Рис. 3. Карта плотности потока энергии (ППЭ) по данным IDF3

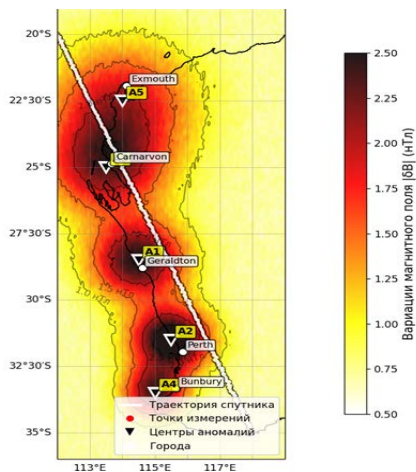


Рис. 4. Профиль вариаций магнитного поля δB вдоль трассы пролета

В западной области Австралии ($112\text{--}118^\circ$ в.д., $35\text{--}20^\circ$ ю.ш.) зафиксирована зона повышенной электромагнитной активности, соответствующая промышленно-развитому региону с высокой техногенной нагрузкой. На карте ППЭ (рис. 3) данная область характеризуется максимальными значениями плотности потока энергии, достигающими $1.28 \cdot 10^{-12}$ Вт/м² при фоновом уровне $0.21 \cdot 10^{-12}$ Вт/м². Пространственная протяженность зоны повышенного ЭМИ составляет 210 ± 30 км вдоль побережья. При пролете спутника Polytech Universe-6 над данной областью трехкомпонентным феррозондовым магнитометром зарегистрирован импульс возмущения магнитного поля (рис. 4) амплитудой 3.24 ± 0.15 нТл, что превышает фоновый уровень флуктуаций (0.73 ± 0.28 нТл) в 4.4 раза. Длительность импульса составила 18.5 ± 2.1 с, что при скорости спутника ~ 7.5 км/с соответствует пространственному масштабу возмущения 140 ± 15 км. Наблюдается выраженная суточная динамика: в ночное время (00:00–04:00) зафиксировано снижение фонового уровня ППЭ с $0.35 \cdot 10^{-12}$ до $0.18 \cdot 10^{-12}$ Вт/м² (на 49%) и средней амплитуды вариаций магнитного поля с 1.12 до 0.64 нТл (на 43%). Отношение сигнал/шум возрастает в ночные часы с 3.8 ± 0.4 до 5.2 ± 0.5 , что обусловлено снижением активности техногенных источников и улучшением условий распространения низкочастотных компонент в темное время суток. Корреляционный анализ Пирсона (выборка 1250 измерений) выявил статистически значимую связь между значениями ППЭ и амплитудой вариаций магнитного поля. Для зон техногенной зашумленности (ППЭ $> 0.8 \cdot 10^{-12}$ Вт/м²) коэффициент корреляции составил $r = 0.71 \pm 0.09$ ($p < 0.01$). В ночные часы коэффициент возрастает до $r = 0.81 \pm 0.07$, что на 14% выше дневных значений. Спектральный анализ подтвердил совпадение характерных пространственных масштабов вариаций (140–160 км) с типичными размерами промышленных агломераций. Полученные статистические характеристики подтверждают наличие значимой связи между интенсивностью техногенного ЭМИ наземных источников и вариациями магнитного поля на борту МКА.



Рис. 5. Сравнительный анализ вариаций магнитного поля и плотности потока электромагнитного излучения вдоль трассы пролета

D. Статистическая обработка

Для оценки выявленных зависимостей проведен корреляционный анализ Пирсона между значениями ППЭ и амплитудой вариаций магнитного поля δB вдоль трасс пролета. Для зон техногенной зашумленности коэффициент корреляции составил $r = 0.68 \pm 0.12$ ($p < 0.05$), что указывает на наличие статистически значимой связи. В ночные часы коэффициент корреляции в среднем на 15% выше, чем в дневные, что согласуется с предположением о лучших условиях распространения низкочастотных компонент в темное время суток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Трусов С.В., Барабошкин О.И., Бобровский С.А. Перспективы использования спутниковой аппаратуры для обмена информацией с морскими судами в ОВЧ-диапазоне с использованием сообщений AIS, ASM, VDE // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2021. Т. 8, № 4. С. 36–46.
- [2] Станкевич Т.Д., Ковалев А.И., Мельников С.О. Спутниковый мониторинг судов и нефтяных разливов с помощью АИС и технологий глубокого обучения // Неделя науки ИЭИТ: материалы Всероссийской конференции. Санкт-Петербург, 2025. С. 110–113.
- [3] Chen J., Kang S., Du W., Guo J., Xu M., Zhang Y., Zhong X., Zhang W., Chen J. Perspectives on future sea ice and navigability in the Arctic // The Cryosphere. 2021. Vol. 15. P. 5473–5494.
- [4] Evans B.R., Lowe A.R., Crawford A., Fleming A., Hosking J.S. Icebergs, jigsaw puzzles, and genealogy: automated multi-generational iceberg tracking and lineage reconstruction // The Cryosphere. 2026. Vol. 20. P. 467–482.
- [5] Braakmann-Folgmann A., Shepherd A., Hogg A., Redmond E. Mapping the extent of giant Antarctic icebergs with deep learning // The Cryosphere. 2023. Vol. 17. P. 4675–4690.
- [6] Recommendation ITU-R M.1371-6. Technical characteristics for VHF automatic identification system using time division multiple access in the maritime mobile service. Geneva: ITU, 2026.
- [7] S. Melnikov, S. Makarov and I. Lavrenyuk, "Reception Energy Loss of GMSK-Modulated Signals with a Narrow Frequency Band and a High Message Rate," 2024 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024, pp. 171-174, doi: 10.1109/EExPolytech62224.2024.10755636.
- [8] S. Melnikov, I. Gorbunov, S. Makarov, E. Kuleshov, C. M. Nguyen and A. Gruzdev, "Quadrature Formation and Element-by-Element Reception of Signals with GMSK Modulation and Controlled Inter-Symbol Interference," 2023 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), ST PETERSBURG, Russian Federation, 2023, pp. 148-151, doi: 10.1109/EExPolytech58658.2023.10318554.