

УДК 550.38; 550.380

В. Є. Корепанов¹, Л. М. Литвиненко², В. А. Литвинов³,
Г. П. Міліневський^{3, 4}, Ю. М. Ямпольський²

¹Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, Львів

²Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

³Український антарктичний центр, Київ

⁴Київський національний університет ім. Тараса Шевченка

Електромагнітний полігон наземної підтримки супутникових експериментів на Українській антарктичній станції

Надійшла до редакції 05.05.04

Головним сучасним напрямом наукових досліджень Української антарктичної станції «Академік Вернадський» (УАС) є електромагнітний моніторинг процесів, що відбуваються в атмосфері та близькому космосі. Описано електромагнітне обладнання УАС, його основні параметри, режими роботи та ряд отриманих оригінальних фізичних результатів. Підкреслено важливість використання електромагнітного полігону УАС для створення системи наземної наукової підтримки майбутніх українських космічних місій. Сформульовані перспективи розвитку експериментальної бази та головні проблеми, які необхідно розв'язати для збільшення ефективності використання УАС у цій ролі.

ВСТУП

Українська антарктична станція «Академік Вернадський» (УАС) з'явилася на карті Антарктики в лютому 1996 р., коли на станції «Фарадей» було спущено британський прапор і піднято український. Від того часу на УАС активно проводиться широке коло різноманітних оригінальних досліджень з метою вивчення довкілля шостого континенту. Винятково чисте у електромагнітному відношенні середовище було основним фактором, який стимулював створення на УАС науково-дослідного електромагнітного (ЕМ) полігону для вивчення дуже слабких ЕМ-сигналів, які відображають фундаментальні процеси у природній системі «літосфера—атмосфера—іоносфера—магнітосфера» (ЛАІМ).

Для обладнання полігону необхідно було створити пристрої ЕМ-вимірювань обсерваторського класу з гранично низьким рівнем власних шумів. Крім того, потрібно було організувати відповідну систему збирання та обробки даних, яка дозволяла б проводити безперервний моніторинг ЕМ-оточення та накопичувати дані вимірювань у постійно поповнюва-

ний архів. Важливою умовою при цьому була точна синхронізація процесу реєстрації зі світовим часом (UT) та організація регулярної передачі даних як в Україну, так і до світової мережі центрів даних (WDC).

Метою детального дослідження системи ЛАІМ було вивчення та ідентифікація фізичних процесів у її верхніх ділянках та на поверхні Землі. Зокрема йшлося про магнітосферні резонанси та збурення магнітного поля, глобальну грозову активність, потужні атмосферні фронти тощо. При цьому деякі результати вдалося отримати вперше.

Вигідне географічне розташування, сучасне наукове обладнання та безперервний режим реєстрації — все це створює передумови використання УАС як ЕМ-полігону для вивчення сонячно-земних зв'язків, який може працювати паралельно та синхронно з проведенням наукових експериментів на борту штучних супутників Землі. Враховуючи, що у 2004 р. буде здійснено запуск ШСЗ «Січ-1М» з науковим експериментом «Варіант» на борту, вперше підготовленим Україною [4], ЕМ-полігон УАС набуде особливого значення для здійснення назем-

ної підтримки експерименту. Синхронна робота приладів на УАС і на борту ШСЗ дозволить провести інтеркалібрування вимірювальних систем УАС та ШСЗ. Проведення одночасних вимірювань на поверхні Землі і в космосі на одній вертикалі або вздовж однієї силової лінії магнітного поля Землі дозволить також дослідити *in situ* розвиток процесів у системі ЛАІМ.

Нижче викладені особливості побудови системи ЕМ-моніторингу на УАС та деякі оригінальні результати, які ілюструють можливості спостережень в Антарктиці.

АПАРАТУРНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕМ-ПОЛІГОНУ УАС

На сьогодні станція «Академік Вернадський» обладнана комплексом апаратури українського виробництва для ЕМ-досліджень, у який входять:

- два автоматичні трикомпонентні ферозондові магнітометри постійного поля типу LEMI008;
- п'ять індукційних магнітометрів змінного поля типу LEMI-112;
- двокомпонентний електрометр для вимірювання напруженості телуричних полів;
- два когерентні короткохвильові приймачі дослідження динаміки процесів на іоносферних рівнях;
- системи збору, синхронізації, накопичення та попередньої обробки інформації.

Функціональна схема ЕМ-комплексу наведена на рис. 1.

Всі ці прилади і відповідне програмне забезпечення створені в Україні. Крім того, в межах міжнародної кооперації Геологічна служба Сполучених Штатів Америки (USGS) надала Українському антарктичному центру систему автоматичної передачі даних через американський супут-

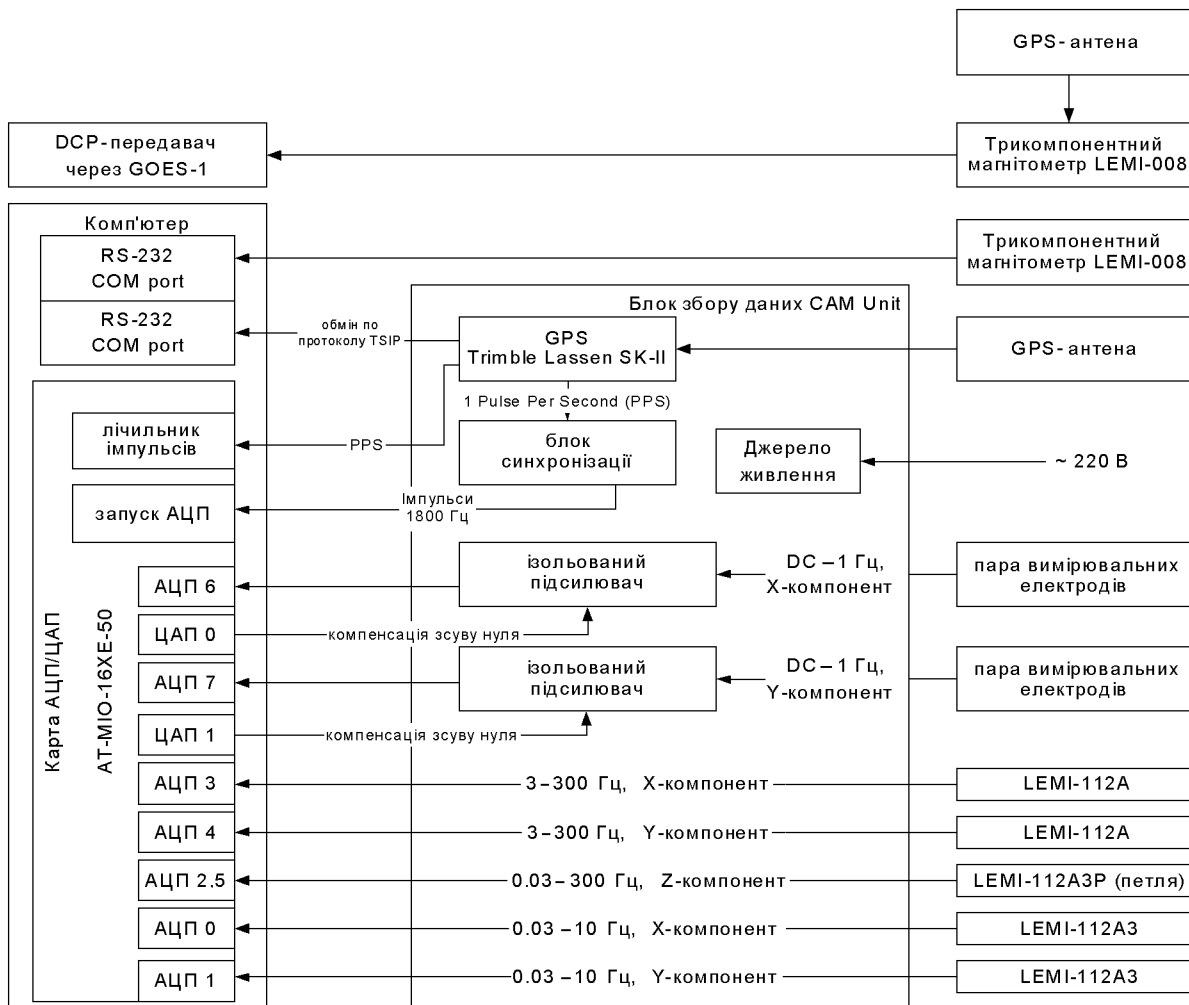


Рис. 1. Функціональна схема ЕМ-комплексу УАС

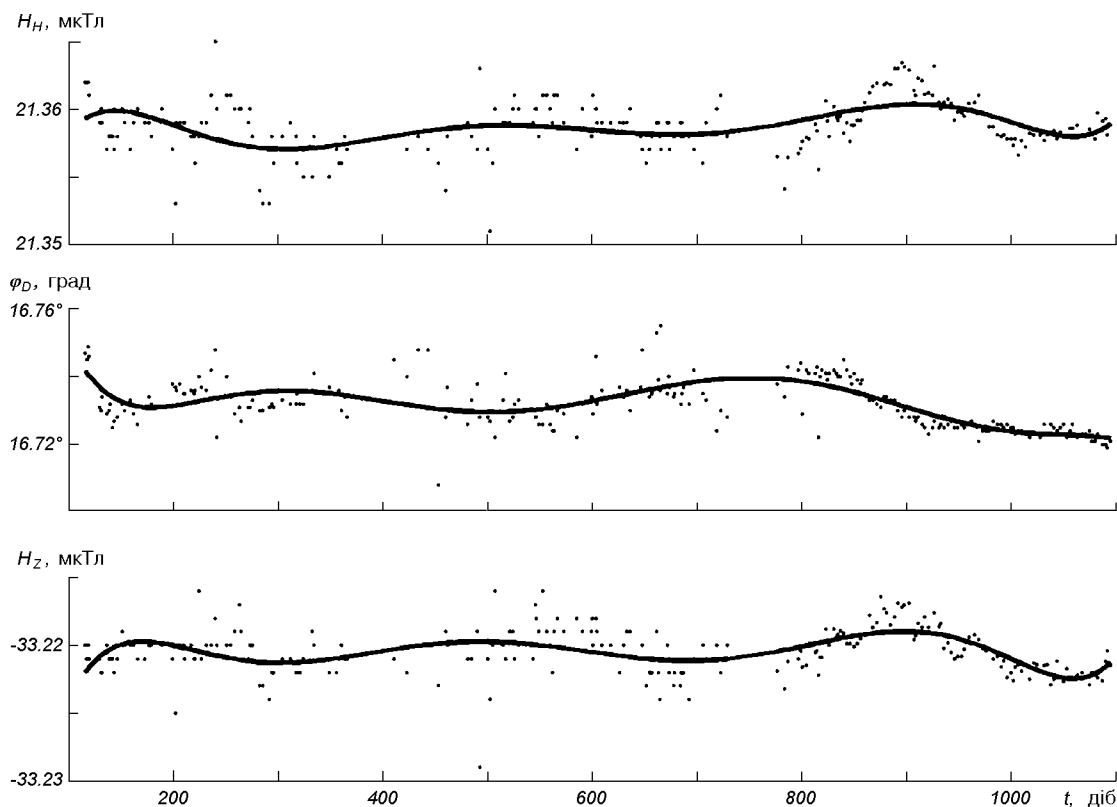


Рис. 2. Базова лінія магнітометра геомагнітної обсерваторії УАС за три роки

ник GOES, яка також встановлена на станції і регулярно передає дані вимірювання магнітного поля Землі в систему «Інтермагнет».

Параметри встановленого на станції комплексу апаратури не поступаються рівневі кращих обсерваторій. Про це свідчить висока стабільність базової лінії головного магнітометра станції LEMI-008 за останні три роки. Багаторічний дрейф нуля знаходиться в межах ± 2.5 нТл/рік при світовому стандарті ± 5 нТл/рік (рис. 2), а якщо вилучити сезонний тренд, то розкид вимірювань взагалі вкладається в 1 нТл/рік, що є одним з найвищих у світі показників для цього класу приладів.

Магнітометри цього типу мають вбудовану флеш-пам'ять для накопичення й зберігання даних, GPS-приймач для синхронізації відбору даних та визначення координат, цифровий вихід RS-232 для передачі даних з флеш-пам'яті до комп'ютера та зовнішнього контролю режимів роботи, дисплей та аналоговий вихід для під'єднання до зовнішньої системи збору й обробки даних.

Для дослідження флуктуацій магнітного поля у наднизькочастотному діапазоні (ННЧ), які збуджу-

ються світовою грозовою активністю, створено систему індукційних зондів — магнітометрів LEMI-112 — у різних варіантах виконання. Спочатку було виготовлено два магнітометри LEMI-112A для діапазону частот 3—300 Гц з дуже високою чутливістю для вивчення шуманівських резонансів та гармонік світових мереж електропостачання. Приклад реєстрації ЕМ-сигналів цими зондами показано на рис. 3, де чітко видно високу ефективність їхньої роботи: рівень вищих гармонік шуманівських резонансів не перевищує десятків фемтотесла, проте вони чітко вирізняються на рівні шумів. Сьогодні вже розроблені оригінальні методики обробки та інтерпретації даних, що дозволяють із Антарктики контролювати глобальну грозову активність залежно від поточного часу та пори року [1].

У зв'язку з віддаленістю від будь-яких джерел випромінювання територія станції є винятково зручним полігоном для проведення досліджень тонкої структури природних ЕМ-емісій. Для забезпечення ЕМ-чистоти були вжиті додаткові заходи: заземлено побутову електромережу, складено графіки ввімкнення побутового й наукового обладнан-

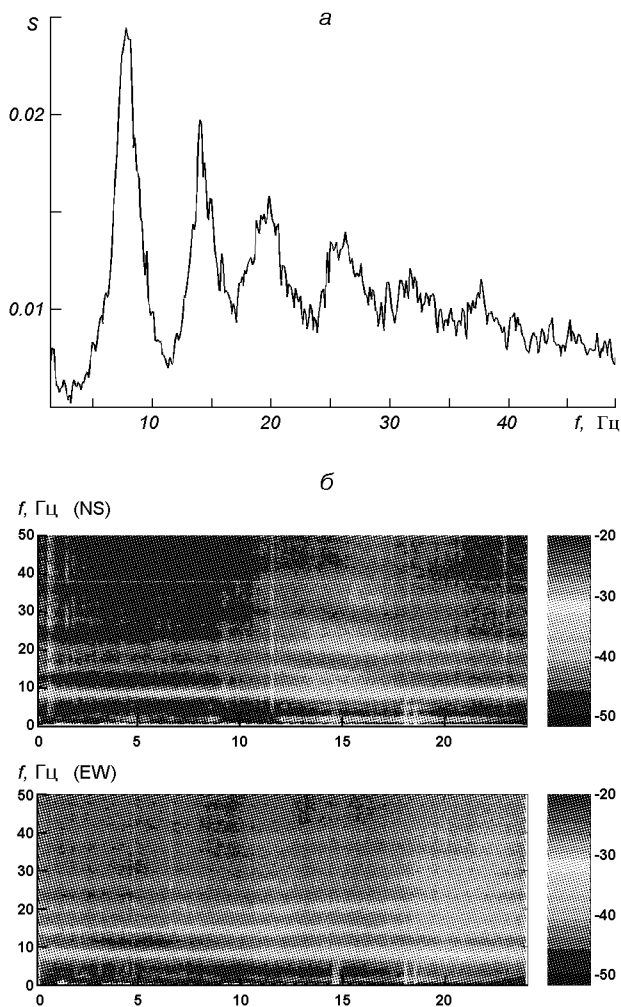


Рис. 3. Приклад реєстрації ЕМ-сигналів на УАС: *a* — спектр сигналу каналу магнітометра ЗВ 14 вересня 2002 р. в діапазоні шуманівських резонансів, (усереднення 10 хв, частотна роздільна здатність 0.12 Гц), *б* — добова спектрограма сигналу в діапазоні шуманівських резонансів (0.1—50 Гц)

ня значної потужності. Проте деякі джерела ЕМ-завад не вдалося повністю ліквідувати. Наприклад, чітко реєструється завада, викликана роботою КХ-передавача зв'язку станції. Але оскільки ця подія трапляється відносно рідко і може бути регламентована, суттєвого впливу на якість отриманих результатів вона не має. У майбутньому планується замінити вказаний пристрій на УКХ-передавач з супутниковим ретранслятором, що усуне це джерело завади. Після цього можна сподіватися, що в геомагнітній обсерваторії станції будуть створені оптимальні умови для проведення вимірювань слабких ЕМ-сигналів і використання їхніх результатів для геофізичних досліджень.

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ГЕОМАГНІТНИХ ПУЛЬСАЦІЙ

Геомагнітні пульсації є реакцією атмосфери на спорадичну корпускулярну активність Сонця і несуть у собі водночас інформацію як про джерело збудження, так і про магнітосферу та стан навколосезонної плазми [2, 8]. Починаючи від 1998 р. на УАС експериментально вивчаються резонансні мікропульсації двох типів — Рс3 та Рс4. Як правило, вони викликаються власними магнітогідродинамічними (МГД) коливаннями в денній магнітосфері. МГД-хвилі частково відбиваються від нижньої границі іоносфери (Е-шар), а частково трансформуються в ЕМ-хвилі, які поширюються в нейтральній атмосфері та реєструються на поверхні Землі магнітометрами. Як відомо, Е-шар іоносфери, що формується лише в денних умовах освітлення, відіграє роль нижньої границі магнітосферного резонатора. Його утворюють геомагнітні трубки, «закріплені» в магнітно-спряжених точках двох півкуль. Спостереження поведінки власних частот резонансів, добротностей та часу їхнього виникнення дають важливу інформацію про стан магнітного поля та навколосезонного плазмового оточення.

Варіації напруженості магнітного поля, спричинені геомагнітними мікропульсаціями досліджуваних класів, складають десятки й соті частки нанотесла, тому для їхньої реєстрації на Землі слід використовувати дуже чутливі магнітометри, які й були встановлені на УАС вперше 1998 р. Їхні параметри дозволили здійснити аналіз трикомпонентних варіацій магнітного поля з метою вивчення тонких спектральних характеристик та поляризаційної структури геомагнітних пульсацій у діапазоні частот пульсацій Рс3 та Рс4 [3].

На першому етапі обробки розраховувалися функції вірогідності появи пульсацій для різних частотних інтервалів протягом доби, після чого досліджувалися їхні поляризаційні властивості. Всього було зафіксовано $M = 884$ випадки появи пульсацій за 10 днів вимірювань.

На рис. 4 зображені середні добові залежності параметрів поляризації за увесь цикл спостережень для всіх пульсацій з частотами 10—22 мГц (Рс4) та 24—60 мГц (Рс3) — рух кута φ орієнтації великої осі еліпса поляризації. Всі параметри поляризації були усереднені у годинних інтервалах; показано середні квадратичні відхилення значень для кожного інтервалу.

Пульсації класу Рс3 переважно спостерігалися в ранковий час, а пульсації класу Рс4 були рівномірно розподілені протягом дня. Створені цими пульсаціями коливання магнітного поля мають

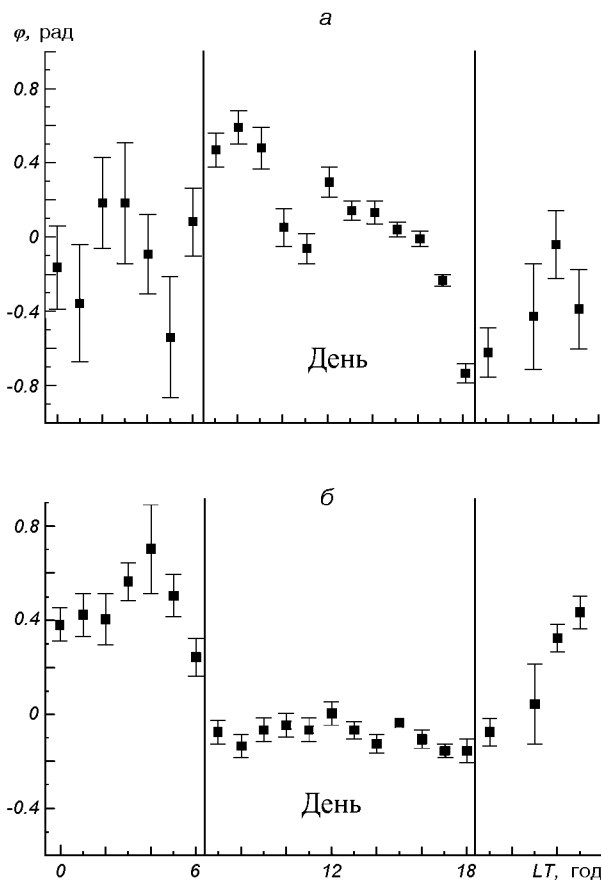


Рис. 4. Середні добові варіації кута φ між північним напрямом та великою віссю еліпса поляризації у період 22—31 березня 1998 р.: *а* — для пульсацій класу Pc4, *б* — для пульсацій класу Pc3

еліптичну поляризацію і, що найцікавіше, помічено регулярний рух великої осі еліпса поляризації пульсацій Pc4 за Сонцем. Цей ефект встановлено вперше, і автори назвали його «ефект соняшника» [3]. Багаторічні безперервні спостереження за позиційним кутом еліпса поляризації в Антарктиці та поблизу магнітно-спряженого регіону в США підтвердили таку закономірність та дозволили використовувати цей ефект для відтворення умов збудження магнітосферного резонатора.

Детальний фізичний аналіз описаних вище особливостей поведінки поляризаційних характеристик дозволив зробити ряд важливих геофізичних висновків. Регулярні добові залежності орієнтації еліпса поляризації не можуть бути викликані виключно магнітосферними ефектами. Водночас вони спричинені регулярними змінами іоносфери, контрольованими сонячною радіацією. Дійсно, з одного боку

E-шар відіграє роль границь магнітосферного резонатора, з іншого — параметри іоносфери (інтегральні поперечні провідності) чітко «відслідковують» добові та сезонні зміни УФ-радіації Сонця. На висотах нижньої іоносфери (100—130 км) своїх максимальних значень досягають поперечні педерсенівська й холлівська провідності, які формують відбивальні властивості магнітосферного резонатора. Провідності, в свою чергу, визначаються електронною концентрацією, іонним складом і частотами зіткнень часток — іоносферними параметрами, які мають яскраво виражені добову та сезонну залежності. Довгостроковий моніторинг цього ефекту на УАС та поблизу магнітно-спряженого регіону (Нова Англія, США) дозволив розробити методику відтворення поперечних провідностей нижньої іоносфери, які неможливо безпосередньо вимірювати з борту ШСЗ [10]. Ці дослідження були проведені разом з колегами зі США, які забезпечили аналогічні дослідження у Північній півкулі на обсерваторії Мілстоун Хілл (поблизу м. Бостон, Массачусетс).

При успішному запуску ШСЗ «Січ-1М» і проведенні синхронних наземно-космічних спостережень цих ефектів можуть бути отримані додаткові дані про стан магнітної оболонки, магнітосфери в цілому та іоносфери магнітно-спряжених регіонів.

ВЗАЄМОДІЯ ПОТУЖНИХ МЕТЕОПРОЦЕСІВ З ІОНОСФЕРНОЮ ПЛАЗМОЮ

Взаємодія потужних атмосферних процесів, які відбуваються біля поверхні Землі, з нейтральною та зарядженою складовими атмосферного газу є одним з найважливіших питань динаміки близького космосу. До найвпливовіших приповерхневих явищ перш за все слід віднести потужні атмосферні фронти та циклонічні вихори. Їхня енергія на декілька порядків може перевищувати енергію землетрусів, вивержень вулканів та ін. [6]. Багато дослідників геокосмосу намагалися виявити збурення метеорологічної природи на іоносферних висотах, аналізуючи варіації висотного профілю електронної концентрації. Однак досі не були отримані переконливі однозначні свідчення такої взаємодії. Невдача при такому підході частково визначається тим, що висотний профіль електронної концентрації є багатопараметричною функцією, кореляційні зв'язки з якою мають багатовимірний та неоднозначний характер. Крім того, на іоносферних рівнях здебільшого реєструються не самі атмосферні збурення, а їхні радіофізичні прояви, які не дозволяють переконливо виявити їхню природу [9].

У дослідженнях на УАС проведено цілеспрямовано

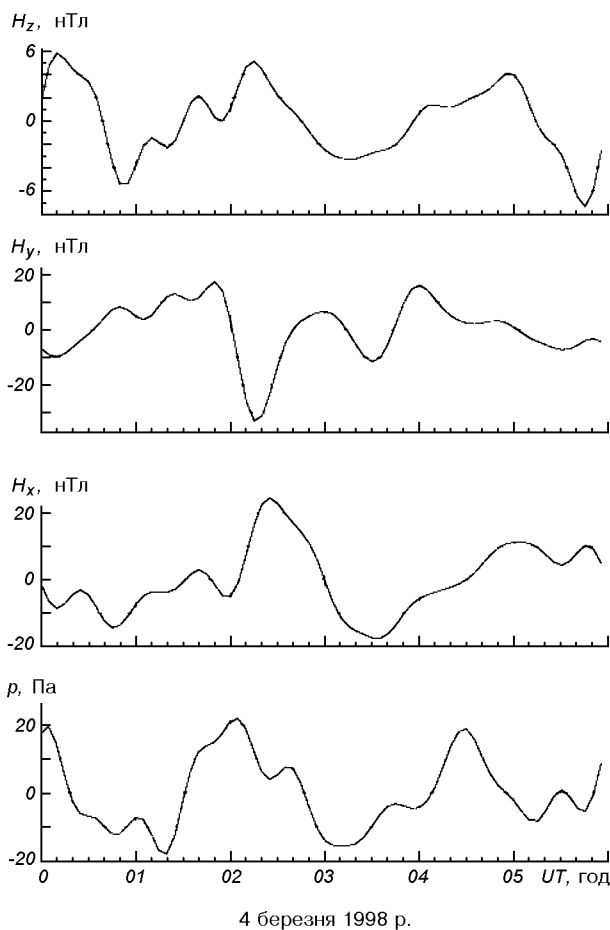


Рис. 5. Дані синхронних вимірювань трьох складових магнітного поля H та атмосферного тиску P під час проходження атмосферного фронту 4 березня 1998 р.

ване зіставлення варіацій метеопараметрів, виміряних біля поверхні Землі, із синхронними змінами магнітного поля. При цьому виявлено стійку реакцію магнітного поля Землі на проходження атмосферних фронтів [7]. На рис. 5 подано типовий приклад синхронно зареєстрованих на УАС варіацій трьох складових магнітного поля Землі та атмосферного тиску, де чітко простежується кореляція магнітних флуктуацій з часовим зсувом 25—30 хв відносно варіацій приповерхневого тиску. Як показують теоретичні розрахунки, ця затримка визначається часом розповсюдження атмосферних гравітаційних хвиль (АГХ), які збуджуються атмосферним фронтом, до висоти нижньої іоносфери (~100 км). Крім того, помічено, що варіації магнітного поля Землі, стимульовані атмосферою активністю на УАС, практично синхронно спостерігаються поблизу магнітно-спряженої точки на по-

верхні Землі — в регіоні Нової Англії у Північній півкулі.

Зазначені особливості подібних варіацій атмосферного тиску й магнітного поля Землі дозволили побудувати сучасну фізичну модель проектування потужних атмосферних процесів на висоти геокосмосу. Деталі цієї моделі викладені в роботі [7]. Суть її полягає в тому, що потужний погодний фронт збуджує в тропосфері атмосферні гравітаційні хвилі, які з півгодинною затримкою розповсюджуються вгору до висот динамо-шару зі швидкостями, обумовленими дисперсійними властивостями атмосфери. Модуляція щільності, швидкості рухів та температури нейтральної та заряджених складових атмосферного газу на цих висотах за рахунок впливу АГХ викликає варіації електродинамічних параметрів нижньої іоносфери — поперечних провідностей та щільності струму. Це, в свою чергу, збуджує стимульовані коливання магнітного поля в ділянці проходження фронту і практично одночасно в магнітно-спряженому регіоні.

На підставі цієї схеми розроблено оригінальну теоретичну модель, яка описує весь ланцюг фізичних явищ: збудження АГХ, їхнє розповсюдження на висоті динамо-шару, модуляцію плазмових параметрів нижньої іоносфери, струмових систем і стимульованих варіацій магнітного поля в обох півкулях. Числові оцінки, отримані в межах створеної моделі, добре узгоджуються з одночасно виміряними коливаннями тиску й магнітного поля Землі [11].

Зрозуміло, що деякі аспекти запропонованої теорії вимагають подальшого розвитку. Можна передбачити перспективність одночасних спостережень ЕМ-полів, які будуть проведені як на поверхні Землі біля УАС, так і за допомогою ШСЗ безпосередньо в геокосмосі.

Крім того, є аргументовані сподівання, що подальший розвиток моделі цього процесу матиме серйозний вплив і на розв'язання проблеми виявлення провісників землетрусів за допомогою ШСЗ. Існують численні свідчення, що перед початком землетрусу накопичення внутрішнього напруження приводить до деформації земної поверхні [5], яке теж може викликати АГХ. Треба додати, що атмосфера відіграє роль своєрідного «підсилювача» коливань земної поверхні через різке зменшення щільності атмосферного газу з висотою (на 3–4 порядки на висотах Е та F шарів відповідно). Навіть дуже малі сейсмічні коливання поверхні можуть призвести до суттєвого зсуву провідного шару іоносфери (на сотні—тисячі метрів), які у свою чергу викличуть генерацією магнітних варіацій, які можуть бути зареєстровані з борту ШСЗ.

ВИСНОВКИ

Наведені вище приклади та аргументи дають можливість передбачити важливу роль унікального «підсупутникового» ЕМ-полігону, створеного в Антарктиці, у майбутніх наукових дослідженнях системи ЛАІМ наземними та космічними засобами. За перші роки роботи полігону отримані наукові результати сучасного світового рівня. Доповнюючи наземні дослідження супутниковими, можна очікувати появу нових даних спостережень обміну енергії між поверхнею Землі, атмосферою та геокосмосом. Це дозволить детальніше вивчити механізми взаємодії в системі ЛАІМ для прогнозування потужних природних явищ. Звичайно, реалізація цих наукових перспектив вимагає розвитку та вдосконалення методичного й апаратного забезпечення експериментальних досліджень на УАС. У першу чергу це стосується підтримання максимально чистих ЕМ-умов на території станції, оскільки на сьогодні реалізувати власні граничні можливості магнітометрів поки що не вдається. Зважаючи на суворі погодні умови й скелястий ґрунт, будівництво окремого ЕМ-чистого павільйону з повним комплектом дослідницької апаратури є неординарним завданням, виконання якого потребує значних витрат часу та коштів. Одночасно потрібно розв'язати проблему надійного зв'язку з УАС для оперативної передачі великого обсягу експериментальних даних для проведення синхронних спостережень і використання УАС як «підсупутникового» полігону для ЕМ-моніторингу в реальному часі.

Виняткова важливість розв'язання цих завдань для подальшого розвитку вітчизняних космічних та антарктичних досліджень повинна стимулювати об'єднання зусиль усіх зацікавлених відомств.

Автори вдячні великому колективу зимівників, співробітникам ЛЦ ІКД, РІ НАНУ та УАЦ, які забезпечували безперебійну роботу унікального електромагнітного обладнання в суворих антарктичних умовах. Ми також вдячні Міністерству освіти і науки України, Національній академії наук України та Національному космічному агентству України за підтримку цих досліджень. Основні результати роботи отримані в рамках Державної програми проведення досліджень в Антарктиці за напрямками «Фізика верхньої атмосфери та близького космосу» та «Розробка і впровадження нових технологій».

1. Безродный В. Г., Буданов О. В., Колосков А. В., Ямпольский Ю. М. Электромагнитное окружение Земли в СНЧ-диапазоне // Космична наука і технологія.—2003.—9, № 5/6.—С. 117—123.
2. Гульельми А. В., Троицкая В. А. Геомагнитные пульсации и диагностика ионосферы. — М.: Наука, 1974.—208 с.
3. Зализовский А. В., Ямпольский Ю. М., Корепанов В. Е., Доценко И. Ф. Поляризационные исследования пульсаций P_{с3}, P_{с4} на антарктической станции «Академик Вернадский» («эффект подсолнуха») // Радиофизика и радиоастрономия.—2000.—5, № 2.—С. 118—124.
4. Корепанов В., Негода О., Лізунов Г. та ін. Проект «Вариант»: вимірювання електромагнітних полів та електричних струмів іоносферної плазми на супутнику «Січ-1М» // Космична наука і технологія.—1999.—5, № 5/6.—С. 1—6.
5. Свенсон О. М. Спучування земної поверхні — додатковий інформативний параметр у прогнозуванні землетрусів // Відбір і обробка інформації.—2000.—№ 14(90).—С. 100—104.
6. Черногор Л. Ф. Энергетика процессов на Земле, в атмосфере и околоземном космосе в свете проекта «Предупреждения» // Космична наука і технологія.—1999.—5, № 1.—С. 38—47.
7. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н. и др. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью // Радиофизика и радиоастрономия.—2004.—9, № 3.
8. Clilverd M. A., Menk F. W., Milinevsky G. P., et al. In situ and ground-based intercalibration measurements of plasma density at L = 2.5 // J. Geophys. Res.—2003.—108A, N 10.—1365.—DOI: 10.1029/2003JA009866.
9. Galushko V. G., Beley V. S., Koloskov A. V., et al. Frequency-and-angular HF sounding and VHF ISR diagnostics of TIDs // Radio Science.—2003.—38(6).—P. 1102.
10. Sinitin V. G., Yampolski Y. M., Zalizovski A. V., et al. Spatial field structure and polarization of geomagnetic pulsations in conjugate areas // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys.—2003.—N 65.—P. 1161—1167.
11. Yampolski Yu., Zalizovski A., Lizunov G., Korepanov V. Experimental evidence of AGW generation as possible explanation of lithosphere-ionosphere coupling mechanism // Geophys. Res. Abstracts.—2003.—5. (EGS-AGU-EUG Joint Assembly).

SPACE EXPERIMENTS GROUND SUPPORT
ELECTROMAGNETIC POLYGON AT UKRAINIAN
ANTARCTIC STATION

V. Ye. Korepanov, L. M. Lytvynenko, V. A. Lytvynov,
H. P. Milinevskiy, Yu. M. Yampolskiy

The main direction of scientific researches of Ukrainian Antarctic Station (UAS) named «Academician Vernadsky» is electromagnetic monitoring of the system «Lithosphere — Atmosphere — Ionosphere — Magnetosphere» (LAIM). Electromagnetic instrumentation at UAS and its main parameters and operation mode are described. New original scientific results giving more light to the interactions in LAIM system are discussed and corresponding physical models are shortly described. The importance of UAS electromagnetic polygon as ground support of future Ukrainian space missions is underlined and main problems to be solved to use UAS in this role more efficiently are formulated.