

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

Том 16
2 + 2010

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ + ЗАСНОВАНО В ЛЮТОМУ 1995 р. + ВИХОДИТЬ 6 РАЗІВ ЗА РІК + КИЇВ

МАТЕРІАЛИ

Дев'ятої Української конференції
з космічних досліджень
31 серпня — 5 вересня 2009 р.

ЗМІСТ

Сумарук П. В., Сумарук Т. П. Сонячна активність і вікові варіації геомагнітного поля

Сумарук Т. П. Програмно-технічний комплекс забезпечення збору, обробки та збереження даних геомагнітних обсерваторій України

Голубничий П. І., Філоненко А. Д. Об оптимальном диапазоне частот в радиоастрономическом методе измерения потоков частиц сверхвысокой энергии

Шуєнко О. В., Козак Л. В., Івченко В. М. Швидкоплинні оптичні явища під час гроз та моделювання електричних полів у нижній атмосфері

Беляєв Б. І., Катковський Л. В., Крот Ю. А., Роговець А. В., Сосенко В. А., Хвалеї С. В., Хомицевич А. Д. Оптическая аппаратура для космического эксперимента «Диагностика»

Беляєв Б. І., Беляєв Ю. В., Домарацький А. В., Катковський Л. В., Крот Ю. А., Роговець А. В., Хвалеї С. В. Фото-спектральная система для космического эксперимента «Ураган»

CONTENTS

5 Sumaruk P. V., Sumaruk T. P. Solar activity and geomagnetic field secular variations

12 Sumaruk T. P. A program-technical complex for assemblage, processing, and storage of data from Ukrainian geomagnetic observatories

17 Golubnichiy P. I., Filonenko A. D. On the optimum frequency range in the radio-astronomical method for the measurement of streams of cosmic particles of ultrahigh energy

23 Shuyenko O. V., Kozak L. V., Ivchenko V. M. Transient luminous events during thunderstorms and the simulation of electric fields in the lower atmosphere

35 Belyaev B. I., Katkovskii L. V., Krot Yu. A., Rogovets A. V., Sosenko V. A., Khvalei S. V., Khomitsevich A. D. Optical equipment for the space experiment «Diagnostics»

41 Belyaev B. I., Belyaev Yu. V., Domaratskii A. V., Katkovskii L. V., Krot Yu. A., Rogovets A. V., Khvalei S. V. The photospectral system for the space experiment «Uragan»

- Фролов Г. А., Гамуля Г. Д., Колотило А. Д.* Модульный трибометр для исследования адекватности параметров трения в условиях орбитального полета и наземных лабораториях **49** *Frolov G. A., Gamulia G. D., Kolotilo A. D.* The modular tribo-meter for the investigation of adequacy of friction parameters under orbital flight and land laboratory conditions
- Котов Ю. Д., Юров В. Н., Архангельский А. И., Бессонов М. В., Буслов А. С., Власик К. Ф., Глянченко А. С., Кадиллин В. В., Лунарь Е. Э., Рубцов И. В., Тышкевич В. Г.* Спектрометр высокоэнергичных излучений «Наталья-2М». Первоначальное включение, проверка работоспособности и настройка на орбите КА КОРОНАС–ФОТОН **58** *Kotov Yu. D., Yurov V. N., Arkhangel'skii A. I., Bessonov M. V., Buslov A. S., Vlasik K. F., Glianenko A. S., Kadilin V. V., Lupar Ye. E., Rubtsov I. V., Tyshkevich V. G.* The high-energy radiation spectrometer Natalya-2M. Initial switching on, testing the operation and tuning in the orbit of the satellite CORONAS–PHOTON
- Кузьков В., Воловик Д., Кузьков С., Содник З., Пуха С.* Реалізація лазерних експериментів геостационарним супутником ЄКА ARTEMIS **65** *Kuz'kov V., Volovyk D., Kuzkov S., Sodnik Z., Pukha S.* Realization of laser experiments with ESA's geostationary satellite ARTEMIS
- Козировська Н. О., Заєць І. Є., Бурлак О. П., Рогоцький І. С., Митрохин О. В., Машковська С. П., Фоїнг Б.* Концепція вирощування першої генерації рослин у місячних оранжереях **70** *Kozyrovska N. O., Zaetz I. E., Burlak O. P., Rogutskyy I. S., Mytrokhyn O. V., Mashkovska S. P., Foing B. H.* The conception of growing the first generation-plants in lunar greenhouses
- Бурлак О. П., Лар О. В., Рогоцький І. С., Міхеев О. М., Заєць І. Є., де Вера Ж.-П., Данільченко Б. О., Фоїнг Б. Н., Козировська Н. О.* Бактерійний консорціум послаблює дію гамма-радіації низької дози в листових бруньках каланхоє **75** *Burlak O. P., Lar O. V., Rogutskyy I. S., Danilchenko B. A., Mikheev O. M., Zaets I. Ye., de Vera J.-P., Foing B. H., Kozyrovska N. O.* A bacterial consortium alleviating a low-dose gamma-irradiation effect in kalanchoe plantlets

НАШІ АВТОРИ

81 OUR AUTHORS

НОВИНИ КОСМІЧНИХ АГЕНТСТВ СВІТУ

84 NEWS FROM SPACE AGENCIES

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 1232 від 2 лютого 1995 р.

Підписано до друку 25.03.10. Формат 84×108/16. Папір крейдований. Гарн. Ньютон. Друк офсет.
Ум. друк. арк. 9,03. Обл.-вид. арк. 9,48. Тираж 150 прим. Зам. № 2650.

Оригінал-макет виготовлено та тираж видруковано Видавничим домом «Академперіодика» НАН України, 01004, Київ, вул. Терещенківська, 4

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001 р.

*13 квітня 2010 р.
виповнюється 75 років
академікові НАН України
Віталію Івановичу СТАРОСТЕНКУ*

*Редакційна колегія журналу
сердечно вітає Віталія Івановича з ювілеєм
і зичить йому міцного здоров'я та наснаги
для здійснення всіх його творчих задумів*

УДК 550.385

П. В. Сумарук, Т. П. Сумарук

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України, Київ

СОНЯЧНА АКТИВНІСТЬ І ВІКОВІ ВАРІАЦІЇ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Досліджено зміни вікових варіацій геомагнітного поля за даними середньоширотних обсерваторій «Львів», «Бельськ», «Ленінград». Показано, що короткоперіодні варіації генеруються зовнішніми джерелами і величина їх залежить від рівня сонячної і геомагнітної активності. Зроблено припущення, що деяка частина короткоперіодних варіацій генерується внутрішніми джерелами.

Динамічні процеси всередині Землі відображаються у вікових варіаціях (SV) геомагнітного поля [6]. SV-варіації — дуже складне природне явище, оскільки вони генеруються як внутрішніми, так і зовнішніми джерелами.

Як відомо, SV-варіації геомагнітного поля обчислюються як різниця між послідовними середньорічними значеннями складових поля та його напруженості. У роки високої сонячної та геомагнітної активності кількість магнітних бур збільшується. Головною особливістю магнітної бурі є розвиток у магнітосфері кільцевого струму, який тече на відстані 3–4 радіусів Землі від її поверхні і зосереджений в екваторіальній площині. Такий струм дає різке зменшення горизонтальної (H) складової на поверхні Землі, яке названо D_{st} -варіацією. На екваторі D_{st} -варіація максимальна і зменшується із збільшенням широти точки спостереження по закону косинуса. Величини D_{st} -варіації можуть набувати значень кількох сотень нанотесла. Таким чином, у роки високої сонячної активності середньорічні значення H -складової поля будуть меншими, ніж у роки низької сонячної активності. D_{st} -варіація спостерігається і у вертикальній (Z) складовій геомагнітного поля. Кільцевий магнітосферний струм дає збільшення Z -складової на полюсах Землі [9]. Ефект зменшується із зменшенням широти обсерваторії по закону синуса від нуля на екваторі до максимуму на полюсах. Таким чином, у роки високої сонячної активності, коли

кількість магнітних бур збільшується, середньорічні значення Z -складової на полюсах будуть більшими, ніж у роки низької активності. В середніх широтах з ростом сонячної активності середньорічні значення H -складової поля будуть зменшуватися, а Z -складової — збільшуватися. Із збільшенням широти обсерваторії ефект повинен підсилюватися.

Окрім магнітосферного кільцевого струму на величину компонентів поля впливають також авроральні іоносферні електрострумені та їхні струми розтікання у середні та низькі широти, які генерують магнітні суббурі. Та оскільки направлений на захід авроральний електрострум, який тече в опівнічні та ранкові години, генерує зменшення H -складової поля, а східний електрострум, який розвивається в денні та вечірні години, дає збільшення H -складової, то сумарний вплив авроральних електроструменів на величину H -складової на даній обсерваторії буде залежати від кількості суббур, які зареєстровані на даній обсерваторії у певні години місцевого часу.

Крім прямого впливу на величину SV магнітосферних та іоносферних струмів, який проявляється в глобальному масштабі, спостерігаються і регіональні зміни вікових варіацій. Особливо добре явище проявляється у вертикальній складовій поля. Регіональні зміни SV-варіацій пояснюються впливом індукованих струмів в підстильних поверхнях обсерваторій.

Взаємодія Землі з космічними полями веде до зміни ротаційного режиму Землі і відповідно

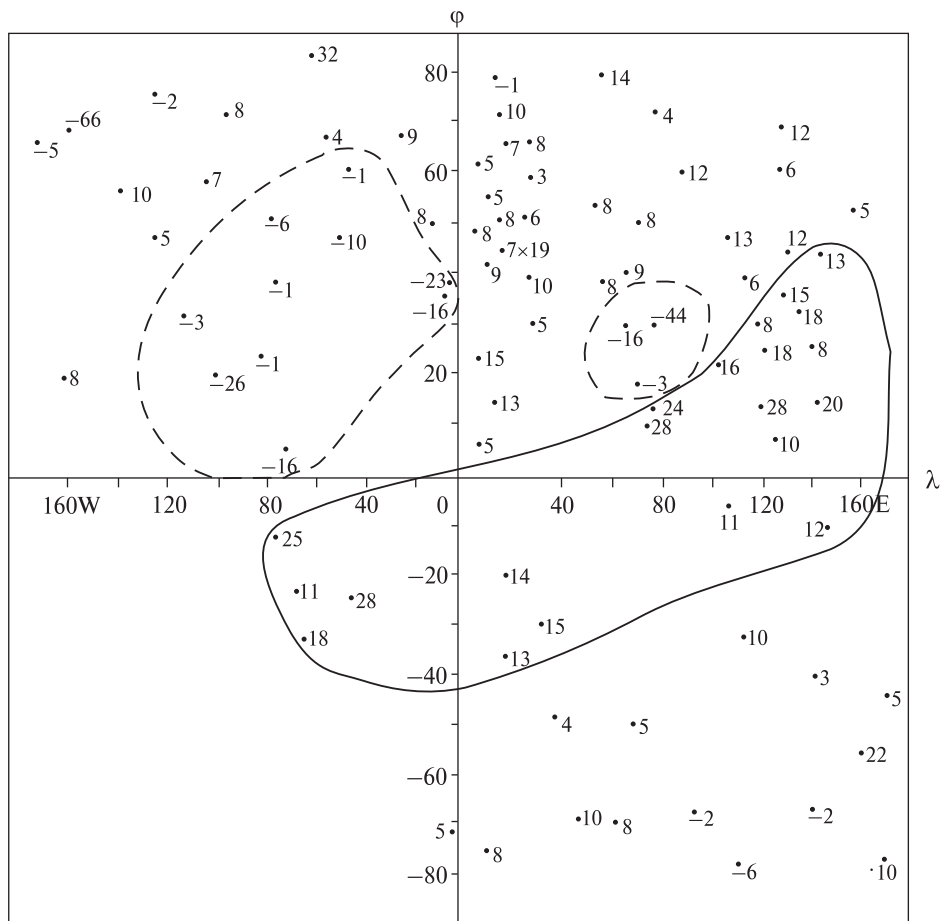
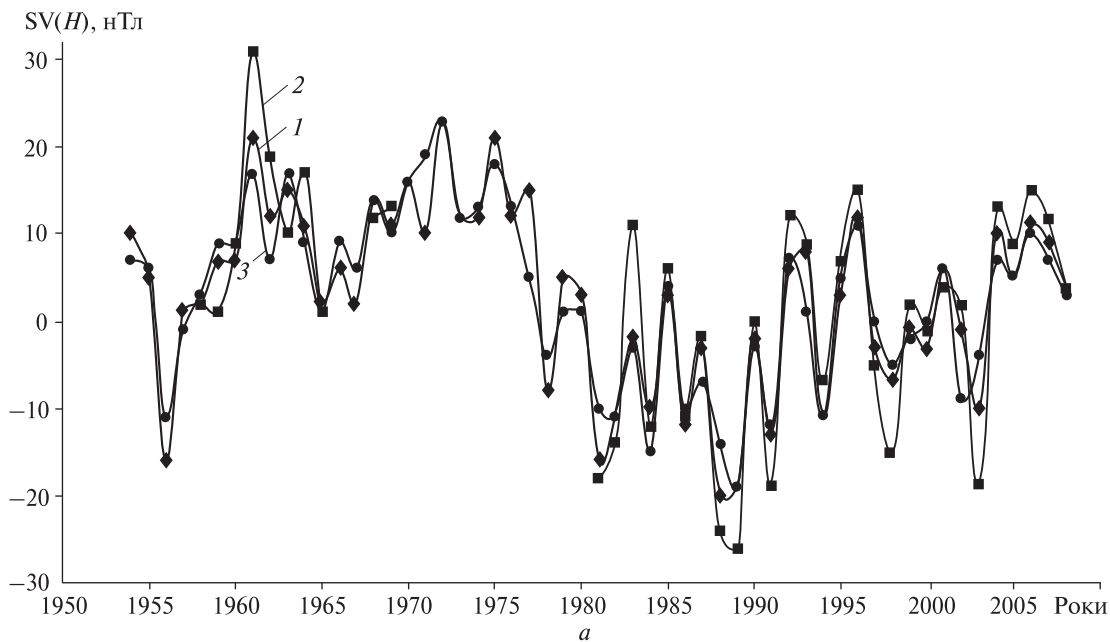


Рис. 1. Розподіл змін SV(H) на поверхні Землі в 1975 р. при $\Delta\Sigma K_p = -4.2$



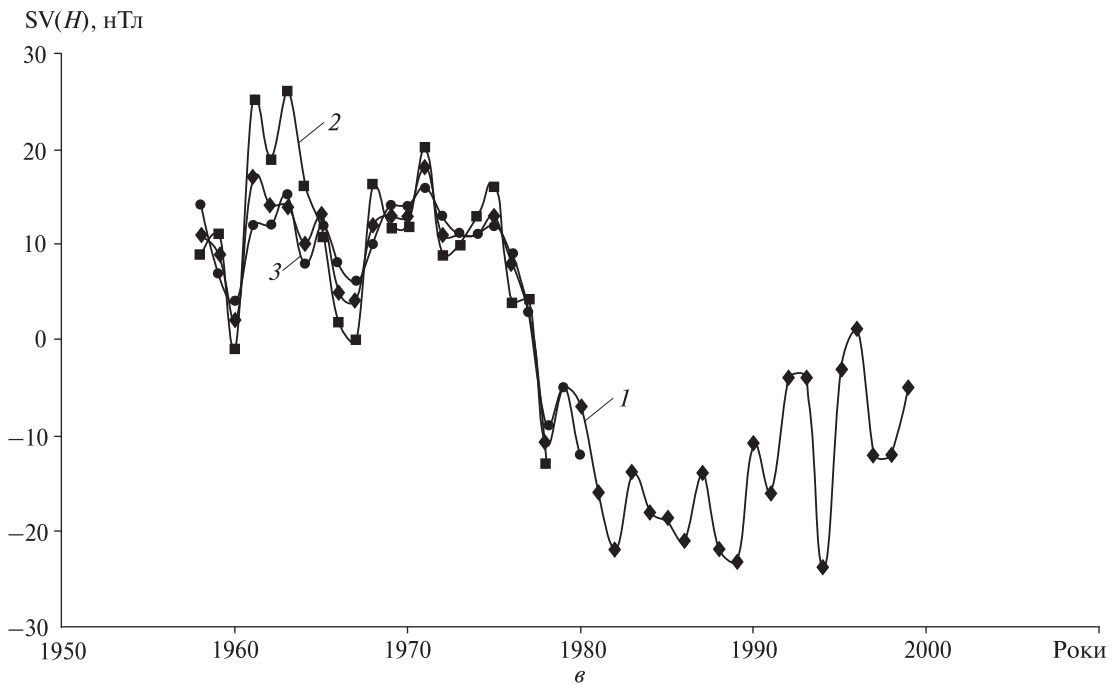
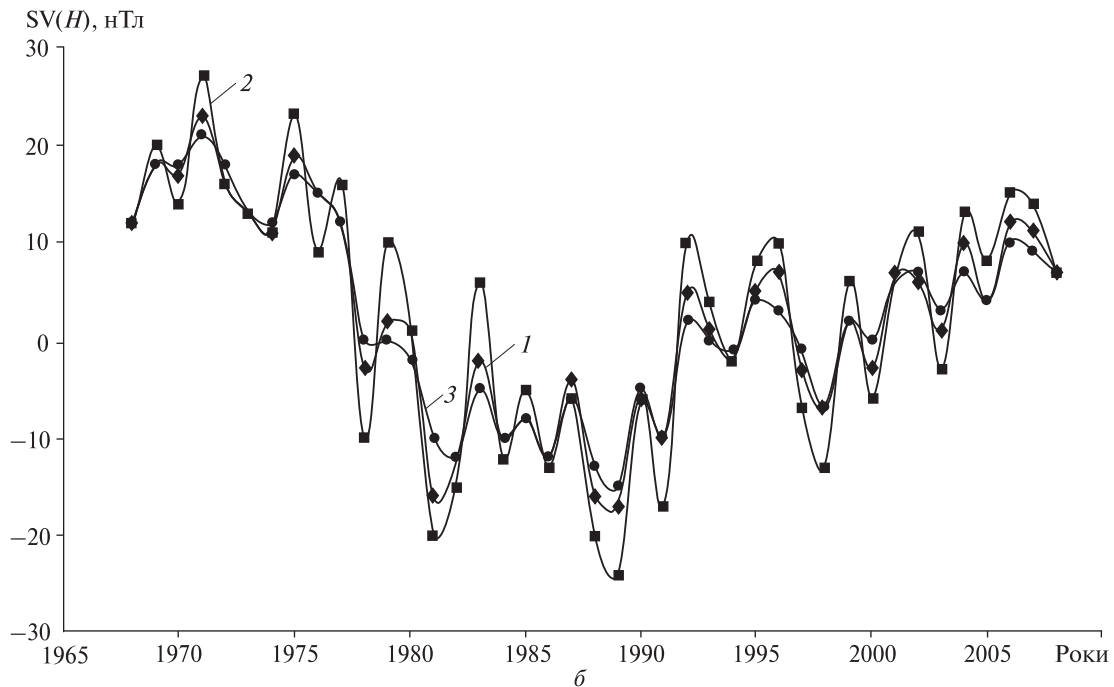
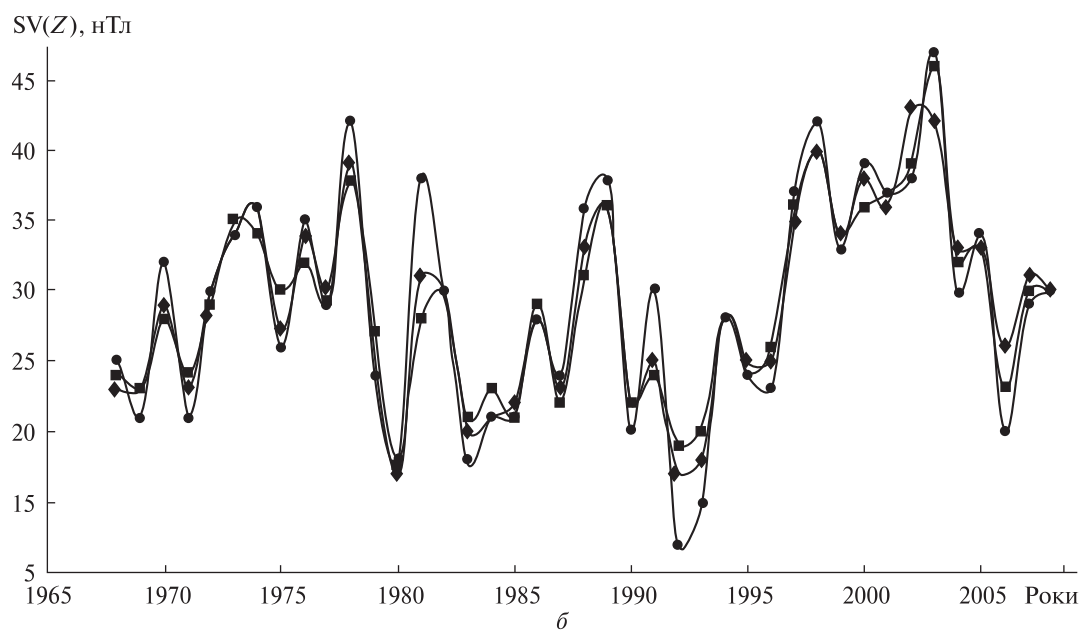
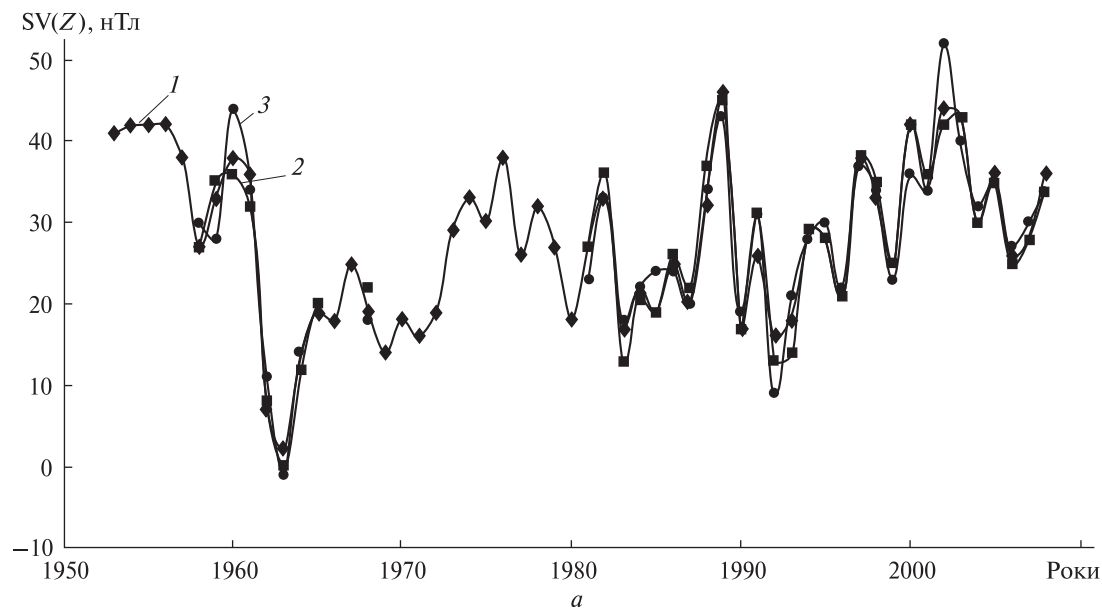


Рис. 2. Варіації $SV(H)$ на магнітних обсерваторіях «Львів» (а), «Бельськ» (б), «Ленінград» (в) по всіх днях (лінія 1), по спокійних днях (лінія 3), по збурених днях (лінія 2)



до зміни процесів, які генерують як магнітне поле Землі, так і його вікові варіації [4]. Зміна ротаційного режиму Землі виводить її із стану рівноваги (геоізостазії), а намагання відтворення ізоістазії, яка відповідає новому ротаційному режиму, веде як до виникнення і нагромадження планетарних напружень в тектоносфері [5], так і до зміни геомагнітного поля. Таким чином, можна припустити, що зовнішні поля впливають

і безпосередньо на величину SV-варіацій, і на внутрішні джерела, які генерують ці варіації.

Розділення SV на складові від зовнішніх і внутрішніх джерел дуже складна задача, оскільки вони змінюються як у часі, так і в просторі [8]. Вікові варіації мають періодичний характер; виділяються періоди від одного до кількох сотень років. Для визначення довгоперіодних складових ще немає надійних даних про хід елементів

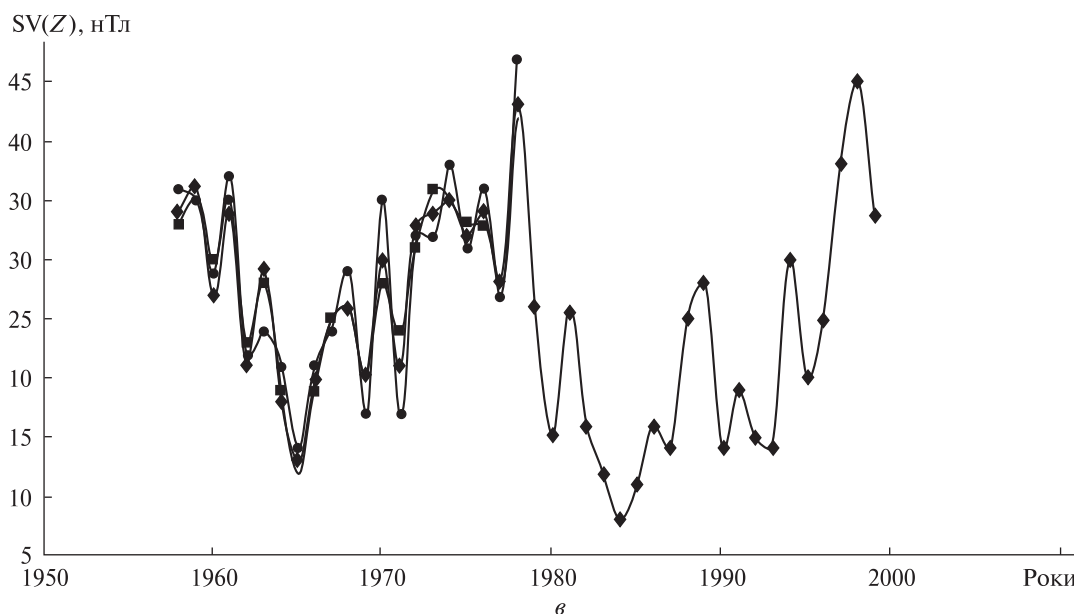


Рис. 3. Те ж для варіації $SV(Z)$

поля, бо регулярні спостереження поля ведуться лише кілька сотень років. Тому в даній роботі було досліджено тільки короткоперіодні варіації. Були використані середньорічні значення горизонтальної і вертикальної складових поля по всіх спокійних (Q) та збурених (D) днях за 1954—2008 рр., отримані на магнітних обсерваторіях «Львів» (LVV), «Бельськ» (BEL) та «Ленінград» (LNN). Географічні координати обсерваторій показані в таблиці. До 1978 р. дані опубліковані в роботі [1], а для наступних років — на сайті <http://www.geomag.bgs.ac.uk>.

На рис. 1 показано в географічних координатах розподіл змін $SV(H)$ на поверхні Землі в 1975 р. при різкому зменшенні геомагнітної активності (мінімум сонячної активності спостерігався в 1976 р.). Геомагнітна активність виражена середньою за рік добовою сумою K_p -індексу (ΣK_p). При $\Delta \Sigma K_p = -4.2$ на більшості середньопівнічних обсерваторій і в субавроральних зонах обох півкуль значення $\Delta SV(H)$ змінюються від 2 до 14 нТл (цифри біля точок, якими показано положення обсерваторій). Серед європейських обсерваторій виділяється румунська обсерваторія Сурларь (на рис. 1 відмічена хрестиком). Значення $\Delta SV(H)$ на цій обсерваторії значно більше, ніж на навко-

Магнітні обсерваторії та їхні координати

Назва	Код	Широта ϕ , град	Довгота λ , град
Ленінград	LNN	59.95	30.70
Бельськ	BEL	52.80	21.80
Львів	LVV	49.90	23.75

лишніх обсерваторіях (19 нТл). Можна виділити два регіони, де $\Delta SV(H) < 0$ при $\Delta \Sigma K_p < 0$, на рис. 1 вони окреслені штриховими лініями. Це північ Індостану та середньо- і низькоширотний район басейну Атлантичного океану. Найбільш імовірно, такі відхилення пов'язані з локальними особливостями підстильних поверхонь. Є велика область на поверхні Землі, в якій чутливість $\Delta SV(H)$ до змін $\Delta \Sigma K_p$ дуже велика. В 1975 р. значення $\Delta SV(H)$ у цій області змінюються від 11 до 28 нТл. На рис. 1 ця область окреслена суцільною лінією. Вона охоплює прибережні обсерваторії і обсерваторії, розміщені на островах, а також регіон Бразильської магнітної аномалії.

На рис. 2 показані зміни вікової варіації H -складової поля на магнітних обсерваторіях «Львів» (а), «Бельськ» (б) і «Ленінград» (в) від

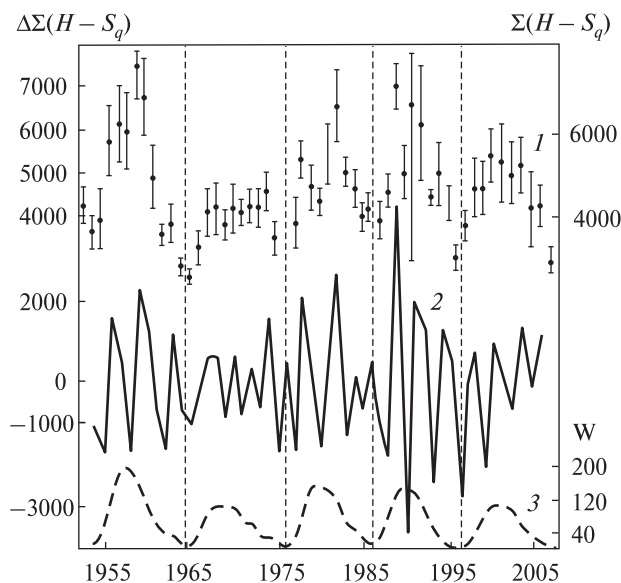


Рис. 4. Середньорічні значення $\Sigma(H - S_q)$ на обсерваторії «Львів» та їхня дисперсія (1), квазидворічні варіації (2) та числа Вольфа (3) за 1954—2006 рр.

1958 до 2008 рр. для всіх днів (лінія 1), спокійних днів (лінія 3) та збурених днів (лінія 2) кожного року. Можна бачити короткоперіодні та довгоперіодні варіації. Амплітуди короткоперіодних варіацій зростають від Ленінграда до Львова і найбільше — для збурених днів. Довгоперіодні варіації змінюються як квазисинусоїда для даного інтервалу часу. Для впевненого висновку про довгоперіодні варіації необхідні довгі ряди спостережень. В даний інтервал часу вкладається тільки одне коливання.

На рис. 3 показані вікові варіації вертикальної складової $SV(Z)$ на тих же обсерваторіях та за цей же інтервал часу, позначення ті самі. Амплітуди короткоперіодних $SV(Z)$ також більші для збурених днів, аніж для спокійних днів, причому для Львова явище виражене найкраще. Не спостерігається зростання амплітуд короткоперіодних $SV(Z)$ від Львова до Ленінграда. Очевидно, це пов'язано з тим, що різниця широт обсерваторій всього 10° . Порівняння рис. 2 і 3 показує, що $SV(H)$ і $SV(Z)$ змінюються у протифазі, крім того, можна побачити квазидворічні варіації.

Квазидворічні варіації виявлені у варіаціях геомагнітного поля в середніх широтах [3]. На

рис. 4 взятому з роботи [3], показано середньомісячні значення суми $\Sigma(H - S_q)$ відхилень горизонтальної складової поля за дані роки на магнітній обсерваторії «Львів» від спокійного рівня поля з їхнім стандартним відхиленням (фрагмент 1) за 1954—2006 рр. За спокійний рівень S_q взято добовий хід цієї ж складової, усереднений по п'яти міжнародно-спокійних днях за кожен місяць. Крива 2 — квазидворічні варіації активності $\Delta\Sigma(H - S_q)$, обчислені по методиці [7]. Крива 3 показує зміну середньорічних чисел Вольфа.

Порівняння рис. 2 і 4 показує, що $SV(H)$ та $\Delta\Sigma(H - S_q)$ змінюються у протифазі і добре корелюють. Це дає підставу говорити, що короткоперіодні зміни вікової варіації пов'язані із сонячною, а значить і з геомагнітною активністю. Однак у роботі [2] вказується, що квазіперіодичні флуктуації швидкості вікового ходу дипольного поля — це проявлення коливань в структурі систем струмів, які генерують дипольне поле. Таким чином, однозначно сказати, що короткоперіодні варіації SV генеруються тільки зовнішніми джерелами, не можна. Напевне, в їхній генерації беруть участь і внутрішні джерела, на які впливають зовнішні чинники.

ВИСНОВКИ

Спостерігаються короткоперіодні та довгоперіодні вікові варіації геомагнітного поля Землі, пов'язані з сонячною активністю. Для впевненого висновку про зв'язок довгоперіодних SV -варіацій із сонячною активністю необхідні довгі часові ряди спостережень.

Амплітуди короткоперіодних $SV(H)$ -варіацій найбільші для D -днів, а також зростають із зменшенням широти обсерваторії. Амплітуди $SV(Z)$ -варіацій також максимальні для D -днів. Варіації $SV(H)$ та $SV(Z)$ змінюються у протифазі.

На прибережних та островних обсерваторіях, а також в районі магнітних аномалій, явище залежності SV -варіацій від сонячної активності підсилюється.

Збіг по фазі короткоперіодних SV , обчислених по спокійних і збурених днях, показує, що в їхній генерації беруть участь і внутрішні джерела.

1. Головков В. П., Коломийцева Г. И., Коняшенко Л. П., Семенова Г. М. Каталог среднегодовых значений элементов геомагнитного поля мировой сети магнитных обсерваторий. — М.: ИЗМИРАН, 1983. — Вып. 16. — 342 с.
2. Ладьнин А. В., Попова А. А. Квазипериодические флуктуации скорости векового хода геомагнитного поля по данным мировой сети обсерваторий за 1985—2005 гг. // Геология и геофизика. — 2008. — **49**, № 12. — С. 1262—1273.
3. Сумарук П. В., Сумарук Т. П. Квазідворічні варіації магнітного поля Землі в середніх широтах // Доп. Національної академії наук України. — 2009. — № 1. — С. 114—116.
4. Тяпкин К. Ф. Новая ротационная модель магнитного поля Земли // Геофиз. журн. — 1996. — **18**, № 1. — С. 30—37.
5. Тяпкин К. Ф. Достижения кафедры геофизических методов разведки Национального горного университета в области науки и образования за последние 10 лет (1998—2008) // Геофиз. журн. — 2009. — **31**, № 3. — С. 146—154.
6. Яновский Б. М. Земной магнетизм. — Л.: Изд-во Ленинград. ун-та., 1978. — 592 с.
7. Ivanov-Kholodny G. S., Chernoprud V. Ye. Analysis of the extrema of quasi-biennial variations of the solar activity // Astron. Trans. — 1992. — **3**, N 1. — P. 81—84.
8. Manda M. How well is main — field secular variations known? // Contribs Geophys. and Geodesy. — 2001. — **31**, N 1. — P. 233—243.
9. Sumaruk P. V., Feldstein Ya. I., Porchkhidze Ts. Geomagnetic variation at geomagnetic poles // Phys. Solariterrestris. — 1980. — N 2. — P. 70—78.

Надійшла до редакції 01.10.09

P. V. Sumaruk, T. P. Sumaruk

SOLAR ACTIVITY AND GEOMAGNETIC FIELD SECULAR VARIATIONS

Some changes of the geomagnetic secular variations are investigated from data obtained at the middle-latitude magnetic observatories «Lviv», «Belsk», and «Leningrad». It is shown that short-period variations are generated by external sources and the values of these variations depend on the solar and geomagnetic activities. It is suggested that some part of the short-period variations is generated by internal sources.

УДК 551.510; 550.380.8

Т. П. Сумарук

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України, Київ

ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИЙ КОМПЛЕКС ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗБОРУ, ОБРОБКИ ТА ЗБЕРЕЖЕННЯ ДАНИХ ГЕОМАГНІТНИХ ОБСЕРВАТОРІЙ УКРАЇНИ

Приведено характеристики приладів для точних вимірювань абсолютних значень напруженості магнітного поля Землі та його складових на геомагнітних обсерваторіях України згідно з вимогами INTERMAGNET. Описано методику вимірювань та подано схему обробки та збору результатів для створення банку даних спостережень геомагнітних обсерваторій України.

Основну роль в дослідженні геомагнітного поля Землі відіграють геомагнітні обсерваторії. Першу сітку геомагнітних обсерваторій було створено ще на початку 19 століття. Основна функція обсерваторій — давати високоточні значення елементів магнітного поля Землі і їхні неперервні зміни в часі в даному місці. Дані, які отримують геомагнітні обсерваторії, широко використовуються в різних галузях науки і техніки, зокрема при вивченні сонячно-земних зв'язків, космічних дослідженнях, пошуках корисних копалин, геофізичній екології та ін.

В Україні є три геомагнітні обсерваторії Інституту геофізики НАН України «Київ», «Львів», «Одеса», які розпочали свою роботу ще на початку 20 століття і ведуть неперервний запис елементів магнітного поля Землі. Крім цього, Україна провадить комплекс неперервних геофізичних досліджень в Антрактиді на обсерваторії «Академік Вернадський». Спостереження за змінами геомагнітного поля періодично ведуть також близько десяти установ Національної академії наук та галузевих інститутів.

Координація діяльності світової сітки обсерваторій виконується Міжнародною асоціацією з геомагнетизму і аерономії IAGA, що входить у склад Міжнародного геодезичного та геофізичного союзу IUGG. Обсерваторії, які

досягли якості рівня даних до вимог міжнародних стандартів, входять до міжнародної сітки INTERMAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network). В даний час INTERMAGNET нараховує понад 100 обсерваторій, серед яких обсерваторії «Львів» та «Академік Вернадський». Членство геомагнітної обсерваторії «Київ» вирішується в даний час.

З розвитком наукових досліджень та поставлених прикладних задач підвищуються вимоги до якості спостережень на обсерваторіях, відповідно і підвищуються вимоги до технічних характеристик приладів, що використовуються. Якщо декілька десятиріч тому точність вимірювання елементів геомагнітного поля становила 5–10 нТл [1], то на даний час вона становить 0.1–1 нТл.

При виконанні спостережень на обсерваторіях використовують два типи приладів: варіаційні та абсолютні. До варіаційних приладів належать магнітоваріаційні станції (МВС). На українських обсерваторіях працює два типи МВС. Перший: МВС побудовані на торсійних фотоелектричних датчиках системи Боброва (PSM) виробництва Інституту геофізики Польської академії наук, другий — МВС з трьохкомпонентним ферозондовим датчиком (LEMI) виробництва Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук України. Технічні характеристики станцій подано нижче.

Технічні характеристики LEMI–008

Діапазон вимірювань магнітного поля по цифровому індикатору	± 65000 нТл
Роздільна здатність по цифровому індикатору	0.1 нТл
Діапазон вимірювань варіацій магнітного поля (після компенсації)	± 2600 нТл
Роздільна здатність при вимірюванні варіацій	0.01 нТл
Діапазон вимірювань по аналоговому виходу	± 500 нТл
Коефіцієнт перетворення по аналоговому виходу	10 мВ/нТл
Температурний дрейф	< 0.2 нТл/°С
Ширина смуги частот на аналоговому виході	0—1 Гц
Рівень шуму на аналоговому виході у смузі частот 0.03—1 Гц	< 10 пкТл
Похибка неортогональності магнітних осей	< 30°
Діапазон автоматичної установки компенсаторного поля по кожній складовій	±65000 нТл
Об'єм внутрішньої FLASH-пам'яті	8 МБ
Цифровий вихід	RS-232

GPS-синхронізація та визначення координат

Діапазон робочих температур	-5...+40 °С
Роздільна здатність давачів температури	1 °С
Живлення	12 В; 0.15 А
Вага давача з підставкою	3.0 кг
Вага електронного блоку	1.5 кг
Довжина з'єднувального кабеля	5 м

Технічні характеристики PSM–8411

Максимальна чутливість	3 пТл
Величини реєстрації магнітного поля:	
Х-складова	10000 — 30000 нТл
У-складова	-10000...+10000 нТл
Z-складова	30000 — 60000 нТл
Лінійність перетворення	< 0.05 %
Чутливість до перехилень	< 10 нТл/мінуту
Термічний коефіцієнт	0.25 нТл/град
Максимальна потужність	12 Вт
Робоча температура	0 °С ... +40 °С
Час дискретності	1 с — 1 год

Основною характеристикою роботи МВС є стабільність їхніх базових ліній або нульового рівня. Згідно з вимогами INTERMAGNET [3] вони повинні змінюватися не більше ніж на 5 нТл за рік.

Багато факторів впливають на стабільність баз, зокрема:

- стабільність постаменту під МВС,
- стабільність температури павільйону,
- стабільність вологості,
- наявність зовнішніх завад (близькість до ліній електропередач, магнітних предметів тощо).
- внутрішні фактори, пов'язані безпосередньо з МВС.

Суттєвим у цьому випадку є розміщення МВС. Вибирається місце, максимально віддалене від густонаселеної території, ліній електропередач, електричних залізничних ліній постійного струму та промислових підприємств. Враховуються також найближчі аномалії земної поверхні (градієнт поля в даній точці повинен бути мінімальним) [4].

Що стосується роботи МВС (PSM та LEMI) при виконанні перелічених вище умов, стабільність баз відповідає вимогам INTERMAGNET до роботи геомагнітних обсерваторій.

Дані з МВС фільтруються за допомогою цифрового фільтра Гауса і записуються на цифровому носії. У випадку LEMI — це flash-пам'ять, у випадку PSM — цифровий мікропроцесорний реєстратор DR-02. Цифрові реєстратори DR-02 мають 16-бітні бінарні перетворювачі, внутрішню пам'ять, що підтримується батареєю на випадок відімкнення зовнішнього джерела, годинник часу реєстрації, роз'єми для з'єднання з комп'ютером RS-232 та вихід для з'єднання з радіогодинником для неперервної корекції часу реєстрації з точністю до 1 с. Зчитування інформації відбувається автоматично із заданою дослідником частотою (від 1 с до 1 год).

Принцип роботи апаратури показано на рис 1.

Магнітометри, реєстратор, радіогодинник та комп'ютер, що збирає та перетворює геомагнітні дані, підключені до автономної системи живлення, що дозволяє працювати приладам після зникнення напруги 220 В в мережі до декількох місяців.

Окрім того, запас пам'яті МВС та незалежні блоки живлення дозволяють використовувати дані станцій у польових умовах (для геологічних пошуків, на пунктах вікового ходу та інше). МВС працюють на обсерваторіях неперервно.

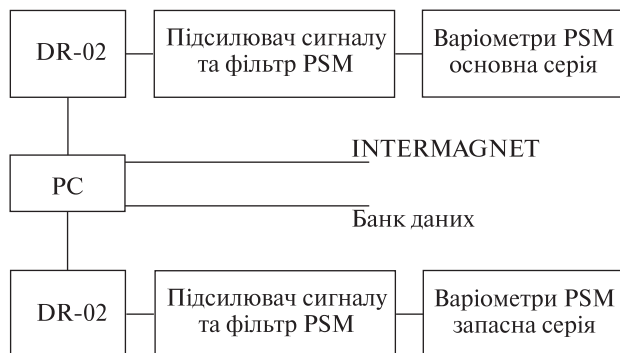


Рис. 1. Схема цифрової реєстрації та обробки даних на геомагнітній обсерваторії «Львів»

До абсолютних приладів належать магнітометри DI-fluxgate та протонні магнітометри. Магнітометри DI-fluxgate складаються з двох частин:

1) немагнітного теодоліта. На українських обсерваторіях це TAVISTOCK, ZEISS, ЗТК2КП та блок електроніки. Роздільна здатність та похибка вимірювання теодолітів складає 1" (технічні характеристики подано нижче).

2) протонні магнітометри, що вимірюють абсолютну величину повного вектора поля з точністю 0.1 нТл.

Технічні характеристики магнітометра DI-fluxgate TAVISTOCK

Межі вимірювань	±200 нТл
Точність вимірювань	0.1 нТл
Дрейф нуля (12–13.5 В)	<0.2 нТл
Дрейф нуля (–5...+40 °С)	<0.2 нТл
Смуга пропуску	0–3 Гц
Рівень шумів	<0.1 нТл пік-пік при 0–3 Гц

Для передачі даних спостережень обсерваторія повинна бути обладнана неперервним зв'язком з МЦД (бажано через інтернет).

Комплект апаратури сучасної обсерваторії повинен відповідати таким вимогам [2]:

Магнітно-варіаційна станція

Роздільна здатність	0.1 нТл
Динамічний діапазон (для середніх широт)	±60000 нТл
Частотний діапазон вимірів	0–0.1 Гц
Частота читування даних	1 Гц
Температурні коефіцієнти	<0.025 нТл/°С
Дрейф базисних ліній	<5 нТл/рік

<i>Протонний магнітометр</i>	
Роздільна здатність	0.1 нТл
Похибка вимірювань	1 нТл
<i>Магнітометр DI-fluxgate</i>	
Точність вимірювання	1"
Точність часової прив'язки даних	5 с/міс

Для визначення абсолютних значень поля на обсерваторіях проводяться абсолютні спостереження. Для цього використовують магнітометри DI-fluxgate та протонні магнітометри для обчислення повного вектора поля T . За допомогою DI-магнітометра визначають схилення D (кут між геомагнітним та північним меридіанами) та нахилення I (нахил повного вектора поля до прямої, перпендикулярної до горизонту). Є дві методики обчислення D та I :

- 1) метод малих відхилень;
- 2) метод обнулення.

Методику проведення абсолютних вимірювань подано в роботі [2].

Для визначення D використовують так звану «міру». Міра — це точка, для якої точно визначено географічний азимут. Азимут міри визначається за допомогою астрономічних методів.

За відомими абсолютними значеннями D , I , T можна обчислити значення всіх складових поля.

Якість абсолютних спостережень також визначається часом їхнього проведення. Окрім того, на якість спостережень впливає кваліфікація персоналу. Абсолютні вимірювання проводяться з точністю до 1". Для досягнення такої точності необхідно при обчисленні абсолютних значень поля враховувати редукцію (величину зміни поля протягом часу вимірювань). Для того щоб зменшити редукцію, абсолютні спостереження повинні проводитись в магнітно-спокійні дні, але не рідше трьох разів у тиждень.

Отримавши абсолютні виміри, обчислюють бази для МВС за формулою:

$$B_A = A - \varepsilon_A(\alpha - 32768) + q(t - t_0),$$

де A — величина абсолютних спостережень (нТл), ε_A — чутливість величини для варіаційного запису (нТл/біт), α — стала запису (біт), q — термічний коефіцієнт варіометра (нТл/°С), t — температура вимірювань (°С), t_0 — температура, для якої термічний коефіцієнт дорівнює нулю.

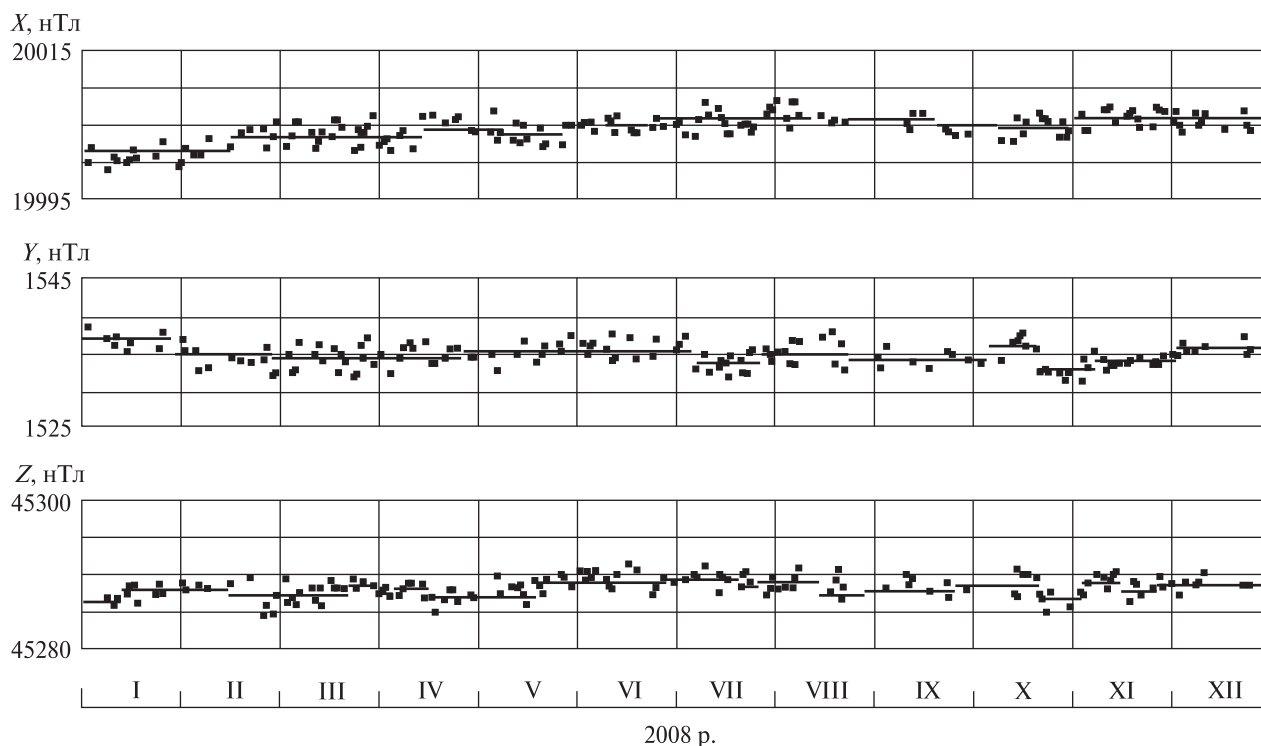


Рис. 2. Базисні значення за 2008 р. для МВС геомагнітної обсерваторії «Львів»

Маючи базову лінію для кожної МВС та величину варіації, отримують абсолютне значення всіх складових та повного вектора поля у будь-який момент часу у вигляді цифрових файлів заданого формату. Для МВС геомагнітної обсерваторії «Львів» базисні значення за 2008 р. подані на рис. 2.

Важливим етапом у процесі геомагнітних спостережень є перевірка отримуваних даних. При отриманні даних з двох МВС рахують різницю величин кожної складової поля. У випадку сталої різниці дані – якісні, в іншому випадку потрібно шукати причину помилки. Середньорічні значення складових поля повинні відповідати величині вікового ходу (різниця середньорічних значень) цих елементів. При дотриманні всіх вимог похибка вимірювань складає не більше 1 нТл для кожної складової геомагнітного поля.

Після перевірки оброблених даних цифрові файли направляються в МЦД (Едінбург, Париж) для збереження та опублікування (видаються на CD-ROM).

Програмно-технічне забезпечення первинної обробки цифрових даних включає такі етапи [2]:

- 1) підготовка файлу миттєвих значень (провірка та редагування миттєвих значень);
- 2) створення добового файлу миттєвих значень в одиницях вимірювань магнітного поля і температури (редукція, введення поправок);
- 3) створення добового файлу хвилиних значень відповідно до вимог INTERMAGNET.

З метою покращення роботи геомагнітних обсерваторій та доведення якості даних до вимог INTERMAGNET в Інституті геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України розробляється програмно-технічне забезпечення збору, обробки та збереження геомагнітних даних. Проводиться систематизація та приведення даних до одного формату, перевірка правильності даних, обрахунок базових значень магніто-варіаційних станцій, отримання абсолютних значень даних всіх складових геомагнітного поля Землі, побудова вікового ходу для всіх елементів геомагнітного поля кожної геомагнітної обсерваторії, порівняння з віковим ходом інших обсерваторій та міжнародною моделлю IGRF. Закладається база для створення банку даних спостережень геомагнітних обсерваторій

України, що дасть можливість отримати оперативний доступ до геофізичної інформації, необхідної для вирішення наукових та прикладних задач.

1. Белоусова М. А. Контроль материалов наблюдений геомагнитной обсерватории. — М.: ИЗМИРАН, 1957. — 29 с.
2. Нечаев С. А. Руководство для стационарных геомагнитных наблюдений. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2006. — 139 с.
3. INTERMAGNET. Technical Reference Manual. Ver. 4.4, British geological survey, 2008. — 94 p.
4. Jankowski J., Sucksdorf C. Guide for magnetic measurements and observatory practice. — Warszawa: Publ. IAGA, 1996. — 235 p.

Надійшла до редакції 01.10.09

T. P. Sumaruk

A PROGRAM-TECHNICAL COMPLEX FOR ASSEMBLAGE, PROCESSING, AND STORAGE OF DATA FROM UKRAINIAN GEOMAGNETIC OBSERVATORIES

We give the characteristics of the instruments for precise measurements of absolute values of the geomagnetic field intensity and its components at the Ukrainian geomagnetic observatories according to INTERMAGNET requirements. The measurement procedure is described. A scheme for the processing and assemblage of measurement results for the creation of the geomagnetic data bank of Ukrainian geomagnetic observatories is presented.

УДК 537.591

П. И. Голубничий, А. Д. Филоненко

Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Луганськ

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ В РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКОМ МЕТОДЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ СВЕРХВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

Обчислено модельний енергетичний спектр радіоімпульсу, викликаного каскадною зливою у місячному реголіті. Враховано поперечні розміри зливи та неоднорідний розподіл надлишкових електронів по радіусу диска. В області високих частот спектр радикально відрізняється від отриманих раніше спектрів. Область максимальної інтенсивності припадає на інтервал 500–600 МГц. В діапазоні частот 1.6–2.3 ГГц інтенсивність випромінювання падає на кілька порядків, чим можна пояснити негативні результати попередніх спроб реєстрації z^0 -спалахів.

ВВЕДЕНИЕ

В основе радиоастрономического метода регистрации космических частиц сверхвысокой энергии лежит эффект Аскарьяна, заключающийся в образовании избыточного отрицательного заряда в каскадном ливне, сопровождающем прохождение частицы ультравысокой энергии через вещество [1]. Избыток электронов в ливне, согласно этому эффекту, вызван аннигиляцией позитронов с электронами, входящими в состав атомов среды. Движение избыточного отрицательного заряда со скоростью, превышающей скорость света в среде, является причиной радиоэмисии в широком диапазоне частот [2]. В последующие за этим открытием годы было проведено множество экспериментальных исследований радиоизлучения атмосферных ливней, краткий обзор которых приведен в работе [10]. В работе [7] приводятся оценки, доказывающие возможность наблюдения электромагнитного импульса, вызванного каскадом от частицы сверхвысокой энергии на поверхности Луны. Для этого необходима антенна с большой эффективной площадью, например радиотелескоп. При энергии частиц более 10^{20} эВ должно наблюдаться около 10^5 событий в год. Очевидно,

этот метод может открыть новый этап в исследовании частиц столь высокой энергии.

Первая попытка измерения потока космических лучей радиоастрономическим методом приведена в работе [15]. Для регистрации радиоимпульсов была использована 64-м антенна радиотелескопа. Диапазон частот составлял 1175–1675 МГц. При ожидаемой скорости счёта событий 1 частицы за 30 мин в эксперименте не было зарегистрировано ни одного импульса, который был бы засчитан как истинный.

В более оснащённом эксперименте [13] были использованы две антенны диаметром 70 м на диапазон радиочастот 1.6–1.7 ГГц и диаметром 34 м для диапазона частот 2.2–2.3 ГГц, разнесённые на 22 км. Включение их в схему совпадений с помощью оптоволоконной линии должно было понизить скорость счёта техногенных помех на несколько порядков. Общее время наблюдения составило около 12 ч. Однако, как и в предыдущем случае, событий с признаками ожидаемых радиоимпульсов не обнаружено. В повторном эксперименте [14] на усовершенствованном оборудовании в течение 120 ч также не было обнаружено ни одного радиоимпульса с нужными характеристиками.

Последней попыткой зарегистрировать радиоимпульс от каскадного ливня в лунном реголите была работа, выполненная на радиотелес-

копе диаметром 64 метра в Калязино (Россия) [4]. Наблюдения велись на частотах 0.6, 1.4, 2.3 ГГц в течение 32 ч. Как и в предыдущих случаях, результат эксперимента отрицательный.

С целью определения оптимальных частот для детектирования радиоимпульса в настоящей работе исследован радиочастотный спектр от каскадного ливня в лунном грунте с характерной энергией порядка 10^{22} эВ. Исследования показали сильную зависимость амплитуды измеряемого радиосигнала от выбранной частоты и ориентации диаграммы излучения относительно прямой наблюдения.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР РАДИОИМПУЛЬСА

Пусть $\mathbf{A}(\mathbf{r}, \omega)$ — фурье-компонент векторного потенциала поля излучения каскадного ливня, вызванного током $\mathbf{j}(\mathbf{r}', t)$ избыточных электронов, долю которых от общего числа частиц обозначим как η . Сюда входят избыток, являющийся следствием аннигиляции позитронов ливня с атомными электронами среды, а также δ -электроны, т. е. электроны, выбитые из оболочек атомов частицами ливня. Такие электроны имеют энергию, достаточную для ионизации нейтральных атомов [5, 6]. Согласно [8] имеем

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, \omega) = \frac{\mu_0 e^{iknr}}{4\pi r} \int_V \mathbf{j}(\mathbf{r}', \omega) e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}'} dV', \quad (1)$$

где \mathbf{r}' — радиус-вектор элемента пространства dV' , $\mathbf{k} = \omega \mathbf{r} / cr$ — волновой вектор, $n = 1.7$ — показатель преломления среды и \mathbf{r} — радиус-вектор точки наблюдения. Элементарная площадка dS каскадного диска содержит заряд $dq(t)$, равный $N(t)e\eta\sigma(\rho)dS$, где $N(t)$ — текущее число частиц в ливне и $\sigma(\rho)$ — нормированная на единицу функция распределения частиц в диске в зависимости от расстояния ρ до его центра. Плотность тока элементарного заряда dq выразим с помощью δ -функции $d\mathbf{j}(\mathbf{r}', t) = dq\mathbf{v}\delta[\mathbf{r}' - \mathbf{r}_0(t)]$, где $\mathbf{r}_0(t)$ — траектория движения элемента dS . Фурье-компонент плотности тока соответственно равен

$$d\mathbf{j}(\mathbf{r}', \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{v} dq \delta[\mathbf{r}' - \mathbf{r}_0(t)] e^{i\omega t} dt. \quad (2)$$

Если наблюдатель расположен под углом θ к оси

ливня, то расстояние r от наблюдателя до элемента dS зависит от его положения на диске.

С достаточной степенью точности для описания поля излучения каскадную функцию представим в виде

$$N(\xi) = N_0 e^{-\left(\frac{\chi - \chi_{\max}}{\alpha}\right)^2}, \quad (3)$$

где N_0 — число частиц в максимуме ливня, χ — относительная глубина проникновения ливня в среду (отношение глубины в единицах $\text{г}/\text{см}^2$ к величине лавинной единицы z_0); χ_{\max} — глубина максимальной стадии и α — величина, связанная с характерной длиной ливня. Скорость каскадного диска в веществе близка к скорости света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с в вакууме. Типичный для частиц лоренц-фактор в лавине составляет $\gamma \sim 50$, а безразмерная скорость соответствует $\beta = v/c \approx 0.9998$. Абсолютное значение скорости частиц практически всегда больше, чем скорость электромагнитных волн в среде. Выражение (3) не только качественно, но и количественно отображает реальную зависимость числа частиц от времени. Далее будем рассматривать электромагнитный каскад с характерной энергией первоначальной частицы $W_0 = 10^{22}$ эВ. Он распространяется в среде, имеющей плотность $1.7 - 1.8$ $\text{г}/\text{м}^3$, критическую энергию $W_{cr} = 45$ МэВ, величину радиационной единицы $z_0 \approx 0.14$ м и безразмерный параметр $\alpha \approx 10$. Такие величины характерны для каскада в лунном реголите. Сравнение (3), например, с приближением Нишимуры-Каматы показывает отклонение не более чем на несколько процентов для различных параметров функции. Это вполне достаточно для правдоподобного описания спектра радиоизлучения.

Далее учтём запаздывание электромагнитного поля, излучаемого каждым элементарным зарядом, а затем найдём результирующее поле в точке наблюдения. Для описания распределения плотности зарядов $\sigma(\rho)$ в каскадном диске известно приближение Нишимуры-Каматы:

$$\sigma(\rho) \sim (x+1)^{-3.5} x^{-1}, \quad (4)$$

где $x = \rho / \rho_1$, а $\rho_1 = \sqrt{\langle \rho^2 \rangle}$ — средний квадратичный радиус диска. Очевидно, что в центре ($\rho = 0$) плотность зарядов стремится к бесконечности, и

эта функция не может быть использована. По своему смыслу она должна описывать плотность на расстояниях $x > 1$ [11]. Учитывая случайный характер рассеяния частиц, можно предположить нормальный закон распределения, нормированный на единицу в максимуме ливня [3]:

$$\sigma(\rho) = \frac{e N(\chi)}{2\pi\rho_1^2} e^{-\frac{\rho^2}{2\rho_1^2}}. \quad (5)$$

При значении радиуса, равном ρ_1 , окружность охватывает приблизительно половину частиц.

На верхней части рис. 1 условно показана проекция диска в виде прямой AB с центром в точке O ; OD — направление движения. Линия наблюдения EF (направление излучения) составляет угол θ с направлением скорости диска. Каждый участок диска является элементарным излучателем. В нижней части рисунка показан вид на диск сверху. Будем считать, что наблюдатель находится бесконечно далеко (по сравнению с продольным размером ливня) от источника излучения. На нижней части рисунка прямая AB и все другие прямые, параллельные ей и лежащие на диске, являются проекциями направления наблюдения на плоскость этого диска. В этом случае все участки полосы GK , расположенной перпендикулярно к направлению EF (или AB), в точке наблюдения имеют одну фазу. Это позволяет рассмотреть всю такую полосу как точечный источник излучения, расположенный в некоторой точке ξ на прямой AB . Заряд всей полосы q_b согласно заданному распределению (5) будет равен

$$q_b = \frac{e N(t)\xi d\xi}{2\rho_1^2\sqrt{\pi}} \left(\frac{\xi^2}{2\rho_1^2}\right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{\xi^2}{2\rho_1^2}} = e N(t)F(\xi), \quad (6)$$

где $N(t)$ — каскадная функция. Фактически источником излучения теперь является не диск, а бесконечно тонкая и бесконечно длинная прямая, совпадающая с направлением AB , заряды на которой распределены в соответствии с (6).

Запишем далее векторный потенциал (1), создаваемый бесконечно малым элементом $d\xi$, несущим зарядом q_b (6) со скоростью \mathbf{v} . Фурье-компонент тока, соответствующего этому элементу, выразим через δ -функцию:

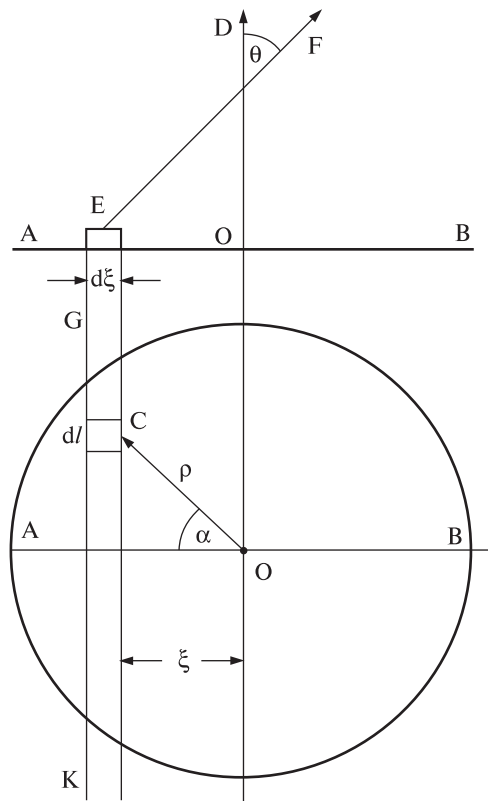


Рис. 1. Каскадный диск в двух проекциях

$$\begin{aligned} d\mathbf{j}(\omega) &= \mathbf{v}q_b \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\mathbf{r}' - \mathbf{r}) e^{i\omega t} dt = \\ &= \mathbf{v}q_b \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x' - \xi) \delta(z' - vt) \delta(y') e^{i\omega t} dt, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\mathbf{r} = \mathbf{m} \cdot \xi + ct \cdot \mathbf{n}$ — траектория движения элемента, т. е. вертикальная прямая, параллельная \mathbf{v} и проходящая через точку ξ , причём, $z = vt$. Начало координат находится в точке, где ливень достигает максимума. В этот момент $t = 0$. После подстановки (7) в (1) и интегрирования по объёму dV' получим для потенциала $d\mathbf{A}(\mathbf{r}, \omega)$ выражение

$$d\mathbf{A}(\mathbf{r}, \omega) = \frac{e\mu_0 e^{iknr}}{4\pi r} \mathbf{v} e^{-i\xi k n \sin \theta} F(\xi) \int_{-\infty}^{\infty} N(t) e^{i\omega t p} dt, \quad (8)$$

где $p = 1 - \beta n \cos \theta$ и $\mathbf{k} = \mathbf{m} k n \sin \theta + \mathbf{n} k n \cos \theta$ — волновой вектор, \mathbf{m} — единичный вектор вдоль направления AB , \mathbf{n} — единичный вектор вдоль оси Z , т. е. вдоль направления движения диска, e — заряд электрона.

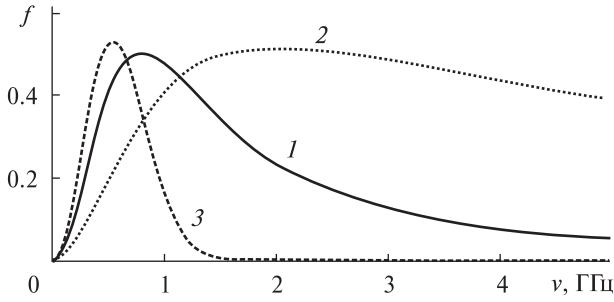


Рис. 2. Энергетические спектры f радиоимпульса в относительных единицах: линия 1 — данные [15, 16], 2 — данные [12–14], 3 — настоящая работа

Будем далее считать среду, в которой распространяется ливень, однородной. Тогда относительную глубину проникновения ливня в среду можно связать с текущим временем соотношением $\chi = ct / z_0$. При выбранной системе координат $\chi_{\max} = t_{\max} = 0$.

В заряде q_b только каскадная функция зависит от времени, и (8) сведётся к выражению

$$d\mathbf{A}(\mathbf{r}, \omega) = \frac{N_0 e \eta \mu_0 e^{iknr}}{4\pi r} \mathbf{v}(\sqrt{\pi} \alpha z_0 / c) e^{-\left(\frac{\rho \omega \alpha z_0}{2c}\right)^2} \times e^{-i\xi kn \sin \theta} \frac{\xi d\xi}{2\rho_1^2 \sqrt{\pi}} \left(\frac{\xi^2}{2\rho_1^2}\right)^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{\xi^2}{2\rho_1^2}}. \quad (9)$$

Потенциал $\mathbf{A}(\mathbf{r}, \omega)$ найдём суммированием (9) по элементам $d\xi$. Для этого сначала запишем выражение (9) для диаметрально противоположного элемента в точке $-\xi$ и сложить с (9). Тогда имеем

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, \omega) = \frac{\sqrt{2} N_0 e \eta \mu_0 e^{iknr}}{4\pi r \rho_1} \mathbf{v}(\alpha z_0 / c) \times e^{-\left(\frac{\rho \omega \alpha z_0}{2c}\right)^2} \int_0^\infty \cos(\xi kn \sin \theta) e^{-\frac{\xi^2}{2\rho_1^2}} d\xi,$$

или окончательно [9]

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, \omega) = \frac{N_0 e \eta \mu_0 e^{iknr}}{4\pi r} \mathbf{v}(\alpha z_0 / c) e^{-\left(\frac{\rho \omega \alpha z_0}{2c}\right)^2} \sqrt{\pi} e^{-\frac{(kn \rho_1 \sin \theta)^2}{2}}. \quad (10)$$

Энергетический спектр излучения (количество энергии, проходящее через единицу площади в единичном интервале частот за всё время излучения) запишется в виде

$$I(\omega) = \frac{dW(\omega)}{d\omega dS} = \frac{\varepsilon_0 c}{\pi} \omega^2 \sin^2 \theta |\mathbf{A}(\omega)|^2 = \frac{\mu_0}{c} \left(\frac{e N_0 z_0 \alpha \eta}{4\pi r}\right)^2 e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\rho \omega \alpha z_0}{c}\right)^2} \times \omega^2 e^{-(kn \rho_1 \sin \theta)^2} \sin^2 \theta, \frac{Дж}{Гц \cdot м^2}. \quad (11)$$

При наблюдении под черенковским углом $\rho = 1 - \beta n \cos \theta = 0$. Тогда

$$I(\omega) \propto \omega^2 e^{-(kn \rho_1 \sin \theta)^2}. \quad (12)$$

В приведенном выше примере $\rho_1 = \frac{W_{cr}}{2I} z_0 = 0.065$ м [3, 11], где критическая энергия W_{cr} выражена в МэВ. Максимум спектра достигается при $kn \rho_1 \sin \theta = 1$. Это соответствует частоте $\nu \approx 500$ МГц. Если проводить наблюдение на частотах порядка 1.6–2.3 ГГц [4, 13–15], то $kn \rho_1 \sin \theta = 3 \dots 4$, и спектральная мощность излучения $W(\omega)$ уменьшается при этом на 3–6 порядков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует отметить, что вышеуказанный факт может быть объяснением отсутствия событий в эксперименте [14], закрывшем модель Z^0 -вспышек. На рис. 2 в относительных единицах приведены энергетические спектры: рассчитанный в настоящей работе — линия 3, эмпирически полученный в работе [16] и использованный затем в экспериментальной работе [15] — линия 1, модернизированный в работе [11] и использованный далее в экспериментах [13, 14] — линия 2. Последний спектр получен в результате уточнения эмпирического спектра [16]. Характерно совпадение нашего спектра 3 и спектра 1 [16] в области низких частот. В области высоких частот (>0.5 ГГц) эмпирические спектры 2 [12, 16] плавно спадают вплоть до десятка ГГц, чем радикально отличаются от теоретического спектра.

Вполне вероятно, что полученная в настоящей работе сильная зависимость (12) мощности радиоизлучения от частоты в виде крутого спада на верхней границе спектра, является характерной для каскадного ливня в любой среде при

наблюдении черенковского излучения. Для подтверждения такой точки зрения следует обратить внимание на следующие факты.

1. Выражение для энергетического спектра \mathcal{Z} на рис. 2

$$I(\nu) \propto \nu^2 e^{-(k\rho_1 \sin\theta)^2}$$

содержит в себе, как частный случай, эмпирическую формулу, полученную для низких частот ($\nu < 0.5$ ГГц) в работе [16] и используемую далее в работе [15] для оценки спектральной напряжённости поля:

$$R|E(\omega, R, \theta_c)| = 1.1 \cdot 10^{-7} \frac{E_0}{1 \text{ TeV}} \frac{\nu}{\nu_0} \frac{1}{1 + 0.4(\nu/\nu_0)^2}. \quad (13)$$

Для принятых в настоящей работе численных значений $\rho_1 = 0.065$ м, $n = 1.7$, $\sin\theta = 0.8$ разложение (12) по малому параметру ν/ν_0 (т. е. для низких частот) переходит в выражение (13):

$$E \propto \left(\frac{dW(\omega)}{d\omega d\Omega} \right)^{\frac{1}{2}} \propto \omega e^{-\frac{1}{2}(k\rho_1 \sin\theta)^2} \propto \frac{\nu}{\nu_0} \frac{1}{1 + 0.43(\nu/\nu_0)^2}.$$

2. Применим полученный критерий максимума спектра $k\rho_1 \sin\theta = 1$ для широких атмосферных ливней. Известно, что спектральный максимум приходится на область частот 30–40 МГц [10]. Если подставить сюда хорошо известные для ШАЛ величины $\rho_1 = 70$ м, $n = 1.0002$ (коэффициент преломления воздуха на высоте 2–3 км над уровнем моря, в этом случае $\sin\theta = 0.02$), то получим $\nu \approx 35$ МГц, т. е. совпадение достаточно хорошее.

К этому можно добавить, что за всю историю исследования широких атмосферных ливней не зарегистрированы радиоимпульсы в диапазоне выше 100 МГц. Это также косвенно подтверждает наличие сильного ограничения на область высоких частот. Все приведенные факты дают основания полагать, что выражения (12) и (13) правильно описывают поведение спектра в области низких частот, а выражение (12), кроме этого, справедливо и для высоких частот.

Теперь ещё одно не менее важное замечание. При проведении эксперимента в реальных условиях главное направление диаграммы излучения имеет случайный характер и может оказаться, что оно не совпадает с направлением на антенну.

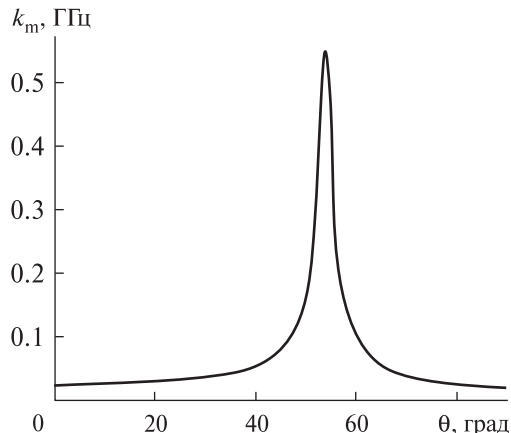


Рис. 3. График зависимости частоты (на которую приходится максимум спектра в месте нахождения наблюдателя) от направления диаграммы излучения относительно прямой наблюдения

Из (11) следует, что максимум спектра излучения приходится на частоту, следуемую из выражения

$$k_m = \left[\frac{1}{2} (1 - n \cos\theta)^2 \alpha^2 z_0^2 + n^2 \rho_1^2 \sin^2 \theta \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

На рис. 3 представлен график зависимости (14). Очевидно, это очень крутая зависимость от угла излучения. Из выражения (11) следует, что при частотах порядка половины гигагерца ширина диаграммы излучения на полувывоте равна приблизительно 7° . Рис. 3 показывает, что изменение направления, например, всего лишь на 2° соответствует понижению частоты (на которую приходится максимум наблюдаемого спектра) в два раза. Поэтому в реальных условиях оптимальной частотой будет не 500 МГц (как показано выше), а существенно меньшая величина.

1. Аскарьян Г. А. Избыточный отрицательный заряд электрон-фотонного ливня и когерентное излучение от него // ЖЭТФ. — 1961. — **41**, № 2(8). — С. 616–618.
2. Аскарьян Г. А. Когерентное радиоизлучение от космических ливней в воздухе и в плотных средах // ЖЭТФ. — 1965. — **48**, № 3. — С. 988–990.
3. Бельский С. З. Лавинные процессы в космических лучах. — М.: Гостехиздат, 1948. — 243 с.
4. Березняк А. Р., Дагесаманский Р. Д., Железных И. М. и др. Ограничения на поток нейтрино сверхвысоких энергий по радиоастрономическим наблюдениям // Астрон. журн. — 2005. — **82**, № 2. — С. 149–156.

5. Голубничий П. И., Филоненко А. Д. Радиоизлучение в диапазоне средних и низких частот, вызванное широким атмосферным ливнем // Письма в ЖТФ. — 1994. — **20**, № 12. — С. 57—61.
6. Голубничий П. И., Филоненко А. Д. Радиодетектирование широких атмосферных ливней супервысоких энергий // Письма в ЖТФ. — 1994. — **20**, № 23. — С. 59—62.
7. Дагкесаманский Р. Д., Железных И. М. Радиоастрономический метод регистрации нейтрино и других элементарных частиц супервысоких энергий // Письма в ЖЭТФ. — 1989. — **50**, № 5. — С. 233—235.
8. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. — М.: Наука, 1967. — 460 с.
9. Прудников А. П., Брычков Ю. А., Маричев О. И. Интегралы и ряды. — М.: Наука, 1984. — 797 с.
10. Филоненко А. Д. Детектирование космических лучей по электромагнитной радиоэмиссии ливня и возможности этого метода в диапазоне сверхвысоких энергий // Успехи физ. наук. — 2002. — **172**, № 4. — С. 439—471.
11. Христиансен Г. Б., Куликов Г. В., Фомин Ю. А. Космическое излучение сверхвысокой энергии. — М.: Атомиздат, 1975. — 253 с.
12. Alvarez-Muniz J., Vazquez R. A., Zas E. Calculation Methods for Radio Pulses from High Energy Showers // arXiv:astro-ph/0003315.
13. Gorham P. W., Hebert C. L., Liewer K. M., et al. Experimental Limit on the Cosmic Diffuse Ultra-high Energy Neutrino Flux // arXiv:astro-ph/0310232.
14. Gorham P. W., Liewer K. M., Naudet C. J. Initial Results from a Search for Lunar Radio Emission from Interactions of 10^{19} eV Neutrinos and Cosmic Rays 1 // arXiv:astro-ph/9906504.
15. Hankins T. H., Ekers R. D., O'Sullivan J. D. A search for lunar radio Cherenkov emission from high-energy neutrinos // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. — 1996. — **283**. — P. 1027—1030.
16. Zas E., Halzen F., Stanev T. Electromagnetic pulses from high-energy showers: Implications for neutrino detection // Phys. Rev. D. — 1992. — **45**, N 1. — P. 362—376.

Надійшла до редакції 01.10.09

P. I. Golubnichiy, A. D. Filonenko

ON THE OPTIMUM FREQUENCY RANGE
IN THE RADIO-ASTRONOMICAL METHOD
FOR THE MEASUREMENT OF STREAMS
OF COSMIC PARTICLES OF ULTRAHIGH ENERGY

The energy spectrum of a radio pulse induced by a cascade shower in the lunar regolith is derived. The transverse dimensions of the shower and a nonuniform distribution of excess electrons on the disc radius are taken into account. The spectrum in the high-frequency region is radically different from earlier results which are used in experimental studies. The maximum intensity of the field lies in the range from 500 to 600 MHz. In the frequency band from 1.6 to 2.3 GHz the radiation intensity decreases by several orders of magnitude. By the authors' opinion, this is one of the reasons for the events absence in the experimental investigations which closed the Z^0 burst models.

УДК 537.5, 550.3, 551.5

О. В. Шуєнко, Л. В. Козак, В. М. Івченко

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ШВИДКОПЛИННІ ОПТИЧНІ ЯВИЩА ПІД ЧАС ГРОЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ У НИЖНІЙ АТМОСФЕРІ

Зроблено загальний огляд та аналіз умов виникнення швидкоплинних оптичних явищ в атмосфері, а саме: спрайтів, ельфів, блакитних джетів та блискавок вгору. Вказано закономірності їхньої появи та проявів. Чисельно змодельовано квазі-електростатичні поля системи грозових зарядів із використанням моделі Вілсона. Отримано, що в нижній атмосфері відстань затухання електричного поля, створеного грозовою хмарою, близька до 10 км, що збігається із результатами прямих вимірювань. Проведено моделювання часової і просторової динаміки електричного поля при внесенні одиничного заряду в систему Земля — іоносфера і порівняння отриманих результатів із аналітичним розв'язком. Одержані результати моделювання електростатичних полів можуть бути використані для чисельного моделювання спрайтів та джетів.

ВСТУП

Сильні розряди блискавок можуть продукувати швидкоплинні світні явища (TLE — Transient Luminous Events) над грозами, такі як: спрайти, ельфи, джети та ін. Ці короткоживучі оптичні емісії у мезосфері можуть простягатись від верхньої частини грозових хмар аж до іоносфери; вони дають прямий доказ зв'язку нижніх шарів атмосфери з верхніми. Спрайти, безсумнівно, одне з найдраматичніших відкриттів останнього часу в сонячно-земній фізиці. Невдовзі після перших наземних спостережень (перше зображення отримано випадково у 1989 р.) спостереження з борту космічного шатла вказали на глобальний характер явища. За останнє десятиріччя опубліковано сотні наукових статей, які відображають досягнення в цій новій, швидко зростаючій дослідницькій галузі.

Не слід забувати, що є безпосередній зв'язок між атмосферною електрикою та формуванням складу атмосфери та клімату планети. Гіпотеза Ж. фон Лебега про те, що грози відіграють значну роль в глобальному кругообігу азоту, яку він висловив ще у ХІХ ст., підтвердилася у середині

1970-х років після детальних вимірювань вмісту оксидів азоту. Оксиди азоту впливають на концентрацію, розподіл озону і гідроксильних радикалів в атмосфері і тим самим — на баланс сонячної радіації і клімат. Нове і зовсім не вивчене запитання — можливий вплив спрайтів і джетів на склад середньої атмосфери.

Інтерес до даних питань зріс перш за все внаслідок розуміння того, що атмосферна електрика є важливим фактором в системі сонячно-земних зв'язків та кліматичній системі Землі.

Наведемо загальний огляд швидкоплинних процесів, що відбуваються у верхніх шарах атмосфери під час гроз і вкажемо на закономірності їхньої появи та проявів. Висотний розподіл швидкоплинних світних явищ подано на рис. 1.

Червоні спрайти. Це найбільш часто спостережувані TLE-явища. Вони найчастіше виникають на висотах близько 70–75 км, демонструючи дуже структуровані відгалуження, які відходять від верхнього дифузного світіння і поширюються донизу [2, 18]. Відгалуження іноді простягаються вниз на відстані до 40 км, тому вони можуть досягати висот менше 30 км над поверхнею. Нижні частини спрайтів зазвичай мають блакитне забарвлення. Не зовсім зрозуміло, чи всі відгалуження мають фізичний зв'язок із вер-

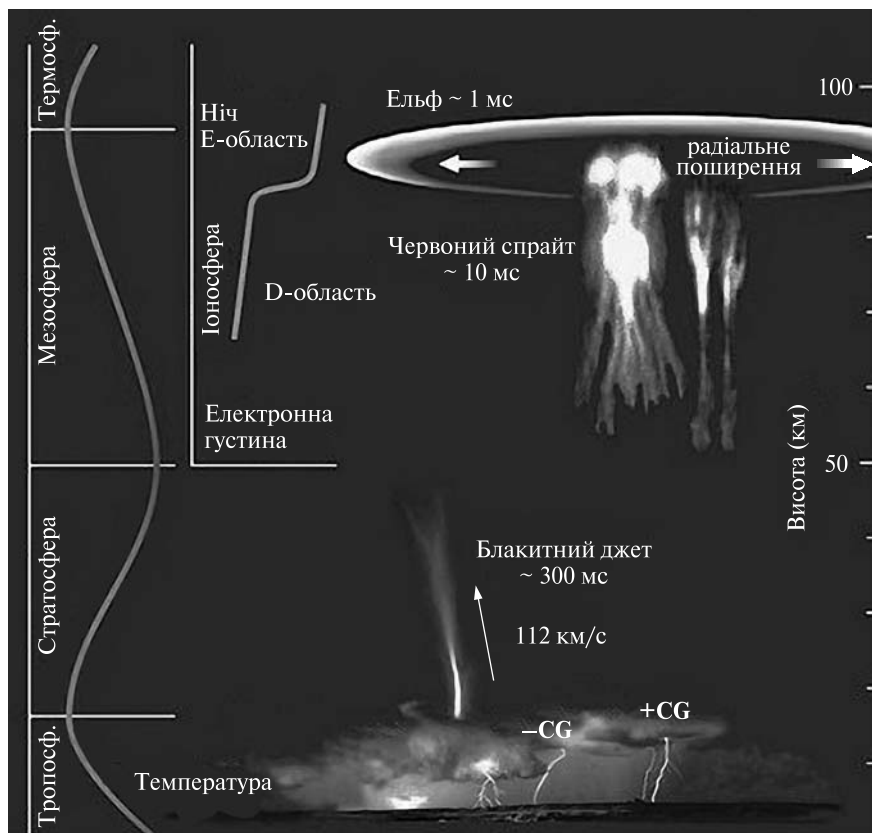


Рис. 1. Схематичне зображення сімейства швидкоплинних оптичних явищ в атмосфері: спрайти, джети, ельфи

хівкою грозової хмари, що їх породжує. Можна виділити кілька морфологічних типів спрайтів.

Стовпові спрайти, або с-спрайти — дуже вузькі (порядку 1 км), квазінеперервні, майже вертикальні колони, часто з витягнутими вгору або вниз відгалуженнями [3]. Вони можуть проявлятися в групах з десяти чи навіть більше окремих структур [23]. Класичні «морквяні» («carrot») спрайти мають групу відгалужень донизу, які сходяться у формі перевернутого конуса. Великі групи спрайтів часто називають «ангелами». Типова гроза може продукувати спрайт кожні кілька хвилин.

Переважна більшість спрайтів продукується +CG-розрядами (cloud-to-ground), які переносять позитивний заряд з верхівки грозової хмари на поверхню Землі [7, 14]. Часто, потужний горизонтальний розряд блискавки, який називають «павуком», може поширюватись крізь хмару більш ніж на 100 км, іноді з кількома +CG-розрядами [15]. Проміжок часу між ударом блискавки

і спалахом спрайту доволі сильно змінюється. Зазвичай він складає близько 1 мс, однак трапляються затримки до 10 мс [4, 20].

Узагальнивши спостережні дані (переважно відеоспостереження), матимемо наступні параметри спрайтів [7]:

- спрайти виникають на висотах близько 70 ± 15 км над сильними грозами, яким притаманний перенос позитивного заряду до землі;
- просторовий масштаб по горизонталі змінюється від 100 м до 30 км;
- розвиток у часі триває від 1 до 100 мс;
- випромінюють до 10^{12} фотонів за секунду з квадратного сантиметра переважно у червоних молекулярних лініях азоту;
- спрайти можуть випромінювати в радіодіапазоні на частотах до 1 кГц;
- спрайти беруть участь у розрядженні глобального атмосферного електричного кола. Два спрайти за хвилину забирають близько 10^{-4} загального запасу заряду в атмосфері.

Ельфи. +CG-розряд генерує сильний електромагнітний імпульс, який розігріває атмосферу на висотах близько 90 км. Розігріті електрони збуджують молекули азоту, які потім випромінюють в червоному світлі. З геометричних міркувань світло поширюється кільцем, яке розширюється в радіальному напрямку із швидкістю світла [5, 16]. Вони відбуваються приблизно через 0.3 мс після початку грозового розряду [6].

Блакитні джети. Найцікавіша риса блакитних джетів — їхня рідкісність. Вони беруть початок із верхівки грозових хмар зі швидкістю порядку 200 км/с і рухаються вниз, сповільнюючи хід, досягають висот 30–40 км. Для них характерна структурованість і майже чистий блакитний колір [24]. Інтегральний блиск наближається до типових параметрів спрайтів. Тому адаптоване до темряви людське око за ідеальних умов здатне зафіксувати це явище. Блакитні джети та їхні більш короткі родичі «блакитні стартери» (blue starter) безпосередньо не пов'язані з CG-чи IC-розрядами (cloud-to-ground та intercloud). Блакитні джети скоріше за все пов'язані з дуже сильними грозами, в яких значна кількість електричного заряду вторгається в стратосферу за рахунок конвективних рухів. Це припущення ще чекає на своє підтвердження [23].

Блискавки вгору із верхівок хмар. Про цей клас швидкоплинних оптичних явищ відомо менше, ніж про будь-який інший. Здійснені на даний момент спостереження поки не дозволяють зв'язати їх з певними характеристиками блискавок [13]. У вертикальному напрямку вони простягаються від сотень метрів до десятків кілометрів. Невідомо, чи вони є певним типом струмів, що течуть вгору, чи проявом процесів, які відбуваються нижче. Можливо, найбільш інтригуючими є «блискавки вгору», які можуть бути проявом особливо інтенсивної і глибокої конвекції. Видні при денному світлі блискавкоподібні колони простягаються вгору від верхівки хмари, не миготять, змінюються в кольорі від жовтого до білого, демонструють невеликі викривлення, і можуть тривати від 1 до 2 с доки вся колона не зникне. Інколи вони можуть досягати 30 км. Блискавки вгору досі не записані на відео, наявні лише фотографії та свідчення очевидців [7].

ГЛОБАЛЬНЕ АТМОСФЕРНЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ КОЛО (МОДЕЛЬ ВІЛСОНА)

Глобальне атмосферне електричне коло визначає в атмосфері баланс електричних струмів, умови підтримки електричного поля, а також структуру електричних полів і струмів [19]. Дані багаторічних вимірювань електричних характеристик атмосфери поблизу поверхні Землі вказують на існування електричного поля напруженістю порядку 100 В/м і електричного струму густиною 10^{-12} А/м². Ці параметри визначаються у так званих умовах «хорошої погоди», тобто при відсутності в даному районі Землі хмар, вітрів тощо. Вимірювання електричного поля хорошої погоди поблизу земної поверхні дозволяють оцінити деякий ефективний заряд Землі, який складає 100 000 Кл [1]. Оскільки атмосфера Землі має провідність, то при відсутності джерел електричне поле в атмосфері зникало б приблизно за 10 хв. Згідно із сучасними уявленнями основним джерелом електричного поля у тропосфері і стратосфері є грозові хмари. Грозові хмари діють як струмові генератори. Можливо, що грозові хмари не є єдині генератори, які підтримують електричне поле атмосфери. Не зовсім з'ясовано роль генераторів, що діють у верхніх шарах атмосфери (іоносфери і магнітосфери), хмар шаруватої форми, конвективного струмового генератора тощо. Відмітимо, що в областях існування грозових хмар течуть струми, які заряджають атмосферу, а в областях, вільних від грозових хмар, течуть струми розрядки [21].

В атмосфері електричні і магнітні поля, густина зарядів та повна густина електричного струму описуються за допомогою чотирьох рівнянь Максвелла. Разом із рівняннями неперервності, законами збереження і рівнянням стану $P(N, T)$ може бути отриманий зв'язок між напруженістю електричного поля E та густиною струму J . Для визначення стану атмосфери цього достатньо, але при розв'язуванні рівнянь виникає ряд проблем, оскільки багато фізичних процесів нелінійні. Тому для досягнення поставленої мети робиться ряд припущень та будуються наближені моделі.

Отже, основні рівняння, що описують глобальне атмосферне електричне коло, мають вигляд

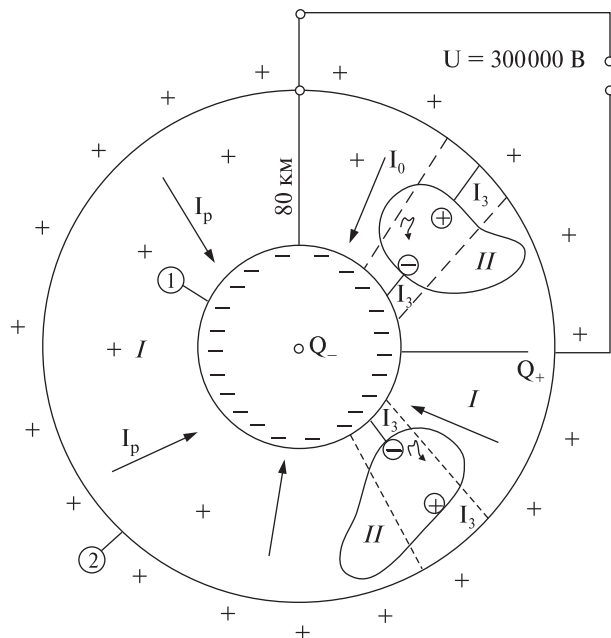


Рис. 2. Модель глобального електричного кола атмосфери Землі у вигляді сферичного конденсатора (модель Вілсона). Обкладинки — відносно провідні поверхні Землі та іоносфери, ізолятор — атмосфера планети. Зарядка цього «конденсатора» відбувається в областях грозової активності, розрядка — в так званих областях «хорошої погоди»

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad \text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t},$$

$$\text{div } \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0, \quad \text{div } \mathbf{H} = 0, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \mathbf{j} = 0, \quad (1)$$

де \mathbf{E} — напруженість електричного поля, \mathbf{H} — напруженість магнітного поля, ρ — густина електричного заряду, \mathbf{j} — густина електричного струму.

В умовах $T \gg L\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$, $T \gg 2\pi\mu_0\lambda L^2$ (T , L — характерні часовий та просторовий масштаби задачі, λ — провідність атмосфери) система рівнянь (1) зводиться до системи

$$\text{rot } \mathbf{E} = 0, \quad \text{div } \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \mathbf{j} = 0. \quad (2)$$

Відмітимо, що остання система описує всі електричні процеси в нижніх шарах атмосфери, виключаючи, можливо, лише швидкозмінні явища, які відбуваються при грозових розрядах. Останнє рівняння для густини електричного за-

ряду є наслідком рівняння для $\text{rot } \mathbf{H}$, якщо до нього застосувати оператор дивергенції. Вираз для густини електричного струму записується у вигляді

$$\mathbf{j} = \lambda \mathbf{E} + \rho \mathbf{v} + D_\tau \nabla \rho + \sum_s \mathbf{j}_s, \quad (3)$$

де \mathbf{v} — гідродинамічна швидкість руху середовища, D_τ — коефіцієнт турбулентної дифузії, \mathbf{j}_s — густина електричного струму, що створюється кожним джерелом.

Останній член, що входить у вираз (3), описує джерела струму в атмосфері, якими, зокрема, є грози. Другий і третій доданки суттєві у граничному шарі атмосфери.

Важливу роль в дослідженні електричних процесів у атмосфері відіграють її провідні властивості. Іонний склад атмосфери в нижньому шарі досить складний. Існує цілий спектр іонів, які є комплексами молекул, що переносять заряд, рівний елементарному. Електропровідність атмосфери λ при відомому іонному складі може бути визначена [1].

Згідно із сучасними уявленнями основний вклад в електропровідність нижніх шарів атмосфери вносять легкі іони. Електропровідність в цій частині земної атмосфери, формується під впливом радіоактивного випромінювання поверхні Землі, радіоактивних домішок, що містяться в повітрі, космічного випромінювання. Із віддаленням від земної поверхні вона зростає по закону

$$\lambda = \lambda_0 e^{\alpha(r-r_0)}, \quad (4)$$

де r_0 — радіус Землі, $1/\alpha = 6.4$ км.

В ряді випадків до висоти приблизно 40 км електропровідність може бути подано у вигляді

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_0 \exp\left(\frac{r-r_0}{0.82}\right), & 0 < r-r_0 < 3.6 \\ \lambda_1 \exp\left(\frac{r-r_0}{4.1}\right), & 3.6 < r-r_0 < 17.7 \\ \lambda_2 \exp\left(\frac{r-r_0}{7.0}\right), & 17.7 < r-r_0 < 40.0 \end{cases}$$

де $\lambda_1 = \lambda(3.6)$, $\lambda_2 = \lambda(17.7)$.

Розглянемо моделі глобального електричного кола. Однією з перших моделей, яка не втрати-

ла значимість до сьогодні, є модель сферичного конденсатора, вперше запропонована Вілсоном (рис. 2). В цій моделі електричне поле в нижніх шарах атмосфери існує завдяки тому, що на Землі і у високих шарах атмосфери, які мають високу провідність, зосереджені відповідно негативний (Q-) і позитивний (Q+) заряди, які створюють деяку різницю потенціалів $\Delta\varphi$, в результаті чого в атмосфері спостерігається електричне поле E . Завдяки електропровідності шарів атмосфери, що знаходяться між обкладинками сферичного конденсатора, одна з яких — земна поверхня, інша — іоносфера, в атмосфері тече електричний струм I_p , який розряджає конденсатор. Щоб підтримувати заряд на обкладинках такого конденсатора, необхідні джерела струму, які компенсують струм розрядки. У моделі Вілсона передбачається, що струм зарядки I_3 виникає в усіх областях атмосфери, які зайняті грозовими хмарами, і в яких електричне поле має напрям, зворотний до напрямку, спостережуваному в областях хорошої погоди.

Згідно із сучасними оцінками $I_p = 1000$ А, $R = 230$ Ом [1]. Середнє вимірне значення $\Delta\varphi = 278$ кВ. Оскільки в моделі Вілсона струм розрядки дорівнює струму зарядки, для оцінки ролі гроз в якості генераторів необхідно знати струм, який вони створюють, і кількість гроз, які діють одночасно. Дані вимірювань показують, що струм, який створює одна гроза, складає 0.1–6 А, середній струм, що припадає на одну грозову комірку, дорівнює 0.5–1 А [1].

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ МОДЕЛЮВАННЯ АТМОСФЕРНОЇ ЕЛЕКТРИКИ

Розгляд квазістатичних полів в нижній атмосфері Землі. Вище було розглянуто загальні положення і властивості квазіелектростатичного поля в моделі глобального електричного кола. Застосуємо її для моделювання поля в нижніх шарах атмосфери. Розглянемо конфігурацію та величину поля.

Якщо в рівнянні (3) записати $E = -\nabla\varphi$, де φ — потенціал електростатичного поля, то вираз для густини електричного струму можна подати в наступному вигляді:

$$\mathbf{j} = -\lambda\nabla\varphi - \varepsilon_0\nabla\Delta\varphi - \varepsilon_0 D_\tau\nabla\Delta\varphi + \sum_i \mathbf{j}_i.$$

Підставляючи цей вираз в рівняння для густини заряду в системі рівнянь (2), матимемо рівняння

$$\varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \Delta\varphi + \nabla(\lambda\nabla\varphi) + \varepsilon_0 \nabla(\nabla\Delta\varphi) + \varepsilon_0 \nabla(D_\tau\nabla\Delta\varphi) = \sum_i \operatorname{div} \mathbf{j}_i. \quad (5)$$

За допомогою останнього виразу можна отримати основні математичні співвідношення, що зв'язують електричні параметри у моделі Вілсона. У квазістаціонарному випадку, при відсутності грозових джерел у товщі атмосфери $\Delta H \ll r_0$ (r_0 — радіус Землі) з рівності (5) випливає співвідношення

$$j_0 = \lambda E_r,$$

де j_0 — густина електричного струму, E_r — радіальна складова напруженості електричного поля. Підставляючи E_r з останньої рівності у вираз для електричного потенціалу $\varphi = -\int_{r_0}^r E_r dr$, матимемо

$$\varphi = -j_0 R_e, \quad R_e = \int_{r_0}^r \frac{dr}{\lambda},$$

де R_e — опір стовпа атмосфери одиничного перерізу. Загальний опір атмосфери і повний глобальний струм даються співвідношеннями [7]

$$R = \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{4\pi r^2 \lambda(r)}, \quad I = 4\pi r_0^2 \lambda(r_0) E_r^0, \quad R_{\infty} = \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{\lambda}.$$

Для атмосфери з експоненційною електропровідністю $\lambda = \lambda_0 \exp[\alpha(r - r_0)]$ маємо співвідношення

$$R_e = \frac{1}{\lambda_0 \alpha} [1 - \exp(-\alpha(r - r_0))],$$

$$R = \frac{1}{\lambda_0 \alpha \cdot 4\pi r_0^2},$$

$$\varphi(r) = -\frac{j_0}{\lambda_0 \alpha} [1 - \exp(-\alpha(r - r_0))],$$

$$E_r = \frac{j_0}{\lambda_0} \exp(-\alpha(r - r_0)).$$

Потенціал іоносфери φ_∞ можна пов'язати з кількістю грозових струмових генераторів, що діють в даний момент по всій земній кулі. Цей зв'язок має вигляд

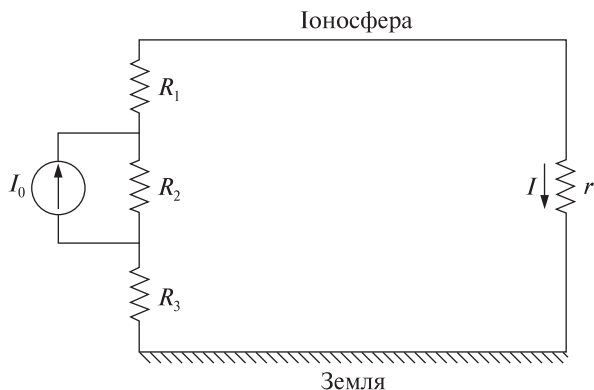


Рис. 3. Еквівалентна схема грозового генератора. I — струм розрядки (тече в областях «хорошої погоди»), I_0 — сумарний струм, створений областями грозової активності

$$\varphi_\infty = R \sum_i \frac{R_{li}}{R_{ci}} I_i = RI,$$

де R_{li} — внутрішній опір грозового генератора; R_{ci} — опір атмосфери під грозовим генератором і над ним, включно із внутрішнім опором і опором самого генератора; I — сумарний струм, що дають грозові хмари в іоносферу (як було зазначено вище, складає порядку 1000 А).

Еквівалентна електрична схема дії грозового генератора (рис. 3) дає наступний вираз для потенціалу іоносфери [7]

$$\varphi_\infty = \frac{1}{4\pi r_0^2} \sum_i I_i \left(\frac{1}{\lambda_i^-} - \frac{1}{\lambda_i^+} \right), \quad (6)$$

де λ_i^- , λ_i^+ — електропровідності в околі негативного (q_i^-) і позитивного (q_i^+) зарядів грозової хмари.

Врахування впливу грозових хмар не тільки в глобальному, а й в локальному масштабі можна проводити на основі розв'язку рівняння

$$\text{div}(\lambda \text{grad } \varphi) = -4\pi \lambda \sum_i q_i \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i), \quad (7)$$

де q_i , \mathbf{r}_i — заряд і радіус-вектор i -го грозового джерела, $\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)$ — функція Дірака.

В такому представленні заряди грозового джерела вважаються точковими, що справедливо для відстаней, які значно перевищують характерний розмір області розподілу зарядів грозової хмари. В стаціонарному випадку, що і передбачає мо-

дель Вілсона, позитивний і негативний заряди i -го джерела зв'язані співвідношенням

$$I_i = 4\pi \lambda_i^+ q_i^+ = -4\pi \lambda_i^- q_i^-. \quad (8)$$

Для атмосфери з експоненційною провідністю $\lambda = \lambda_0 \exp(\alpha z)$ q_i^+ і q_i^- пов'язані між собою співвідношенням

$$q_i^+ = -q_i^- \exp[\alpha(z_i^- - z_i^+)]. \quad (9)$$

В моделі «класичного конденсатора» граничні умови для розв'язку рівняння (7) мають вигляд

$$\varphi(r=r_0) = 0,$$

$$\frac{1}{4\pi} \oint_{S_2} \varphi d\Omega = \varphi_\infty, \quad (10)$$

S_2 — поверхня, що лежить у високопровідних шарах атмосфери. Другу умову можна замінити умовою

$$\varphi(r \rightarrow \infty) = \varphi_\infty \text{ або } \varphi(r=R) = \varphi_\infty, \quad (11)$$

де R — радіус нижньої границі іоносфери.

Розв'язок рівняння (7) при вказаних вище граничних умовах можна записати у вигляді

$$\varphi(\mathbf{r}) = \sum_i q_i G_i + \varphi_\infty [1 - \exp(-\alpha(r - r_0))],$$

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i) = \exp\left(-\frac{\alpha}{2}(r - r_i)\right) \times \left[\frac{\exp\left(-\frac{\alpha}{2}\rho_i\right)}{\rho_i} - \frac{\exp\left(-\frac{\alpha}{2}\rho'_i\right)}{\rho'_i} \right], \quad (12)$$

де G_i — функція Гріна, $\rho_i = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|$, ρ'_i — відстань від точки спостереження до заряду зображення.

Таким чином, задавши певний просторовий розподіл зарядів (вектори \mathbf{r}_i), ми можемо побудувати значення електростатичного потенціалу в кожній точці простору у межах модельного об'єму.

Одновимірні релаксації квазіелектростатичних полів. Одновимірне рівняння, що описує динаміку електричних полів, може бути отримане з рівняння провідності (2) та записане у формі [17]

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} + \frac{\lambda}{\epsilon_0} E_z = f(t), \quad (13)$$

де $f(t)$ — функція, що не залежить від z , ϵ_0 — електрична стала. Важливо відмітити, що у ви-

падку коли значення електричного поля зберігається (за рахунок якихось зовнішніх струмів) на постійному рівні E_0 на визначеній границі, наприклад на $z=0$ тоді $f(t)$ також є константою і не залежить від часу.

Якщо електричне поле при $t=0$ представити як внесення еквівалентного поверхневого заряду при $z=0$, то поле буде стаціонарно релаксувати, згідно із стаціонарним розв'язком (13):

$$E_z = E_0 \frac{\lambda_0}{\lambda(z)}$$

на певній висоті як

$$E_z = E_0 \left[\left(1 - \frac{\lambda_0}{\lambda} \right) e^{-\frac{\lambda_0}{\varepsilon_0} t} + \frac{\lambda_0}{\lambda} \right], \quad (14)$$

де λ — провідність атмосфери змінюється експоненційно:

$$\lambda(z) = \lambda_0 e^{\alpha z}, \quad (15)$$

як і у попередньому стаціонарному випадку. Якщо ми тепер внесемо на поверхню $z=0$ заряд протилежного знаку $\rho_s = -\varepsilon_0 E_0$, що ефективно відтворює розрядку, то електричне поле на певній висоті знову буде релаксувати як

$$E_z = E_0 \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right) e^{-\frac{\lambda_0}{\varepsilon_0} t}.$$

Таким чином, використовуючи формули (14) і (15), ми можемо визначити, як напруженість електричного поля розподілена по висоті для будь-якого моменту часу. Схожі результати отримуються при застосуванні так званої моделі «рухомого конденсатора» [8]. Ця модель передбачає дві області 1 і 2 (рис. 4), розділені границею h_i . Границя з часом рухається вниз із високих шарів в іоносфері після введення різниці потенціалів V_0 (що дуже схоже до процесів, які відбуваються після удару блискавки у моделі Вілсона). Відомий вираз для «висоти іоносфери» [9]:

$$h_i = h \ln \left(\frac{\varepsilon_0}{\lambda_0 t} \right).$$

В області 1 струм зміщення домінує, і електричне поле можна знайти з виразу

$$E_1(t) = \frac{V_0 - V'(t)}{h_i(t)}, \quad (16)$$

де V' — значення потенціалу на рівні h_i .

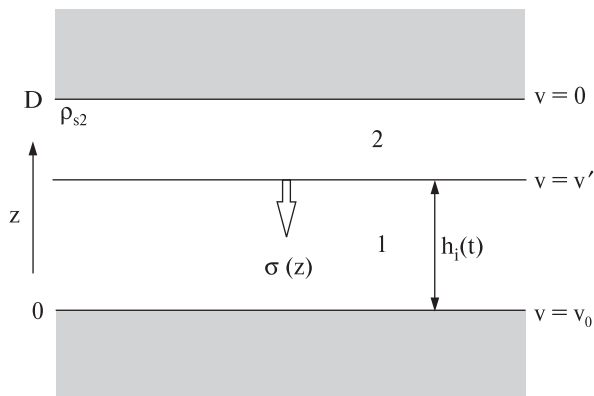


Рис. 4. Модель «рухомого конденсатора». Між двома зовнішніми обкладинками (Земля – іоносфера) маємо ще одну рухому, яка розділяє область простору між ними на дві частини

В області 2 домінує струм провідності, і електричне поле можна подати як «стаціонарний розв'язок» типу

$$E_2(z, t) = \frac{\lambda(h_i)}{\lambda(z)} E_1(t).$$

Після інтегрування $E_2(z, t)$ із граничною умовою $V_2(D) = 0$ матимемо вираз для потенціалу в області 2:

$$V_2 = h E_1 \left[\frac{\lambda(h_i)}{\lambda(z)} - \frac{\lambda(h_i)}{\lambda(D)} \right]. \quad (17)$$

Вирази (16) і (17) при $z = h_i$ матимуть вигляд

$$V' = \frac{V_0 \frac{h}{h_i} \left[1 - \frac{\lambda(h_i)}{\lambda(D)} \right]}{1 + \frac{h}{h_i} \left[1 - \frac{\lambda(h_i)}{\lambda(D)} \right]}.$$

Останній вираз також повністю описує динаміку електричного поля [12].

РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Квазіелектростатичне поле, створене групою грозових джерел. Змоделюємо просторовий розподіл електростатичного поля, яке створюється групою з кількох грозових хмар, враховуючи експоненційну зміну провідності з висотою. Для цього використаємо модель Вілсона, яка була детально

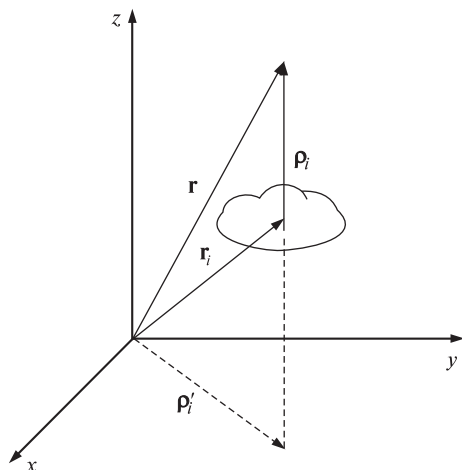


Рис. 5. Геометрична модель області розрахунку електростатичного поля. Грозова хмара має просторову координату \mathbf{r}_i , поле обчислюється в точці \mathbf{r} . Вектор ρ_i' – відповідає відображенню заряду хмари відносно поверхні Землі

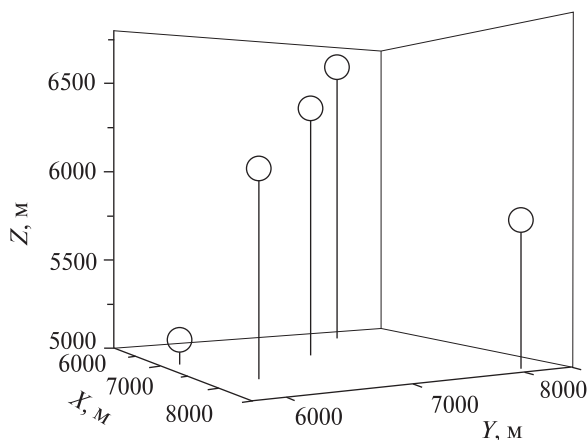


Рис. 6. Просторовий розподіл системи грозових зарядів, вибраний для моделювання електростатичного поля. Розташування хмар цілком випадкове в межах модельного простору. Спостерігач перебуває у початку координат

описана вище. На рис. 5 зображено геометричну модель. Тут спостерігач перебуває у початку координат (вибрано для зручності обчислень і не є принциповим), центр однієї з грозових хмар знаходиться у точці C і відповідає вектору \mathbf{r}_i , решта позначень збігається із використаними у виразі (12). За формулами (6), (8)–(12) ми визначаємо потенціал, створений сумарною дією всіх грозових зарядів у певній області простору.

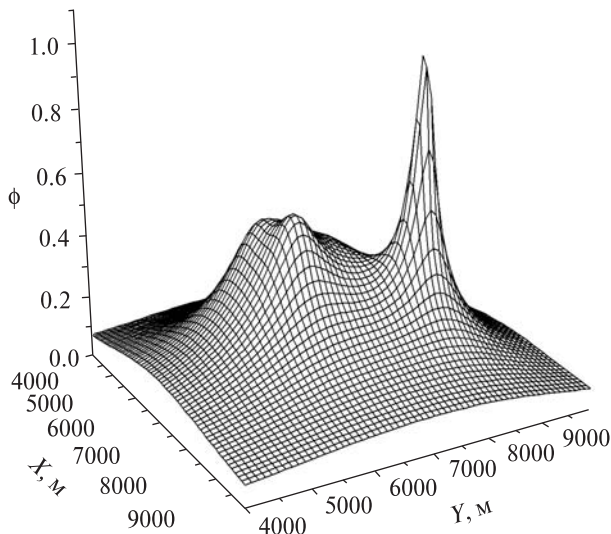


Рис. 7. Сумарне поле конфігурації з п'яти зарядів, розраховане для висоти 5600 м над поверхнею Землі. По вертикальній осі відкладено нормовану напруженість сумарного електричного поля

Модельна область в даній роботі містить п'ять грозових хмар, розташованих хаотично у кубічній області простору з ребром $L = 14\,000$ м (рис. 6).

При моделюванні були використані такі параметри [7]:

- масштабний множник в моделі Вілсона, що показує характерну відстань спадання напруженості електричного поля в атмосфері $\alpha = 1/6400$ м;
- величина позитивного і негативного зарядів грозової хмари $q = \pm 20$ Кл;
- відстань між позитивним і негативним зарядом всередині хмари $\Delta z = 2000$ м;
- провідність атмосфери на рівні Землі $\lambda_0 = 1.1 \cdot 10^{-13}$ См/м;
- висота рівня іоносфери $h = 60\,000$ м;
- крок обчислення по трьох координатах – 100 м.

Отриманий просторовий розподіл для висоти 5600 м показано на рис. 7. По вертикальній осі відкладено значення електростатичного потенціалу у відносних одиницях (нормованих на максимальне значення). Розподіл чітко показує внесок кожного грозового заряду. Можемо бачити три піки, які відповідають трьом грозовим зарядам, розташованим найближче до даного рівня. Решта (2 заряди) розташовані занадто далеко

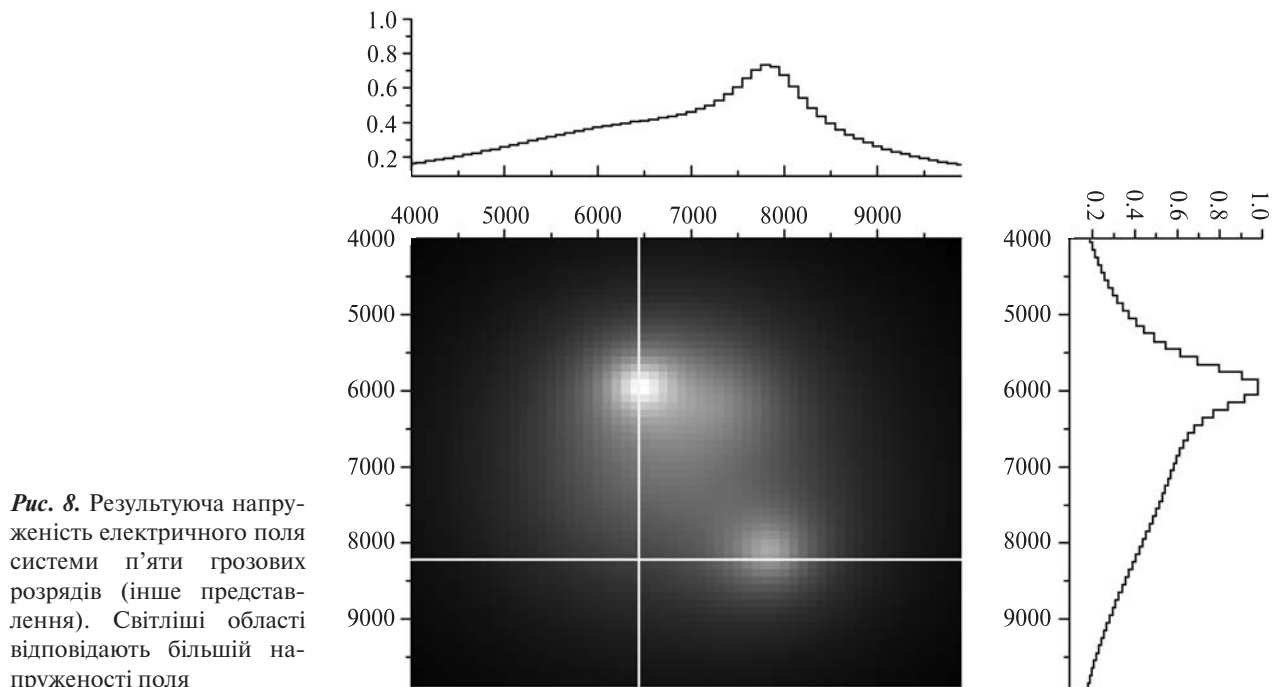


Рис. 8. Результуюча напруженість електричного поля системи п'яти грозових розрядів (інше представлення). Світліші області відповідають більшій напруженості поля

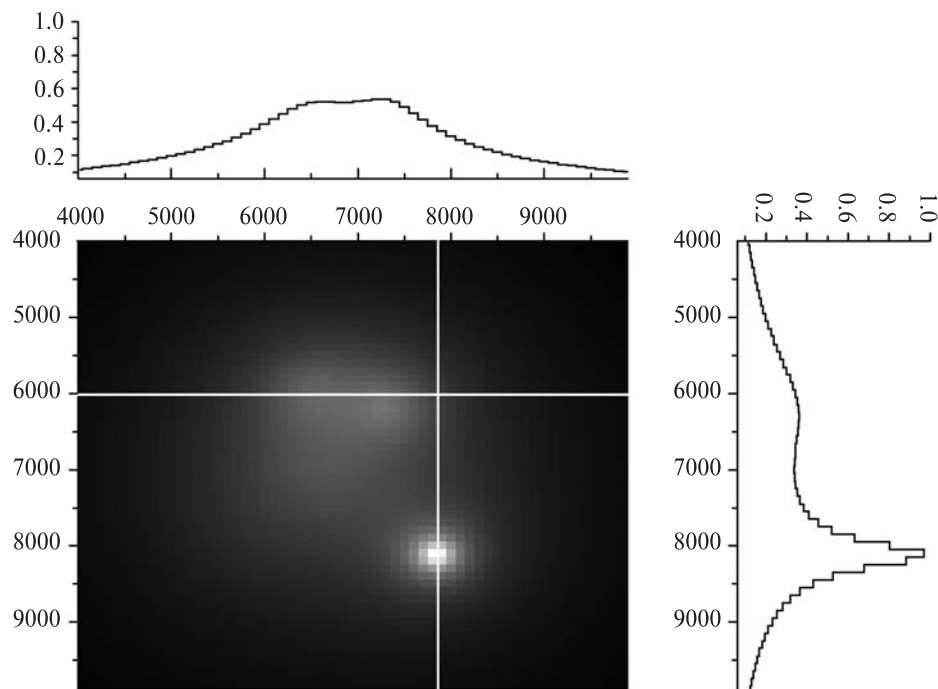


Рис. 9. Те ж саме, що і на рис. 8, але для висоти 5400 м

і дають значно менший вклад у сумарне електростатичне поле на даному рівні.

На рис. 8 і 9 зображені зрізи на рівнях 5600 і 5400 метрів відповідно. Світліші області відпові-

дають більшому значенню потенціалу. Бачимо, що конфігурація сумарного поля дещо змінюється із висотою. Це пояснюється наближенням до одних і віддаленням від інших грозових зарядів.

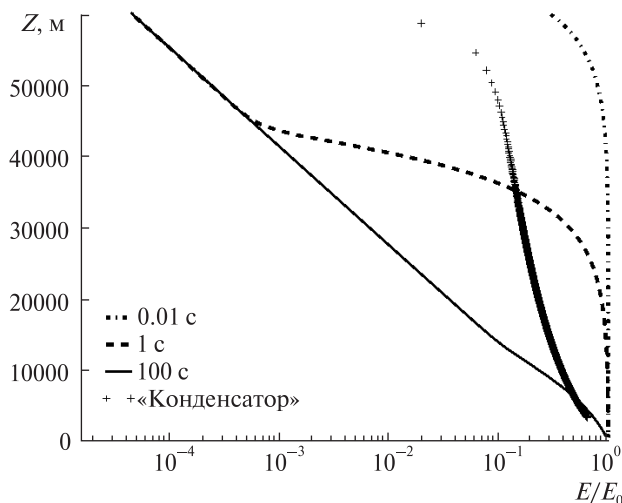


Рис. 10. Висотний профіль потенціалу, розрахований для трьох моментів часу: 0.01 с, 1 с, 100 с після внесення заряду в об'єм між іоносферою та поверхнею Землі (розряд блискавки)

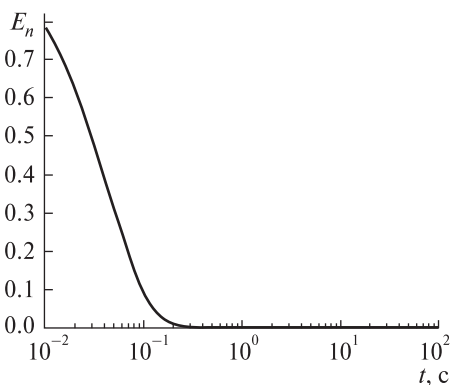


Рис. 11. Динаміка електричного поля на висоті 50 км

До того ж на вказаних графіках можемо бачити профілі потенціалу лише по одній координаті (суцільні горизонтальна і вертикальна лінії).

Отримана із моделювання характерна відстань спадання поля порядку 10 км добре узгоджується із аналогічними параметрами у моделі Вілсона [7].

Моделювання часової і просторової динаміки електричного поля. Після того як було отримано стаціонарний розподіл електростатичного поля, можемо перейти до розгляду часової динаміки. Для зручності і простоти обчислень розглядатимемо одновимірний випадок — зміна електрич-

ного поля лише із висотою та зміну в часі на певній фіксованій висоті.

Для моделювання використаємо теоретичні обґрунтування, викладені вище. Розглядаємо схожу до попереднього випадку модель атмосфери, яка передбачає дві провідні пластини (поверхня Землі та іоносфера). В одновимірному випадку можемо замінити сферичний конденсатор плоским. На одну з поверхонь вносимо у момент часу $t = 0$ певний одиничний заряд, який створить напруженість поля E_0 . Далі, використовуючи отримані нами формули (14), (15), які описують висотну і часову зміну квазіелектростатичного поля, отримаємо залежність висотного профілю напруженості поля від часу (рис. 10). Маємо по осі абсцис нормовану на E_0 напруженість поля E , а по осі ординат відкладено висоту над рівнем моря в метрах. Верхня межа збігається із рівнем іоносфери. Приймались значення $\lambda_0 = 1.1 \cdot 10^{-13}$ См/м, $\alpha = 1/6000$ м.

Було отримано три криві для трьох моментів часу: 0.01, 1 і 100 с після внесення заряду. На даному графіку можна простежити, що електростатичне поле сильніше біля поверхні і слабше на більших висотах. Це пов'язано із внесеним поверхневим зарядом. Із плином часу електричне поле все більше наближається до стаціонарного («хорошої погоди») експоненційного розподілу.

Аналогічним чином з формул (14), (15) можна отримати часову динаміку напруженості електричного поля на певній висоті, фіксуючи значення h і варіюючи час. На рис. 11 по осі абсцис відкладено в логарифмічній шкалі час після внесення заряду, а по осі ординат — нормоване на E_0 значення напруженості поля. Залежність відображає зміну поля на висоті 50 км. Бачимо, що за проміжок часу порядку 200 мс напруженість поля спадає майже до нуля, що добре корелює з результатами спостережень. Отримані розрахунки є результатом аналітичної моделі.

Тепер звернемось до чисельної моделі, яка дається моделлю рухомого конденсатора. Було змодельовано ті ж самі залежності, що і у попередньому випадку з тими ж параметрами (рис. 10). У розрахунках висота іоносфери $D = 60$ км. Виділено дві області — вище і нижче ру-

хомої пластинки конденсатора та знайдено висотний профіль для моменту часу $t = 0.01$ с після внесення заряду. Як бачимо, отриманий профіль дуже близький до отриманого раніше для часу $t = 0.01$ с. Як «Конденсатор» позначено профіль, отриманий чисельно в моделі рухомого конденсатора.

Порівняння отриманих результатів показує добру загальну узгодженість результатів чисельного моделювання з використанням моделі рухомого конденсатора і аналітичного розв'язку. Різниця між отриманими результатами спричинена явним грубим наближенням чисельної моделі, яке полягає у тому, що модель розглядає перехід між областями висхідного і низхідного струмів як різку межу.

ВИСНОВКИ

В даній роботі проаналізовано класифікацію та умови виникнення швидкоплинних оптичних явищ в атмосфері, а саме: спрайтів, ельфів, блакитних джетів та блискавок вгору. Знайдено, що необхідною умовою виникнення спрайтів є позитивний грозовий розряд з позитивно зарядженої верхівки хмари до поверхні Землі (+CG-розряд). Але ця умова не є достатньою. У певній частині випадків спрайти не спостерігаються над такими розрядами. Достатні умови є досі не з'ясованими і потребують подальших спостережень, як наземних, так і космічних. Сказане в однаковій мірі стосується і інших явищ, оскільки всі вони є ще мало вивченими.

Крім того, в рамках роботи виконано моделювання просторового розподілу квазіелектростатичних полів системи грозових зарядів із використанням моделі Вілсона. Отриманий розподіл досить добре описує реальну ситуацію в нижній атмосфері [11].

Отримано висотні профілі напруженості електричного поля в різні моменти часу. Із порівняння результатів добре видно, що чисельна модель рухомого конденсатора є явно більш грубою, хоч і добре узгоджується із результатами, отриманими з аналітичної моделі. Обмеження моделі рухомого конденсатора зумовлене тим, що межа розподілу між висхідними і низхідними струмами вважається різкою площиною.

Одержані результати моделювання електростатичних полів можуть бути використані для чисельного моделювання власне спрайтів та джетів, оскільки знайдені конфігурації електростатичного поля є середовищем, в якому зароджуються і розвиваються ці процеси.

1. *Атмосфера*: справочник. — Л.: Гидрометеоздат, 1991. — 509 с.
2. *Barrington-Leigh C. P., Inan U. S., Stanley M., et al.* Sprites directly triggered by negative lightning discharges // *Geophys. Res. Lett.* — 1999. — **26**. — P. 3605–3608
3. *Blanc E., Farges T., Roche R., et al.* Nadir observations of sprites from the International Space Station // *J. Geophys. Res.* — 2004. — **109A**, N 2. — doi:10.1029/2003JA009972.
4. *Boccippio D. J., Williams E. R., Heckman W. A., et al.* Sprites, ELF transients, and positive ground strokes // *Science.* — 1995. — **269**. — P. 1088.
5. *Cho M., Rycroft M. J.* Computer simulation of the electric field structure and optical emission from cloud-top to the ionosphere // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* — 1998. — **60**. — P. 871–888.
6. *Fukunishi H., Takahashi Y., Kubota M., et al.* Elves, lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere // *Geophys. Res. Lett.* — 1996. — **23**. — P. 2157–2160.
7. *Füllekrug M., Mareev E. A., Rycroft M. J.* Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges // *Phys. and Chemistry, II Mathematics*, 2006, 5-42
8. *Greifinger C., Greifinger P.* Transient ULF electric and magnetic fields following a lightning discharge // *J. Geophys. Res.* — 1976. — **81**. — P. 2237.
9. *Hale L. C., Baginski M. E.* Current to the ionosphere following a lightning stroke // *Nature.* — 1987. — **329**. — P. 814.
10. *Harrison R. G., Carslaw K. S.* Ion-aerosol-cloud processes in the lower atmosphere // *Rev. Geophys.* — 2003. — **41**. — P. 227.
11. *Illingworth A. J.* Electric field recovery after lightning as the response of the conducting atmosphere to a field change // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* — 1972. — **98**. — P. 604.
12. *Inan U. S., Sampson W. A., Taranenko Y. N.* Space-time structure of lower ionospheric optical flashes and ionization changes produced by lightning EMP // *Geophys. Res. Lett.* — 1996. — **23**. — P. 1017.
13. *Lyons W. A., Nelson T. E., Armstrong R. A., et al.* Upward electrical discharges from the tops of thunderstorms // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* — 2003. — **84**. — P. 445–454.
14. *Lyons W. A., Nelson T., Williams E. R., et al.* Characteristics of sprite-producing positive cloud-to-ground lightning during the 19 July STEPS mesoscale convec-

- tive systems // *Mon. Weather. Rev.* — 2003. — **131**. — P. 2417—2427.
15. *Mazur V., Shao X.-M., Krehbeil P. R.* «Spider» lightning in intracloud and positive cloud-to-ground flashes // *J. Geophys. Res.* — 1998. — **103**. — P. 19811—19822.
16. *Nagano I., Yagitani S., Miyamura K., et al.* Full-wave analysis of elves created by lightning-generated electromagnetic pulses // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* — 2003. — **65**. — P. 1024—1082.
17. *Pasko V. P., Inan U. S., Bell T. F., Taranenko Y. N.* Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower atmosphere // *J. Geophys. Res.* — 1997. — **102**. — P. 4529.
18. *Pasko V. P., Stanley M. A., Mathews J. D., et al.* Electrical discharge from a thunderstorm top to the lower ionosphere // *Nature*. — 2002. — **416**. — P. 152—154.
19. *Rycroft M. J., Israelsson S., Price C.* The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* — 2000. — **62**. — P. 1563—1576.
20. *Sentman D. D., Wescott E. M.* Red sprites and blue jets: Thunderstorm-excited optical emissions in the stratosphere, mesosphere, and ionosphere // *Phys. Plasmas*. — 1995. — **2**. — P. 2514.
21. *Uman M. A.* The Earth and its atmosphere as a leaky spherical capacitor // *Amer. J. Phys.* — 1974. — **42**. — P. 1033.
22. *Wescott E. M., Sentman D. D., Heavner M. J., et al.* Blue starters, brief upward discharges from an intense Arkansas thunderstorm // *Geophys. Res. Lett.* — 1996. — **23**. — P. 2153.
23. *Wescott E. M., Sentman D. D., Heavner M. J., et al.* Observations of «columniform» sprites // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* — 1998. — **60**. — P. 733—740.
24. *Wescott E. M., Sentman D. D., Stenbaek-Nielsen H. C., et al.* New evidence for the brightness and ionisation of blue starters and blue jets // *J. Geophys. Res.* — 2001. — **106**. — P. 21549—21554.

Надійшла до редакції 01.10.09

O. V. Shuyenko, L. V. Kozak, V. M. Ivchenko

TRANSIENT LUMINOUS EVENTS DURING THUNDERSTORMS AND THE SIMULATION OF ELECTRIC FIELDS IN THE LOWER ATMOSPHERE

We give a general overview and analysis of conditions for the occurrence of transient luminous events in the atmosphere, namely, termed sprites, elves, jets, and lightnings up. The main features of their appearance and manifestations were obtained. Quasielectrostatic fields of the system of thundercloud charges with the use of the Wilson model were simulated. It is found that in the lower atmosphere the decreasing length for the electrostatic field created by a thundercloud is about 10 km. This result is in good agreement with direct measurements. The spatial and temporal dynamics of an electric field in the Earth-ionosphere system was simulated. The derived results were compared with the analytic solution. Our electric field consideration can be used for further simulation of sprites and jets.

УДК 681.7

**Б. И. Беляев, Л. В. Катковский, Ю. А. Крот, А. В. Роговец,
В. А. Сосенко, С. В. Хвалей, А. Д. Хомицевич**

Науково-дослідна установа «Інститут прикладних фізичних проблем ім. А. Н. Севченка»
Білоруського державного університету

ОПТИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «ДИАГНОСТИКА»

Описується склад і будову блоку оптичних давачів, призначеного для реєстрації просторово-часових розподілів та зображень різних оптичних явищ і ефектів природного та техногенного походження у верхній атмосфері Землі, що розробляється для використання на борту міжнародної космічної станції у рамках космічного експерименту «Діагностика».

В настоящее время можно считать достаточно надежно установленными как сам факт воздействия различных естественных и техногенных источников возмущений на атмосферу и ионосферу Земли, так и физические механизмы некоторых из этих воздействий.

Международная космическая станция (МКС) осуществляет свой полет на высотах до 450 км в ионосфере Земли, которая является чувствительным индикатором гелиогеофизических явлений, т. е. явлений, происходящих в системе «Солнце—Земля» и в системе «литосфера — атмосфера». Воздействие солнечных активных процессов — вспышек и выбросов плазмы — сильно влияет на состояние ионосферы, вызывая нарушение радиосвязи, флуктуации сигналов навигационных систем типа ГЛОНАСС и GPS, «разбухание» атмосферы и аномальное торможение МКС и спутников в периоды магнитных бурь. Активные литосферные процессы — процессы подготовки землетрясений, цунами, извержения вулканов и др. также имеют свои проявления в ионосфере, которые в последнее время активно изучаются для поиска предвестников землетрясений и их диагностирования. Кроме этого, в ионосфере регистрируются результаты антропогенной деятельности — электромагнитная загрязненность промышленных регионов, сигналы от много-

численных вещательных станций, исследовательских нагревных установок (например, российская «Сура» и американская HAARP).

В рамках научно-технической программы Союзного государства Беларуси и России «Разработка базовых элементов, технологий создания и применения орбитальных и наземных средств многофункциональной космической системы» («Космос-НТ») в 2008 г. совместно с ИЗМИРАН начата разработка оптико-радиофизического комплекса ОРФК для космического эксперимента (КЭ) «Диагностика» на борту Российского сегмента (РС) МКС, ориентированного на космический мониторинг околоземной среды и эффектов природных и техногенных воздействий. В НИИ прикладных физических проблем Белгосуниверситета разрабатывается и создается оптический модуль (МО) ОРФК.

Наряду с измерениями вариаций электронной концентрации в ионосфере в последнее время интенсивно развиваются спектрометрические методы измерения электромагнитных излучений на борту КА в широком частотном диапазоне. Эти измерения дают информацию о процессах генерации и распространения электромагнитных шумов в космической плазме, о структурных параметрах ионосферной плазмы, что необходимо для следующих научно-практических задач:

- глобальный мониторинг ионосферы для изучения структуры и динамики ионосферы для уточнения моделей;

© Б. И. БЕЛЯЕВ, Л. В. КАТКОВСКИЙ, Ю. А. КРОТ,
А. В. РОГОВЕЦ, В. А. СОСЕНКО, С. В. ХВАЛЕЙ,
А. Д. ХОМИЦЕВИЧ, 2010

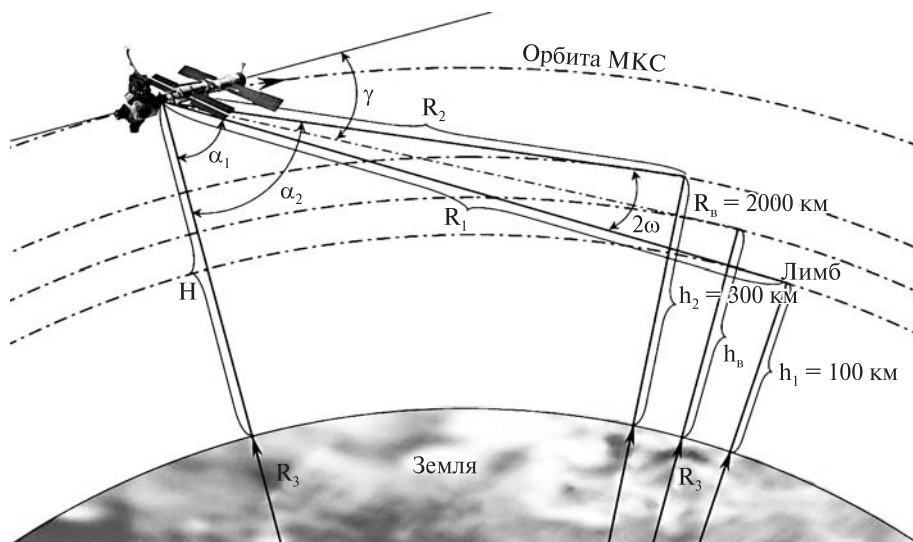


Рис. 1. Схема проведения КЭ «Диагностика»

- обнаружение аномальных явлений и характерных признаков изменений в ионосфере, обусловленных процессами подготовки землетрясений и техногенными воздействиями;
- отработка технических средств и методов мониторинга природных и техногенных катастроф с борта МКС.

Активные эксперименты в ионосфере Земли, в первую очередь с использованием мощных наземных КВ-передатчиков (специализированных радиостендов), являются одними из наиболее приоритетных и охватывают такие области исследований, как физика и динамика околоземной плазмы, механизмы ее турбулизации, химические и оптические процессы в верхней атмосфере Земли, распространение радиоволн различных диапазонов и т. д. [4]. Одним из наиболее эффективных методов диагностики эффектов воздействия «нагревных» станций на ионосферу являются оптические и радиофизические наблюдения с борта космических аппаратов. Однако такие наблюдения до сих пор носят эпизодический характер из-за отсутствия специализированных бортовых комплексов.

Оптический модуль ОРФК предназначен для проведения исследований по следующим направлениям: исследование ночного свечения атмосферы; исследование оптических явлений, связанных с высотными электрическими разрядами;

исследование оптических явлений, связанных с воздействием мощных радиоволн на ионосферу.

Оптические измерения необходимо проводить в направлении лимба (рис. 1) вдоль касательной к излучающему слою с разрешением около 1 км для получения высотных профилей в заданном диапазоне высот. При такой геометрии эксперимента регистрируемая интенсивность эмиссий будет примерно в 50 раз больше, чем в надире, вследствие интегрирования вдоль луча зрения на длине порядка 500 км и более.

МО состоит из блока оптических датчиков (БОД) и блока сбора информации (БСИ). Предполагается размещать МО БОД ОРФК вне герметичного объема МКС, а БСИ внутри РС МКС.

Блок оптических датчиков состоит из системы пространственного сканирования (СПС) и трех датчиков: датчика вертикальных распределений (ДВР); датчика регистрации изображений (ДРИ); датчика гидроксильных свечений (ДГС) (рис. 2).

Система пространственного сканирования предназначена для наведения полей зрения оптических модулей на объект.

Датчик вертикальных распределений предназначен для регистрации пространственно-временных распределений эмиссий атомарного кислорода на длинах волн λ 557.7 нм (на высотах 110–130 км), λ 630.0 нм (на высотах 290–

320 км), азота на длине волны λ 427.8 нм и во всем спектральном диапазоне чувствительности фотоприемной линейки 0.35–1.05 мкм.

Датчик вертикальных распределений состоит из проекционного объектива, турели со сменными интерференционными светофильтрами и приемника излучения – линейки ПЗС с числом элементов не менее 3648.

Поле зрения объектива и размер приемной линейки обеспечивают регистрацию указанных линий эмиссий атомарного кислорода и азота при наблюдении в лимб Земли на высотах от горизонта до 350 км. Оперативная замена спектральных зон в зависимости от решаемых задач обеспечивается применением управляемой контроллером турели с установленными узкополосными интерференционными светофильтрами. ДВР с помощью специального программного обеспечения (СПО) имеет возможность управлять СПС для удержания (отслеживания) в поле зрения БОД либо первого (зеленая линия λ 557.7 нм), либо второго (красная линия λ 630.0 нм) эмиссионного слоя атмосферы Земли.

Датчик регистрации изображений предназначен для регистрации спектрозональных изображений эмиссий, связанных с высотными электрическими разрядами и воздействием мощных радиоволн на ионосферу в широком диапазоне высот у лимба Земли. ДРИ состоит из проекционного объектива, турели со сменными светофильтрами и приемника излучения – ПЗС-матрицы с числом элементов не менее 1000×1000 .

Датчик гидроксильных свечений предназначен для регистрации спектрально-временного и пространственного распределения ночных свечений гидроксильных эмиссий и эмиссий, связанных с высотными электрическими разрядами на высотах от 90 до 300 км. ДГС состоит из проекционного объектива, полихроматора и приемной матрицы размером 2048×250 элементов и позволяет получать спектр высокого разрешения в диапазоне 0.35–1.05 мкм и спектральное распределение эмиссий по высоте входной щели полихроматора (250 элементов). За счет движения МКС по орбите ДГС позволяет получать изображения эмиссий лимба Земли в 2048 спектральных каналах.

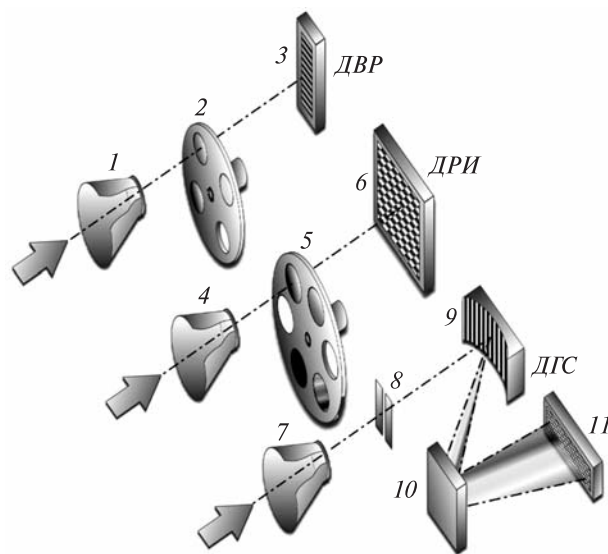


Рис. 2. Оптико-кинематическая схема блока оптических датчиков оптического модуля ОРФК: 1, 4, 7 – входные объективы с блендами; 2 – турель ДВР с шаговым двигателем и интерференционными фильтрами ($\lambda\lambda$ 557.7, 630.0, 427.8 нм, без фильтра); 3 – приемная линейка 3648 элементов; 5 – турель ДРИ ($\lambda\lambda$ 650–750 нм – «Спрайт», $\lambda\lambda$ 390–430 нм – «Джет», «Эльф», λ 868.0 нм – «Молния»; мозаичный фильтр: $\lambda\lambda$ 557.7–630.0–427.8 нм – «Воздействие мощных радиоволн на ионосферу»; без фильтра); 6 – приемная матрица 1000×1000 элементов; 8 – узел входной щели полихроматора ДГС; 9 – диспергирующий элемент; 10 – поворотное зеркало; 11 – приемная матрица полихроматора 2048×250 элементов

Блок сбора информации состоит из портативного компьютера типа Notebook и блока сопряжения, включающего контроллер USB-Ethernet, контроллер телеметрии, контроллер команд системы управления бортовой аппаратурой (СУБА). Блок питания БСИ обеспечивает тестирование и управление режимами работы оптических датчиков и СПС, записи данных и служебной информации, взаимодействие БОД со служебными системами РС МКС.

Оптическое свечение атмосферы представляет собой люминесценцию атмосферных составляющих на высотах от 80 до 300 км. Спектр свечения является довольно сложным и состоит из большого числа линий и полос в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра, а также слабого непрерывного спектра – кон-

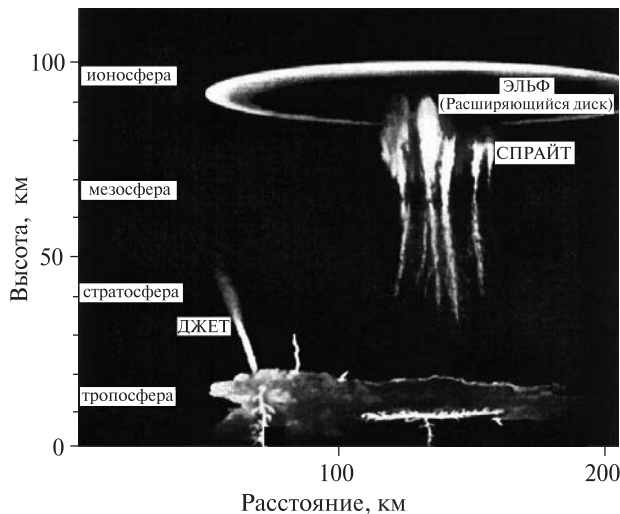


Рис. 3. Спрайт, джет и другие свечения, сопровождающие направленные вверх разряды молний в атмосфере

тинуума. Каждый газ имеет один или несколько максимумов свечения на характерных для него высотах. Полосы излучения гидроксила вносят наибольший вклад в общую энергию свечения атмосферы.

В работах [5, 6, 12] для среднеазиатской сейсмической зоны был осуществлен анализ характеристик собственного свечения ночной атмосферы в линиях кислорода [OI] $\lambda\lambda$ 557.7 и 630.0 нм, натрия Na λ 589.3 нм и полосах гидроксила OH (8–3) в связи с сейсмической активностью. В результате было показано, что в период подготовки и развития землетрясений в указанных эмиссиях наблюдаются возмущения различных временных масштабов. В частности, для эмиссии 557.7 нм по большой статистике было установлено увеличение интенсивности свечения за сутки до землетрясений [5], существенное увеличение эмиссии 557.7 нм может иметь место также за 2 сут до землетрясений, с резким уменьшением ее в последующие после землетрясений сутки.

Результаты измерений в девяностых годах привели к обнаружению неизвестных ранее видов грозовых разрядов и сопровождающих их оптических свечений, а также новых процессов, обусловленных обычными молниями [9–11, 13, 17, 19–25]. Обнаруженные процессы прямо-

го воздействия атмосферного электричества на ионосферную плазму, представляющие собой вертикальные разряды от грозовых облаков до мезосферы и нижней ионосферы, проявляются в виде ярких локализованных кратковременных вспышек красных свечений атмосферы над грозовыми фронтами (красный спрайт) и голубых свечений (голубой джет).

Существенный интерес приобрел предсказываемый теорией новый механизм возбуждения свечений – «пробой на убегающих электронах» [14]. Это явление в атмосфере связано с генерацией вторичных электронов, появляющихся в результате ионизации быстрыми убегающими электронами нейтральных молекул [1, 7, 8, 15, 16, 18].

На рис. 3 представлена идеализированная картина всей совокупности наблюдаемых явлений (спрайта, джета и эльфы), порождаемых молниевым разрядом. Рисунок отражает высотную структуру и пространственные размеры указанных явлений.

Таким образом, механизмы образования высотных разрядов экспериментально пока не изучены, как и соответствующие им процессы в ионосфере и магнитосфере Земли. Поэтому в настоящее время актуальны экспериментальные исследования оптических излучений над грозовыми очагами, изучение форм проявления атмосферных разрядов, направленных вверх до высот нижней ионосферы.

Для всех датчиков БОД были проведены энергетические расчеты с использованием полученных уравнений [2, 3], главной целью которых была оценка чувствительности датчиков и возможности регистрации исследуемых свечений ионосферы. Расчет времени экспозиции τ для заданного отношения сигнал/шум осуществлялся из полученного выражения:

$$S/N = \frac{I_c \cdot \tau \cdot T_{\text{общ}}}{\left[I_c \tau T_{\text{общ}} + I_{\text{темн}} \tau T_{\text{общ}} + N_{\text{сч}}^2 \right]^{1/2}}, \quad (1)$$

в котором $I_{\text{темн}}$ — темновой ток на пикселе приемника (эл./пкл \cdot с $^{-1}$), $N_{\text{сч}}^2$ — шум считывания (эл./пкл), $T_{\text{общ}}$ — общая функция передачи модуляции, I_c — ток полезного сигнала. Для фильтровых датчиков ДВР и ДРИ I_c определяется согласно выражениям

$$I_c = \frac{1}{16} N_0 P_{\lambda} \varepsilon_{\text{вх}}^2 \tau_{\text{вх}} \tau_{\lambda}^{\phi} (a \cdot b) Q_{\lambda} = \frac{1}{16} N_0 P_{\lambda} \varepsilon_{\text{вх}}^2 \tau_{\text{вх}} \tau_{\lambda}^{\phi} \frac{S_{\lambda} h c \tau_i}{e \lambda R_{\text{н}}}, \quad (2)$$

которые позволяют рассчитывать ток полезного сигнала как через квантовую эффективность Q_{λ} , так и через спектральную чувствительность матрицы S_{λ} . В этих выражениях $\varepsilon_{\text{вх}}$ — относительное отверстие, $\tau_{\text{вх}}$ и τ_{λ}^{ϕ} — коэффициенты пропускания входного объектива и фильтра, a , b — размеры пикселя приемника по горизонтали и вертикали, фотонная светимость источника P_{λ} (в Рэлях) вычислена для соответствующего спектрального диапазона с учетом полуширины фильтра, λ обозначает регистрируемую линию излучения, константа $N_0 = 10^6$ (фот. · с⁻¹ · см⁻²), определяющая 1 Рэлей, h — постоянная Планка, c — скорость света, e — заряд электрона, τ_i — время интегрирования сигнала при измерениях электрооптических характеристик чувствительности, $R_{\text{н}}$ — нагрузочное сопротивление приемника. Аналогичные выражения получены для датчика ДГС [3].

Оценочные расчеты по формулам (1), (2) для приемной линейки ДВР Toshiba TCD1304DG (интегральная чувствительность 160В/(лк·с)) приводят к значениям времени экспозиции для регистрации зеленой линии кислорода λ 557.7 нм менее 0.1 с при отношениях сигнал/шум порядка 5—10. Для более слабой по интенсивности красной линии кислорода 630 нм времена экспозиции должны быть на порядок выше.

В качестве приемника изображений в ДРИ предлагается использовать ПЗС камеру с электронным умножением Hamamatsu C9100-02, имеющую максимальное электронное усиление 2000 раз. Использование в данном датчике короткофокусного объектива с фокусным расстоянием 20 мм сформирует поле зрения 23°, что на расстоянии порядка 2000 км (наблюдение в лимб) покрывает область наблюдения размером 800 × 800 км. Оценка тока полезного сигнала по формуле (2) дает значение 2 эл./с для спрайта с яркостью 500 Рэлей (диапазон яркостей спрайтов 50 Рэлей — 600 килоРэлей), что с учетом шума считывания менее 1 е⁻ и электронного уси-

ления позволяет регистрировать такие спрайты при отношении $S/N > 3$.

Датчик гидроксильных свечений (ДГС) представляет собой видеоспектрометр, включающий полихроматор на видимую и ближнюю ИК-область спектра и матричный приемник излучения размером 2048 × 250 элементов (2048 спектральных пикселей и 250 — пространственных, фотоприемник Hamamatsu S10140), позволяющий получать как детальную спектральную структуру колебательно-вращательных полос, так и высотное распределение эмиссии.

Расчеты времени экспозиции для ДГС приводят к значению порядка 20 с, что неприемлемо ввиду высокой скорости полета станции и получаемого грубого усреднения по пространству в направлении, касательном к лимбу. С целью увеличения отношения сигнал/шум и уменьшения времени экспозиции предлагается использовать режим биннинга пикселей в спектральном направлении (вдоль строк матрицы) с объединением 5 пкп в один, что не ухудшит спектрального разрешения канала. Время экспозиции для $SNR = 3$ при биннинге по 5 пикселям составляет 4 с. При этом достигается выигрыш для групп пикселей, на которые проецируются колебательно-вращательные линии гидроксила.

Таким образом, основными ожидаемыми результатами проведения КЭ «Диагностика» являются:

- измерение оптических и плазменных параметров атмосферы и ионосферы в высотном диапазоне 90—400 км и их мониторинг в зависимости от характера и интенсивности различных источников воздействия;
- обработка технических средств и методов мониторинга околоземного космического пространства, в том числе эффектов глобальных и региональных возмущений параметров атмосферы и ионосферы Земли вследствие природных и техногенных катастроф.

Сочетание оптической и радиофизической аппаратуры позволит существенно повысить информативность данных в КЭ «Диагностика» при наблюдениях атмосферы в различных диапазонах спектра с МКС.

Основной эффект от выполнения КЭ «Диагностика» будет связан с получением новых зна-

ний о физических параметрах атмосферы Земли на высотах от 90 до 400 км и возможностью предсказания землетрясений и некоторых типов техногенных катастроф с помощью регистрации свечений.

1. *Бабич Л. П., Лойко Т. В., Цукерман В. А.* Высоковольтный наносекундный разряд в плотных газах при больших перенапряжениях, развивающийся в режиме убегания электронов // Успехи физ. наук. — 1990. — **160**, № 7. — С. 49.
2. *Беляев Б. И., Катковский Л. В.* Оптическое дистанционное зондирование. — Минск: БГУ, 2006. — 455 с.
3. *Беляев Б. И., Катковский Л. В., Хвалей С. В.* Расчет параметров спектрофотометрического комплекса для измерения яркости свечений верхней атмосферы из космоса // Журн. прикл. спектр. — 2008. — **75**, № 1. — С. 125—133.
4. *Гуревич А. В.* Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физ. наук. — 2007. — **177**, № 11. — С. 1145—1177.
5. *Коробейникова М. П., Кулиева Р. Н., Гошджанов М. и др.* // Полярные сияния и свечения ночного неба. — 1989. — № 33. — С. 24—27.
6. *Фишкова Л. М., Торошелидзе Т. И.* // Полярные сияния и свечения ночного неба. — 1989. — № 33. — С. 17—23.
7. *Babich L. P., et al.* New data on space and time scales of relativistic runaway electron avalanche for thunderstorm environment: Monte Carlo calculations // Phys. Lett. — 1998. — **A245**. — P. 460.
8. *Bethe H. A.* Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskularstrahlen durch Materie // Ann. Physik. — 1930. — **5**. — P. 325.
9. *Voccipio D. J. et al.* Sprites, ELF transients and positive ground strokes // Science. — 1995. — **269**. — P. 1088.
10. *Boeck W. L., Vaughan O. H., Blakeslee R.* Low Light Level TV Images of Terrestrial Lightning as Viewed from Space // EOS Trans. — 1991. — Aug. — **72**. — P. 171.
11. *Boeck W. L. et al.* Observations of lightning in the stratosphere // J. Geophys. Res. — 1995. — **100D**, N 1. — P. 1465.
12. *Fishkova L. M., Gokhberg M. B., Pilipenko V. A.* Relationship between night airglow and seismic activity // Ann. geophys. — 1985. — **3**, N 3. — P. 689—694.
13. *Franz R. C., Nemzek R. J., Winckler J. R.* Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system // Science. — 1990. — **249**. — P. 48—51.
14. *Gurevich A. V., Milikh G. A., Roussel-Dupre R.* Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm // Phys. Lett. — 1992. — **A165**. — P. 463.
15. *Gurevich A. V. et al.* Generation of electron-positron pairs in runaway breakdown // Phys. Lett. — 2000. — **A275**. — P. 101—108.
16. *Lehtinen N. G. et al.* A two-dimensional model of runaway electron beams driven by quasi-electrostatic thundercloud fields // Geophys. Res. Lett. — 1997. — **24**. — P. 2639.
17. *Lyons W. A.* Characteristics of luminous structures in the stratosphere above thunderstorms as imaged by low-light video // Geophys. Res. Lett. — 1994. — **21**. — P. 875.
18. *Roussel-Dupré R. A. et al.* Kinetic Theory of Runaway Air-Breakdown // Phys. Rev. — 1994. — **E49**, N 3. — P. 2257.
19. *Sentman D. D., Wescott E. M.* Observations of upper atmospheric optical flashes recorded from an aircraft // Geophys. Res. Lett. — 1993. — **20**. — P. 2857—2860.
20. *Sentman D. D. et al.* Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: 1. Red sprites // Geophys. Res. Lett. — 1995. — **22**, N 10. — P. 1205—1208.
21. *Vaughan O. H., Vonnegut B.* Recent observations of lightning discharges from the top of a thundercloud into the clear air above // J. Geophys. Res. — 1989. — **94**. — P. 13179—13182.
22. *Vaughan O. H. et al.* A cloud-to-space lightning as recorded by the Space Shuttle payload-bay TV cameras // Mon. Weather Rev. — 1992. — **120**. — P. 1459—1461.
23. *Wescott E. M. et al.* Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: 2. Blue jets // Geophys. Res. Lett. — 1995. — **22**, N 10. — P. 1209—1212.
24. *Winckler J. R., Franz R. C., Nemzek R. J.* Fast low-level light pulses from the night sky observed with the SKYFLASH program // J. Geophys. Res. — 1993. — **98**. — P. 8775—8783.
25. *Winckler J. R. et al.* New high-resolution ground-based studies of sprites // J. Geophys. Res. — 1996. — **101**. — P. 6997.

Надійшла до редакції 01.10.09

B. I. Belyaev, L. V. Katkovskii, Yu. A. Krot, A. V. Rogovets, V. A. Sosenko, S. V. Khvalei, A. D. Khomitsevich

OPTICAL EQUIPMENT FOR THE SPACE EXPERIMENT «DIAGNOSTICS»

We describe the constitution and arrangement of the optical sensor unit for the detection of spatial-temporal distributions and images of various optical phenomena and effects of native actions and actions caused by technological activities of people in the upper Earth's atmosphere. The optical sensor unit is developed to be used aboard the International Space Station within the framework of the space experiment «Diagnostics».

УДК 535.243.2+681.7

**Б. И. Беляев, Ю. В. Беляев, А. В. Домарацкий, Л. В. Катковский,
Ю. А. Крот, А. В. Роговец, С. В. Хвалей**

Науково-дослідна установа «Інститут прикладних фізичних проблем ім. А. Н. Севченка»
Белоруського державного університету

ФОТОСПЕКТРАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «УРАГАН»

Описується будова і робота фотоспектральної системи, розробленої і створеної для використання на борту міжнародної космічної станції у рамках космічного експерименту «Ураган». Приводяться розрахунки оптичних параметрів і результати лабораторних випробувань фотоспектральної системи, вимірювань її характеристик і калібровок.

ВВЕДЕНИЕ

Природные и техногенные катастрофы в различных регионах планеты, последствия чрезвычайных ситуаций (ЧС) требуют контроля как наземными, так и космическими системами наблюдения. Мониторинг опасных процессов и явлений в окружающей среде, проводимый по определенной программе из космоса методами дистанционного зондирования (ДЗ), даст возможность не только фиксировать ЧС и другие природные и антропогенные явления, но и прогнозировать их развитие, позволит снижать наносимый ими ущерб.

Основными целями космического эксперимента «Экспериментальная отработка наземно-космической системы мониторинга и прогноза природных и техногенных катастроф» (шифр «Ураган») являются: отработка методов визуальных наблюдений и регистрация с борта СМ РС МКС катастрофических явлений и их предвестников на Земле; разработка критериев классификации и дешифрирования признаков катастрофических явлений.

Конечная цель научной программы «Ураган» — выработка требований к наземно-космической системе предупреждения катастроф.

В результате реализации эксперимента «Ураган» в период работы экспедиций МКС 8 —

МКС 13 на Землю доставлены десятки тысяч цифровых изображений подстилающей поверхности Земли. Получен огромный объем информации, широко освещенный в научной печати [4–6]. Передача снимков через российский и американский каналы связи, а также доклады в сеансах связи о наблюдаемых катастрофических явлениях давали объективную информацию по оперативным задачам регистрации стихийных бедствий и состояния природной среды. Очевидным недостатком эксперимента «Ураган» в теперешнем виде остается его устаревшее техническое оснащение (главный инструмент — фотоаппаратура, получаемые данные — фотографии). Для развития методов мониторинга было принято решение о расширении состава оборудования.

В НИИ прикладных физических проблем Белгосуниверситета совместно с Институтом географии РАН разработана и изготовлена фотоспектральная система для установки на Российском сегменте МКС, предназначенная для регистрации спектров отраженного излучения подстилающих поверхностей в диапазоне длин волн 350–1050 нм, пространственно «привязанных» к цветным изображениям высокого разрешения.

Задачи, решаемые с использованием фотоспектральной системы (ФСС): выбор характерных спектральных зон для решения диагностических задач; определение ареала распространения «пылевых» бурь из района озера Арал;

© Б. И. БЕЛЯЕВ, Ю. В. БЕЛЯЕВ, А. В. ДОМАРАЦКИЙ,
Л. В. КАТКОВСКИЙ, Ю. А. КРОТ, А. В. РОГОВЕЦ,
С. В. ХВАЛЕЙ, 2010

Технические характеристики спектрорадиометра

Параметр		Значение параметра спектрорадиометра
Название	Обозначение	
Диаметр входного объектива	$D_{\text{вх}}$	48.2 мм
Фокусное расстояние входного объектива	$f_{\text{вх}}$	135 мм
Относительное отверстие вх. об.	$\epsilon_{\text{вх}}$	0.36 (1:2.8)
Среднее пропускание объектива	$\tau_{\lambda}^{\text{вх}}$	0.9
Спектральный диапазон	$\lambda_{\text{min}} - \lambda_{\text{max}}$	350—1050 нм
Спектральное разрешение	$\Delta\lambda$	3 нм
Размер пикселя	$\Delta a \times \Delta b$	8×200
Количество пикселей	N	3648 мкм
Ширина входной щели	$b_{\text{щ}}$	100 мкм
Средняя освещенность объекта,	E_{λ}	1.2 Вт/(м ² ·нм)
Средний коэффициент отражения объекта	ρ_{λ}	0.1
Средний коэффициент отражения решетки	$\rho_{\lambda}^{\text{реш}}$	0.9
Площадь дифракционной решетки	$A_{\text{реш}}$	56×56 мм
Плотность штрихов решетки	n	120 штр/мм
Период решетки	d	8.3 мкм
Радиус кривизны решетки	$R_{\text{реш}}$	250 мм
Расстояние от щели до решетки	r_a	282 мм
Обратная линейная дисперсия полихроматора	D_{λ}^{-1}	30 нм/мм
Охлаждение приемника		Нет (25 °С)
Максимальная спектральная чувствительность приемника	S_{max}	50000 В/(Дж/м ²)
Пороговая чувствительность приемника (не хуже)	$B_{\lambda}^{\text{пор}}$	$5 \cdot 10^{-5}$ Вт/(см ² ·мкм·ср)
Среднее темновое напряжение	V_d	2 мВ (при $t = 25^{\circ}\text{C}$)
Средний шум считывания	N_r	$8 e^-/\text{пкл}$
Среднее напряжение (ток) полезного сигнала (входного потока излучения)	$U_s (I_s)$	16 мВ ($10^{12} e^-/с$)
Время экспозиции для отношения сигнал/шум $S/N = 50$	τ	< 1 мс
Напряжение насыщения	V_{sat}	600 мВ
Динамический диапазон CCD/МС	DR	300/24 дБ
Экспозиция насыщения		0.004 Лк·с
Выходной импеданс приемника	R_{out}	100 кОм

определение масштабов загрязнений (мониторинг объектов промышленной разработки и транспортировки нефти, зимний мониторинг индустриальных городов); регистрация темпов движения «зеленой волны» — фронта и тыла весеннего снеготаяния; исследование динами-

ки изменения ландшафта (зарастание пахотных земель, техногенное воздействие на природную среду); исследование крупных лесных массивов по определению породного состава; получение эталонных данных участков земной поверхности с различной растительностью.

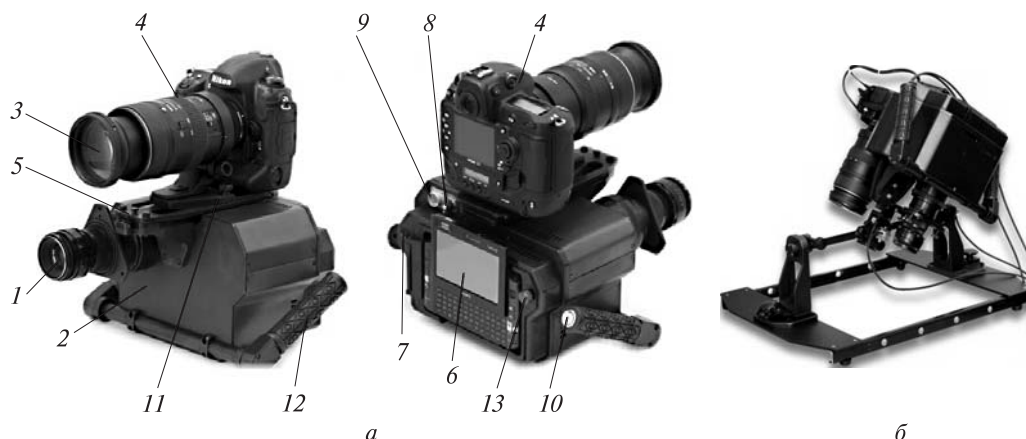


Рис. 1. Внешний вид ФСС в двух ракурсах (а) и на кронштейне (б) для иллюминатора МКС с датчиками углов поворота: 1 – объектив МС, 2 – МС, 3 – объектив МРИ, 4 – МРИ, 5 – юстировочное устройство МРИ, 6 – планшетный компьютер МЭ, 7 – кнопка включения МС, 8 – разъем подключения МРИ, 9 – разъем подключения датчиков углов поворота кронштейна к МЭ, 10 – кнопка «Пуск», 11 – кронштейн крепления МРИ, 12 – ручка с изменяемым положением, 13 – винт доступа к отсеку питания

СОСТАВ И УСТРОЙСТВО ФОТОСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Фотоспектральная система конструктивно выполнена в виде компактного переносного модуля (рис. 1), который включает:

- модуль спектрорадиометра (МС), состоящий из проекционного (входного) объектива, полихроматора, контроллера;
- модуль регистрации изображения (МРИ), в качестве МРИ используется цифровой фотоаппарат Nikon D3 с объективом Nikon AF VR-Nikkor 80–400 mm f/4.5–5/6 D;
- модуль электроники (МЭ), представляющий собой планшетный компьютер (ПК) типа Sony VAIO VGN-UX390N.

Цифровой фотоаппарат МРИ оснащен сенсором типа КМОП (CMOS) размером 36×23.9 мм. Разрешающая способность этого сенсора определяется количеством 4288×2848 элементов (всего 12.21 Мпкл). Процесс регистрации данных с цифрового фотоаппарата осуществляется согласованно с процессом регистрации данных с МС во временных интервалах, заданных оператором в управляющей программе. Через меню управляющей программы оператор может задавать интервал съемки для МС и для МРИ, их временную привязку и количество требуемых снимков.

Модуль электроники обеспечивает: выдачу команд управления режимами работы МС и МРИ; прием служебной информации о режимах работы МС и МРИ; прием и хранение зарегистрированных данных от МС; прием, сжатие и хранение данных от МРИ, включая данные о дате и времени проведения съемки; выдачу информации о режимах работы ФСС на индикаторы контроля; выдачу зарегистрированных данных в бортовой компьютер поддержки научных экспериментов с записью на сменный жесткий диск; выполнение всех задач по обработке и хранению получаемых данных; управление работой ФСС в автоматическом режиме (без участия оператора) при размещении ФСС на кронштейне (ручной режим съемки осуществляется оператором с помощью встроенного ЖКИ-табло и клавиш управления).

Далее основное внимание будет уделено выбору и расчетам характеристик МС.

РАСЧЕТЫ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОДУЛЯ СПЕКТРОРАДИОМЕТРА ФОТОСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

При выборе оптической схемы МС были учтены поставленные требования: МС должен обеспечивать регистрацию не менее 1 спектра на кадр в диапазоне длин волн $\lambda\lambda$ 350–1050 нм со спек-

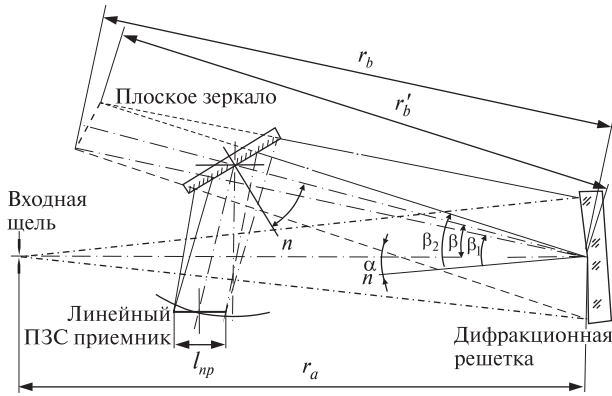


Рис. 2. Оптическая схема полихроматора МС ФСС

ральным разрешением не хуже 3÷5 нм; синхронизацию времени с бортовыми часами; приемник полихроматора спектро радиометра должен быть выполнен на основе ПЗС или фотодиодной линейки с числом элементов не менее 1024. Чувствительность спектро радиометра должна обеспечивать время интегрирования спектра не более 20 мс. Проекционный объектив МС должен обеспечивать спектро метрирование участка земной поверхности размером не более 400 × 1000 м с высоты орбиты 400 км.

В фокусе входного объектива МС находится щель полихроматора. В состав полихроматора входит вогнутая отражательная дифракционная решетка, формирующая изображение входной щели в плоскости фотоприемной линейки (рис. 2). Решетка выполняет функции коллиматора, диспергирующего элемента и камерного объектива одновременно. Размер и количество чувствительных элементов ПЗС линейки в направлении дисперсии полихроматора определяют ширину, число и локализацию спектральных рабочих интервалов.

Уровень светового сигнала на входе спектро радиометра будет определяться источником освещения, в качестве которого выступает естественное дневное освещение Солнцем, и спектральными коэффициентами отражения исследуемых объектов (подстилающих поверхностей).

Для полихроматора с вогнутой дифракционной решеткой важным параметром, определяющим как спектральное разрешение, так и энергетику спектро метра, является обратная линей-

ная дисперсия, для которой справедливо приближенное выражение

$$D^{-1} \equiv \frac{d\lambda}{dl} = \frac{1}{mnr_b} \cos \frac{(\beta_1 + \beta_2)}{2},$$

где λ — длина волны падающего излучения; l — расстояние в плоскости приемника, n — плотность штрихов решетки, m — порядок дифракции, β_1, β_2 — углы дифракции для длин волн начала и конца рабочего спектрального диапазона, r_b — расстояние от решетки до приемника (рис. 2).

Минимальная ширина щели $b_{щ}^{\min}$ не может быть меньше дифракционного предела объектива спектро метра, равного диаметру центрального кружка Эри, т. е.

$$b_{щ}^{\min} \geq d_{Э\text{ВХ}} = 2.44 \lambda_{\max} / \varepsilon_{\text{ВХ}}.$$

$\varepsilon_{\text{ВХ}} = D_{\text{ВХ}} / f_{\text{ВХ}}$ — относительное отверстие входного объектива, $D_{\text{ВХ}}$ — диаметр входного объектива, $f_{\text{ВХ}}$ — его фокусное расстояние.

Дифракционное рассеяние в плоскости ПЗС-приемника приводит к появлению оптической помехи со стороны соседнего спектрального канала. Поэтому ширина пикселя Δa должна быть не меньше диаметра $d_{Э\text{реш}}$ для дифракционной решетки, который составляет 5—12.5 мкм (в зависимости от λ). Если взять $\Delta a \geq 3 d_{Э\text{реш}}$, то взаимодействием соседних спектральных каналов можно пренебречь, поскольку в этом случае на пикселе будет сосредоточено не менее 90 % всей энергии светового пучка, соответствующего ширине пикселя Δa . При этом желательно, чтобы размеры щели $h_{щ}, b_{щ}$ удовлетворяли равенству

$$\sqrt{h_{щ} b_{щ}} = \Delta a r_a / r_b \approx \Delta a,$$

где r_a — расстояние от входной щели до плоскости решетки.

Ширина спектрального интервала, соответствующая выходной щели (пикселю) $\Delta \lambda_1 = \Delta a D^{-1}$ полихроматора, характеризует предельно достижимое спектральное разрешение спектро метра. Суммарную полуширину линии, регистрируемой спектро метром, в приближении гауссова профиля линии можно представить в виде

$$\Delta \lambda = \sqrt{\Delta \lambda_{щ}^2 + \Delta \lambda_{np}^2 + \Delta \lambda_{л}^2}.$$

Здесь $\Delta\lambda_{\text{ш}}$ — полуширина, обусловленная конечными размерами входной щели и пикселя фотоприемника, определяемая шириной большей из них, $\Delta\lambda_{\text{пр}}$ — полуширина предельного разрешения спектрометра, определяемая аберрациями и дифракцией, $\Delta\lambda_{\text{л}}$ — естественная полуширина спектральной линии; $\Delta\lambda_{\text{ш}} = \max(\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2)$, где $\Delta\lambda_1 = D^{-1}\Delta a$, $\Delta\lambda_2 = D^{-1}b'_{\text{щ}}$, $\Delta\lambda_{\text{пр}} = \lambda/N_{\text{реш}}$, $N_{\text{реш}}$ — общее число штрихов решетки, $b'_{\text{щ}}$ — ширина изображения входной щели в плоскости приемника. Для спектрорадиометра спектральная полоса пропускания может быть оценена по следующей формуле:

$$\Delta\lambda = \frac{b_{\text{щ}} \cos \alpha}{mnr_a}. \quad (1)$$

При энергетических расчетах рассматриваются, как правило, потоки энергии на отдельном пикселе приемника. Шумовой заряд пикселя (или количество шумовых электронов) складывается из нескольких составляющих. Наибольшие вклады дают три составляющие: фотонный (радиационный) шум принимаемого излучения, темновой (тепловой) шум и шум считывания.

Количество фотоэлектронов, образующих фотонный шум, флуктуирует, подчиняясь распределению Пуассона, в соответствии с которым количество шумовых фотонов в самом сигнале равно корню квадратному из числа падающих за время экспозиции τ фотонов. Темновой шум характеризуется средним квадратичным значением «шумовых» электронов $N_{\text{темн}}$, которое выражается через темновой ток $I_{\text{темн}}$ (в электрон/(пкл·с)): $N_{\text{темн}} = I_{\text{темн}} \tau$. Количество термоэлектронов также подчиняется распределению Пуассона. Шум считывания является комбинацией шумов компонентов системы, присущих процессу преобразования накопленного заряда ячейки в сигнал выходного напряжения, его усиления и последующего аналого-цифрового преобразования. Он выражается числом электронов на пиксель, возникающих при одном цикле считывания $N_{\text{сч}}$.

Запишем выражение для отношения сигнал/шум (SNR) приемной линейки полихроматора в виде [2]:

$$SNR = \frac{F_{\lambda}^{\text{пикс}} Q_{\lambda} \tau T_{\text{общ}}(\nu)}{\left[(F_{\lambda}^{\text{пикс}} + F_{\lambda}^{\text{б}}) Q_{\lambda} \tau T_{\text{общ}}(\nu) + I_{\text{темн}} \tau + N_{\text{сч}}^2 \right]^{1/2}}, \quad (2)$$

где $F_{\lambda}^{\text{пикс}}$ — падающий поток фотонов на приемнике (измеряемый в фот/(пкл·с)), Q_{λ} — квантовая эффективность, используемая в качестве характеристики чувствительности приемника, $F_{\lambda}^{\text{б}}$ — поток фотонов от фоновых помех (например, рассеянный свет), $T_{\text{общ}}(\nu)$ — функция передачи модуляции (ФПМ) прибора в целом, ν — пространственная частота, $T_{\text{общ}}(\nu)$ может быть найдена как произведение ФПМ отдельных звеньев системы: среды распространения излучения, входной оптики, фотоприемника и т. д. Поскольку мы рассматриваем основное энергетическое соотношение в плоскости фотоприемника (для отдельного пикселя), то вклады в ФПМ $T_{\text{общ}}(\nu)$ электронного тракта и приемной матрицы необходимо исключить. Поскольку атмосферная составляющая ФПМ для дальности видимости в 10 км и выше в среднем по спектру равно около 0,8, далее для простоты считаем ее равной 1. Выражение для общей ФПМ, входящей в (2), примет вид [8]

$$T_{\text{общ}}(\nu) = T_{\text{об}}(\nu) = \frac{2}{\pi} (\arccos \delta - \delta \sqrt{1 - \delta^2}),$$

при $\delta = \frac{\lambda f_{\text{вх}} \nu}{D_{\text{вх}}} \leq 1$.

Введем для удобства рассмотрения величину тока полезного сигнала (на пикселе), соответствующего регистрируемому излучению:

$$I_{\text{с}} = F_{\lambda}^{\text{пикс}} Q_{\lambda} T_{\text{общ}}(\nu). \quad (3)$$

Тогда уравнение (2) примет вид (для простоты опущен поток фоновых помех):

$$SNR = \frac{I_{\text{с}} \tau}{(I_{\text{с}} \tau + I_{\text{темн}} \tau + N_{\text{сч}}^2)^{1/2}}. \quad (4)$$

При спектрометрировании протяженного объекта, если входная щель полихроматора полностью заполнена его изображением, спектральную фотонную яркость входной щели $B_{\lambda}^{\text{ш}}$ можно выразить через фотонную спектральную яркость источника излучения B_{λ} (находящегося в бесконечности), относительное отверстие входного объектива и пропускание $\tau_{\text{вх}}$ следующим образом:

$$B_{\lambda}^{\text{ш}} = \frac{B_{\lambda} \tau_{\text{вх}} \varepsilon_{\text{вх}}^2}{4}, \quad (5)$$

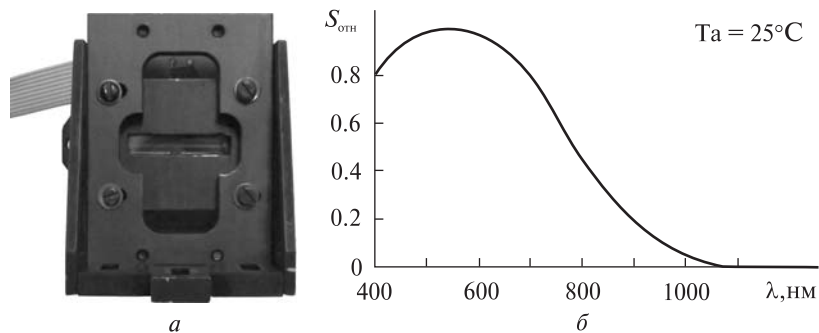


Рис. 3. Приемник излучения МС ФСС на базе ПЗС-линейки фирмы «Toshiba» (а) и его относительная спектральная чувствительность $S_{отн}$ (б)

Фотонный поток излучения $F_{\lambda}^{реш}$, падающий на дифракционную решетку в спектральном интервале $\Delta\lambda$ (спектральное разрешение спектро-радиометра), равен

$$F_{\lambda}^{реш} = B_{\lambda}^{ш} \Delta\lambda b_{ш} h_{ш} \frac{A_{реш}}{r_a^2}.$$

После решетки поток будет ослаблен потерями при отражении и дифракции, что учтем фактором эффективности решетки η_{λ} . Вогнутая отражательная решетка фокусирует изображение щели на приемник. Выходная щель, роль которой играет пиксель приемной матрицы, «вырезает» из спектра, соответствующего изображению щели, часть, пропорциональную площади пикселя $(\Delta a \Delta b)$ (Δb — вертикальный размер пикселя) [7]. Таким образом, поток излучения сплошного спектра на пикселе приемника будет равен [7, 8]:

$$F_{\lambda}^{пикс} = B_{\lambda}^{ш} \eta_{\lambda} \Delta\lambda \frac{A_{реш}}{r_a^2} b_{ш} h_{ш} \frac{\Delta a \Delta b}{b'_{ш} h'_{ш}}. \quad (6)$$

При этом предполагается, что абберационными и дифракционными расширениями изображения щели можно пренебречь, а в пределах ширины щели и пикселя спектральными изменениями величин $B_{\lambda}^{ш}$, η_{λ} , D^{-1} , а также чувствительности приемника можно пренебречь.

Подставляя в (6) выражения для размеров изображения щели $b'_{ш}, h'_{ш}$, полосы пропускания (1) и яркости щели (5), получаем

$$F_{\lambda}^{пикс} = \frac{B_{\lambda} \tau_{вх} \varepsilon_{вх}^2 \eta_{\lambda} A_{реш} b_{ш} (\Delta a \Delta b) \cos \beta}{4r_b^2 r_a m n}. \quad (7)$$

После подстановки (7) в (3) для величины тока полезного сигнала получаем

$$I_c = \frac{B_{\lambda} \tau_{вх} \varepsilon_{вх}^2 \eta_{\lambda} A_{реш} b_{ш} (\Delta a \Delta b) Q_{\lambda} \cos \beta}{4r_b^2 r_a m n} T_{общ} (v). \quad (8)$$

Уравнение (4) можно разрешить относительно времени экспозиции τ при заданных остальных параметрах:

$$\tau = \frac{SNR^2}{2I_c} \left[\left(1 + \frac{I_{темн}}{I_c} \right) + \sqrt{\left(1 + \frac{I_{темн}}{I_c} \right)^2 + \frac{4N_{сч}^2}{SNR^2}} \right],$$

Для используемого нами приемника «Toshiba TCD1304DG» известна относительная спектральная чувствительность (рис. 3), а также интегральная фотометрическая чувствительность $S^{\Phi} = 160 \text{ В/лк}\cdot\text{с}$.

Для получения квантовой эффективности приемника Q_{λ} , используемой в (8), выразим последнюю через интегральную фотометрическую чувствительность S^{Φ} , которая определяется выражением

$$S^{\Phi} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) S(\lambda) d\lambda / K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda, \quad (9)$$

где $\lambda_1 = 350 \text{ нм}$, $\lambda_2 = 1050 \text{ нм}$, $\Phi(\lambda)$ — спектр (излучательная способность) источника (в данном случае — флуоресцентная лампа дневного света), $V(\lambda)$ — относительная спектральная чувствительность стандартного глаза, $S(\lambda) = V_s / (E_{\lambda}^{пикс} \tau_c)$ — абсолютная радиометрическая спектральная чувствительность приемника, V_s — выходной сигнал (напряжение) приемника, $E_{\lambda}^{пикс}$ — освещенность приемника в спектральной полосе $\Delta\lambda$ пропускания, τ_c — время экспозиции при калибровке приемника.

Радиометрическую спектральную чувствительность можно представить в виде

$$S(\lambda) = S_{max} \cdot S_{отн}(\lambda),$$

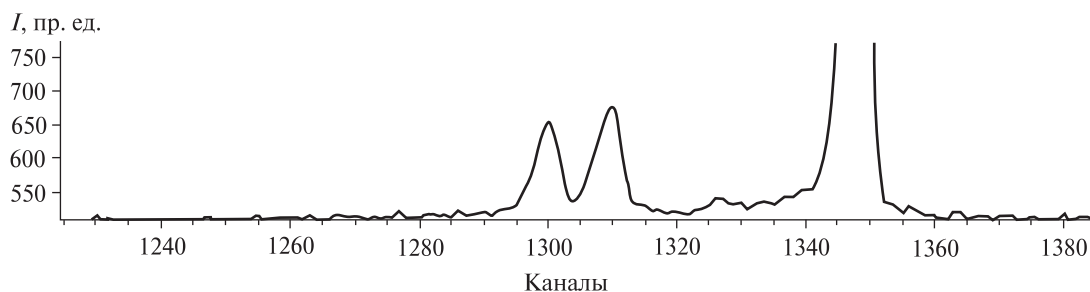


Рис. 4. Регистрация линий излучения ртути 577.0, 579.0 нм и гелия 587.6 нм

где $S_{\text{отн}}(\lambda)$ — относительная спектральная чувствительность приемной линейки (рис. 3).

Вычисления с использованием всех входящих в (9) спектральных функций и данных для S^{Φ} дают значение максимальной чувствительности приемника $S_{\text{max}} = 50000 \text{ В}/(\text{Дж}/\text{м}^2)$.

В соответствии с определениями чувствительности $S(\lambda)$ и квантовой эффективности Q_{λ} связь между ними выражается соотношением

$$Q_{\lambda} = \frac{hc\gamma}{\lambda(\Delta a \Delta b)} S(\lambda),$$

где h — постоянная Планка, c — скорость света, e — заряд электрона, $\gamma = \tau_c / (R_{\text{out}} e)$ — фактор конверсии величины напряжения в количество электронов, R_{out} — выходной импеданс приемника.

Исходные данные и дополнительные параметры, необходимые для расчета оптических характеристик спектрометра ФСС, а также параметры, полученные в результате настоящих расчетов, приведены в таблице.

Фотометрические градуировки ФСС были проведены на метрологическом комплексе «Камелия-М» [1] в НИИ ПФП БГУ. Фотометрическая градуировка ФСС выполнена по образцовому средству измерений спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) некогерентного оптического излучения сплошного спектра.

При фотометрических градуировках ФСС были определены: рабочий спектральный диапазон; пороговая чувствительность в пределах рабочего спектрального диапазона; динамический диапазон по световому потоку в пределах рабочего спектрального диапазона; верхний предел измерения спектральной плотности энергетической яркости в пределах рабочего спектраль-

ного диапазона; погрешности измерения спектральной плотности энергетической яркости в пределах рабочего спектрального диапазона.

Спектрометр хорошо разрешает линии излучения ртути (577.0 и 579.0 нм) (рис. 4), т. е. реальное спектральное разрешение не хуже 2 нм.

Поле зрения спектрометра в сагиттальной плоскости будет определяться высотой пикселя приемной линейки, так как высота щели полихроматора намного больше и составляет 4 мм. Для вогнутой сферической дифракционной решетки с радиусом кривизны 250 мм и расположением входной щели и приемной линейки приблизительно на круге Роуланда оно составляет 0.092° .

Вогнутые дифракционные решетки при такой оптической схеме полихроматора обладают астигматизмом, который не был указан в паспортных данных. Для нахождения реального поля зрения были проведены прямые его измерения в сагиттальной плоскости, для чего измерения проводились при скрещенных щелях монохроматора комплекса «Камелия-М» и спектрометра. При такой схеме эксперимента макетируется ситуация излучающей точки на входной щели полихроматора. В результате измерений при скрещенных щелях была получена зависимость уровня сигнала от угла поворота спектрометра, представленная на рис. 5. Столь большой угол поля зрения прибора в данной плоскости (около 1°) можно объяснить лишь астигматизмом дифракционной решетки.

Была определена пороговая СПЭЯ, регистрируемая прибором (рис. 6), и средняя квадратичная погрешность измерений СПЭЯ спектрометром (рис. 7).

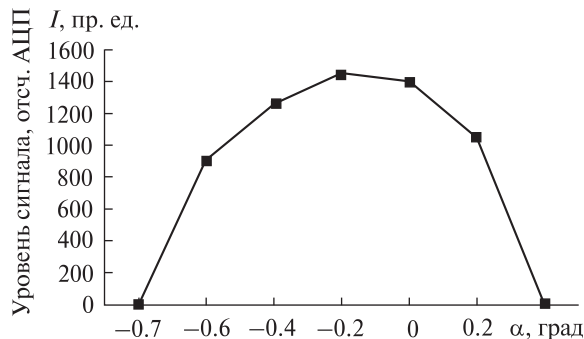


Рис. 5. Зависимость уровня сигнала $S_{\text{отн}}$ от угла поворота α в сагиттальной плоскости

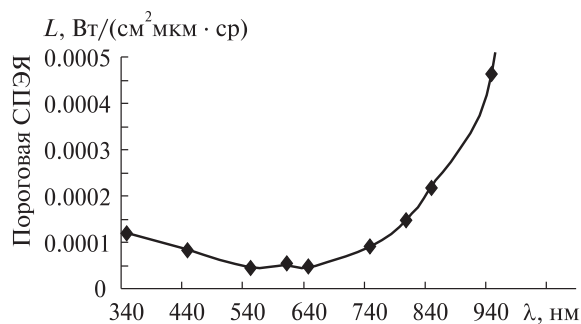


Рис. 6. Пороговая СПЭЯ, регистрируемая прибором

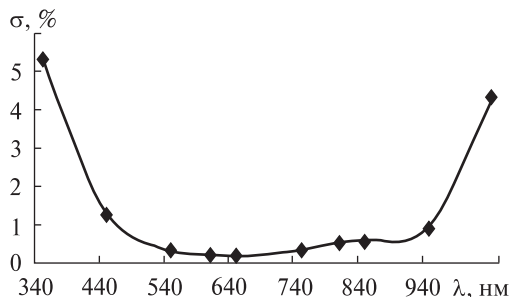


Рис. 7. Средняя квадратичная погрешность σ измерений СПЭЯ

Так же был определен динамический диапазон измерений МС: $D = 10 \lg(L_{\text{max}}/L_{\text{min}}) = 24$ дБ.

Нами разработана методика [3] интерполяции пространственно-спектральных данных, в результате применения которой информация, содержащаяся в RGB-изображениях и спектрах высокого разрешения в 4–6 областях (точках) на одном изображении, становится близкой по своей информативности к данным, получаемым видеоспектрометром с несколькими десятками спектральных каналов.

Сочетание фотоаппаратуры высокого пространственного разрешения и спектрорадиометра высокого спектрального и пространственного разрешения позволит повысить информативность регистрируемых данных в КЭ «Ураган» и проводить более точную идентификацию, классификацию и определение параметров подстилающих поверхностей и объектов.

1. Беляев Б. И., Катковский Л. В. Оптическое дистанционное зондирование. — Минск: БГУ, 2006. — 455 с.
2. Беляев Б. И., Катковский Л. В., Хвалей С. В. Расчет параметров спектрофотометрического комплекса для измерения яркости свечений верхней атмосферы из космоса // Журн. прикл. спектр. — 2008. — 75, № 1. — С. 125–133.
3. Беляев Ю. В., Катковский Л. В., Хвалей С. В., Хомицевич А. Д. Повышение информативности спектрально-изображений растительных объектов // Журн. прикл. спектр. — 2007. — 74, № 5. — С. 670–676.
4. Десинов Л. В., Беляев М. Ю., Шарипов С. Ш. и др. Мониторинг природных катастроф с МКС в 2005 году // Сб. тез. Третьей всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». — М.: ИКИ РАН, 14–17 ноября 2005 г.
5. Десинов Л. В., Ведешин Л. Программа «Ураган» стремится к интеграции с ГИС // ArcReview. — 2003. — № 3 (26).
6. Побединская М. «Ураган» предупредит об ураганах... и других природных катастрофах // Новости космонавтики. — 2003. — № 2.
7. Эпштейн М. И. Измерения оптического излучения в электронике. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 250 с.
8. *The infrared and electro-optical systems handbook* / Ed. by G. J. Zissis. — Environment research Institute of Michigan, USA., 1993. — Vol. 1. — 373 p.

Надійшла до редакції 01.10.09

B. I. Belyaev, Yu. V. Belyaev, A. V. Domaratskii,
L. V. Katkovskii, Yu. A. Krot, A. V. Rogovets, S. V. Khvalei

THE PHOTOSPECTRAL SYSTEM FOR THE SPACE EXPERIMENT «URAGAN»

We describe the arrangement and operation of the photospectral system developed for the use aboard the International Space Station within the framework of the space experiment «Uragan». Our calculations for optical parameters are given. Some results for laboratory testing of the photospectral system as well as for measurements of its characteristics and calibrations are presented.

УДК 536.42:621.891

Г. А. Фролов¹, Г. Д. Гамуля², А. Д. Колотило¹

¹ Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, Київ

² Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, Харків

МОДУЛЬНЫЙ ТРИБОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АДЕКВАТНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ТРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОРБИТАЛЬНОГО ПОЛЕТА И НАЗЕМНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ

Проведено дослідження модульного трибометра, виконаного за схемою «диск-індентор», який призначено для визначення триботехнічних характеристик антифрикційних матеріалів в умовах реального орбітального польоту та в лабораторних умовах моделювання впливу факторів космічного простору. Показано, що запропонована конструкція вузла тертя дає можливість оцінки впливу сили ваги на коефіцієнт тертя деяких антифрикційних матеріалів в умовах наземної лабораторії.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [5] было показано состояние работ по подготовке украинскими организациями комплекта узлов трения модульных трибометров для проведения космического эксперимента (КЭ) «Материал — Трение». Проведение КЭ предусматривает решение комплекса научно-технических задач, включая:

- определение адекватности характеристик трения и изнашивания триботехнических материалов по результатам их испытаний в натурных условиях воздействия факторов космического пространства (ФКП) и в наземных модельных лабораторных условиях;

- установление влияния ФКП на коэффициенты трения и механизмы изнашивания антифрикционных и износостойких материалов;

- определение триботехнических характеристик новых антифрикционных материалов и покрытий;

- создание банка данных по триботехническим материалам, перспективным для узлов трения космических аппаратов (КА) и т. д.

Очевидно, что решение даже некоторых из этих задач требует проведения большого объема триботехнических испытаний, что в условиях реального космического полета практически не-

выполнимо. В связи с этим установление адекватности характеристик трения и изнашивания материалов по результатам их исследований в условиях орбитального полета и в наземных лабораториях, на наш взгляд, имеет первостепенное значение.

Анализ результатов полученных в ходе проведения КЭ «Материал — Трение» позволит (при необходимости) установить поправочные коэффициенты коррекции результатов триботехнических испытаний, проводимых в наземных лабораторных условиях, и повысить их достоверность.

Известно, что ряд основных ФКП (вакуум, низкие температуры, солнечное излучение и радиационные потоки протонов и электронов) в настоящее время достаточно надежно моделируется в лабораторных условиях [1]. Однако моделирование длительного воздействия микрогравитации на характеристики трения и изнашивания в наземных условиях практически невозможно. В то же время микрогравитация может оказывать существенное влияние на поведение продуктов изнашивания материалов в паре трения. В зависимости от наличия или отсутствия гравитации частицы продуктов износа могут удаляться с дорожки трения или оставаться на ней, оказывая влияние на интенсивность и характер изнашивания. Поэтому оценка влияния на трение и изнашивание сил гравитации представляет практический интерес.

В таблице приведены основные параметры, которые должен обеспечить модульный трибометр «диск-индентор», разрабатываемый украинскими организациями для исследования адекватности триботехнических характеристик материалов, определяемых в условиях микрогравитации и в наземных условиях.

Технические характеристики модульного узла трения для исследования адекватности триботехнических характеристик антифрикционных материалов в условиях орбитального полета и наземных лабораториях

Ведущий (вращающийся) образец	диск
Ведомый (неподвижный) образец	цилиндрический индентор
Скорость скольжения	от 0.1 до 1.5 м/с
Погрешность поддержания заданной скорости V скольжения	0.01 %
Нормальная нагрузка, не более	30 Н
Погрешность измерения нормальной нагрузки.	± 0.1 Н
Изменение нормальной нагрузки в процессе испытаний при износе индентора 50 мкм, не более	25 %
Максимально допустимый коэффициент трения	0.4
Погрешность измерения силы трения	10 %
Максимально допустимая величина линейного износа	50 мкм
Погрешность измерения величины линейного износа в процессе непрерывного мониторинга	10 %
Диапазон изменения объемной температуры индентора	-92...+150 °C
Погрешность измерения температуры	± 2 °C
Время непрерывной работы, не менее	5 ч

В данной работе представлены результаты исследования одного из модульных трибометров «диск-индентор», выполненного на основе двухкоординатного упругого элемента и предназначенного для испытаний антифрикционных материалов космического назначения. Базовый вариант этого трибометра описан в работе [2].

ДОРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ТРИБОМЕТРА

В ходе КЭ предполагается в режиме непрерывного мониторинга определение силы (коэффициента) трения, нормальной нагрузки, интегрального (суммарного) линейного износа пары

трения, температуры образца-индентора и корпуса трибометра.

В качестве датчиков силы трения и нормальной нагрузки выбраны константановые фольговые тензорезисторы КФ5П1-3-400-А-23 (16 тензорезисторов, сформированные в 4 измерительных моста) с длиной базы 3 мм и активным сопротивлением 400 Ом. В качестве резисторов, которые компенсируют первоначальный коэффициент преобразования (смещение нулевой точки), применены 4 нормирующие фольговые преобразователя ПНФ-Б с начальным сопротивлением 16 Ом.

Максимальное отличие сопротивлений между тензорезисторами одной группы не превышало 0.1 Ом. Для наклейки тензорезисторов применялся высокотемпературный клей УВД-10Т.

Определение интегрального (суммарного) линейного износа пары трения в режиме непрерывного мониторинга производится по методу, предложенному профессором М. Н. Сурду [4]. Двухкоординатный упругий элемент узла трения спроектирован таким образом, что интегральный линейный износ пары трения сопровождается уменьшением начальной нормальной нагрузки пары трения. Таким образом, контролируя изменение нормальной нагрузки, можно непрерывно регистрировать величину интегрального линейного износа пары трения. При этом следует учитывать, что при предельно допустимом интегральном линейном износе 50 мкм начальная нагрузка снижается на 25 %.

Для измерения температуры образца-индентора и корпуса трибометра применялись резистивные платиновые датчики температуры HEL-705-U-1-12-00 (Honeywell), у которых температурный диапазон -200...+260 °C, сопротивление 1000 Ом (при 25 °C), чувствительность 3.7 Ом/°C, точность 0.3 °C.

В процессе проведения работ по доработке узла трения было рассмотрено три варианта конструкций, в которых вал с диском (контртело) установлен на подшипниках качения, смонтированных непосредственно в теле двухкоординатного упругого элемента (рис. 1).

Результаты ресурсных испытаний такого узла трения (рис. 1, в) показаны на рис. 2. Видно, что

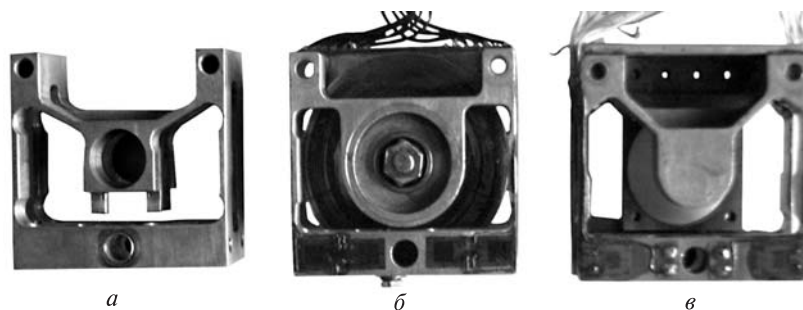


Рис. 1. Внешний вид двухкоординатных упругих элементов, изготовленных и исследованных при разработке узла трения: *а* — исходная конструкция упругого элемента, *б* — сборка узла трения, *в* — конструкция упругого элемента с увеличенной опорной базой для диска-контртела и специальной конфигурацией измерительных балок для уменьшения влияния температуры на показания тензорезисторов

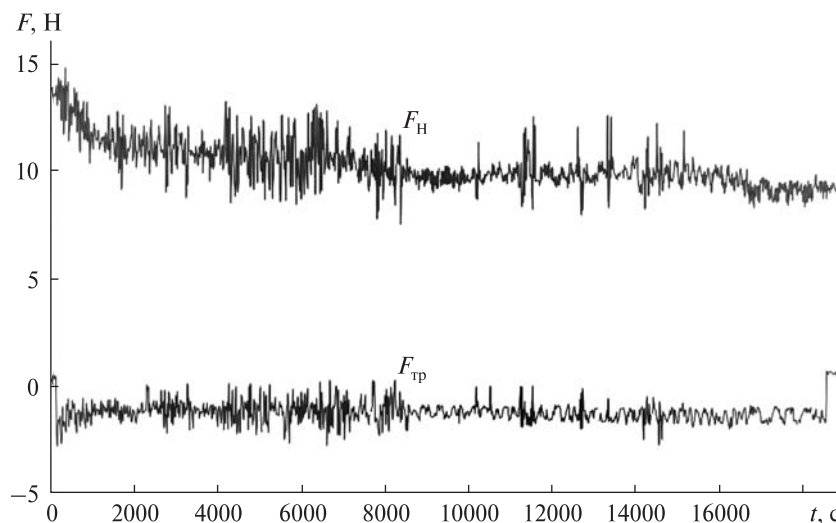


Рис. 2. Компьютерная запись изменения нагрузки F_n и силы трения $F_{тр}$ от времени t эксперимента при испытаниях узла трения (рис. 1, *в*)

отклонение нормальной нагрузки F_n и силы трения $F_{тр}$ от среднего значения может достигать $\pm 20\%$, что затрудняет определение износа пары трения в режиме непрерывного мониторинга.

Несмотря на то, что двухкоординатный упругий элемент изготовлен из алюминиевого сплава Д-16Т, в экспериментах было установлено заметное влияние градиента температуры на показания тензорезисторов, предназначенных для измерения нагрузки и силы трения. Например, при скорости скольжения 0.3 м/с градиент температуры между местом установки индентора и крайней точкой упругого элемента превышал 20 °С.

Исследование распределения усилий и деформаций, которые возникают в подшипниках и в муфте передачи вращения от двигателя на вал узла трения, выявили дополнительные возмущения в рассматриваемой конструкции узла трения. Для устранения влияния установленных возмущений на точность измерения триботехнических характеристик была предложена конструкция узла трения, в которой образец-диск устанавливается непосредственно на вал двигателя. Это полностью исключает механические возмущения, возникавшие в прежних конструкциях из-за наличия муфты, и улучшает

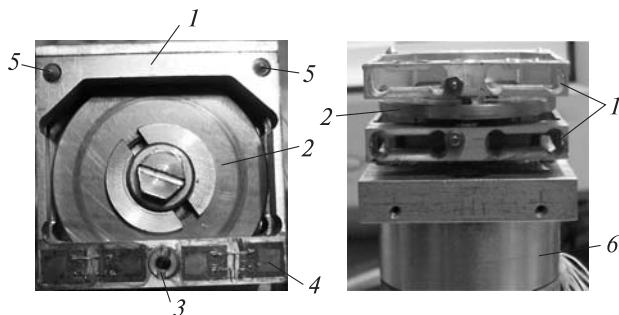


Рис. 3. Модульный узел трения без защитного экрана: 1 — двухкоординатный упругий элемент, 2 — диск-контртело из стали ШХ-15, 3 — индентор из материала СКМ ИПМ-304, 4 — тензорезисторный датчик, 5 — направляющая для установки упругого элемента на приводе, 6 — привод

отвод тепла трения от индентора через образец-диск.

В свою очередь, уменьшение массы двухкоординатного упругого элемента способствует снижению градиента температур на его поверхности. Такая конструкция позволяет вернуться к классической схеме измерения нагрузки с использованием плоской тензоизмерительной балки (рис. 3). Наличие резьбового соединения для установки индентора в корпусе упругого элемента обеспечивает задание начальной нагрузки в паре трения без применения специальных тарировочных приспособлений.

Указанные изменения конструкции двухкоординатного упругого элемента не повлияли на его прочностные и деформационные характеристики, рассчитанные в работе [2].

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты проводились на вакуумной установке «Уран-Т» (рис. 4) [3], в которой для моделирования нагрева узла трения от солнечного излучения используется ксеноновая лампа ДКСШРБ-10000 с концентратором лучистой энергии.

Для измерения параметров трения применялась компьютеризированная система измерения и управления (СИУ) [4], разработанная в НИИ прецизионных измерений при Укрметртестстандарте, позволяющая одновременно контролировать показания всех тензометрических мостов и датчиков температуры. В качестве привода трибометра использовался макетный бесколлекторный электропривод, разработанный и изготовленный МПП «Збруч» (Украина), показавший удовлетворительную работоспособность в диапазоне температур от $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Макетный электропривод обеспечивает плавную регулировку скорости скольжения от 0.1 до 1.5 м/с при нагрузке до 30 Н, что удовлетворяет параметрам, указанным в таблице.

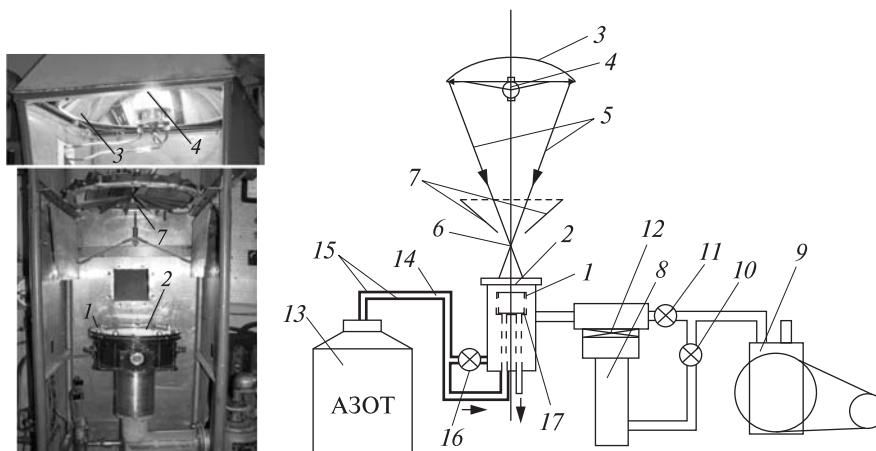


Рис. 4. Принципиальная схема установки «Уран-Т»: 1 — вакуумная камера, 2 — кварцевый иллюминатор, 3 — эллипсоидный отражатель радиационного нагревателя, 4 — ксеноновая лампа ДКСШРБ-10000, 5 — поток световых лучей, 6 — фокальная зона установки; 7 — жалюзи, 8 — диффузионный вакуумный насос, 9 — форвакуумный насос, 10, 11 — вакуумный вентиль, 12 — вакуумная задвижка, 13 — сосуд Дьюара, 14 — трубопровод подачи жидкого и газообразного азота, 15 — теплоизоляция, 16 — натекатель, 17 — радиационный экран, охлаждаемый азотом

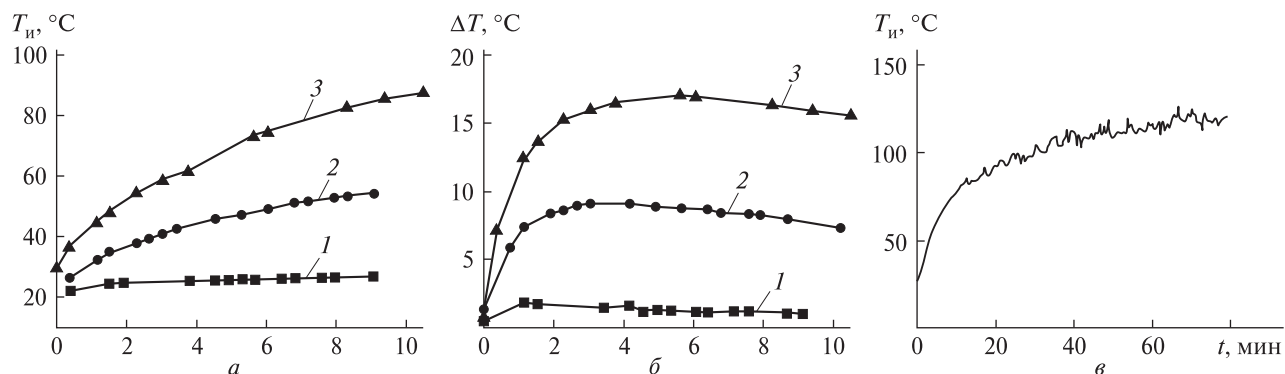


Рис. 5. Температурные характеристики узла трения «диск-индентор»: *а* — изменение температуры индентора T_n для различных скоростей скольжения при времени t эксперимента 10 мин, *б* — градиент температуры ΔT на поверхности упругого элемента (1, 2 и 3 — скорости скольжения 0.1, 0.7 и 1.5 м/с соответственно), *в* — зависимость температуры T_n индентора от времени эксперимента для скорости скольжения 0.7 м/с

При исследованиях работоспособности электропривода в диапазоне температур от -80 °C до $+150$ °C установлено, что при положительных температурах для обеспечения скорости скольжения 1.5 м/с при нагрузке 30 Н (максимально допустимые значения) потребляемая мощность составляет 60–70 Вт. При снижении температуры потребляемая мощность возрастает и при -80 °C достигает 100 Вт. Для надежного пуска макета электропривода при низких температурах (-80 ... -100 °C) необходим дополнительный резерв мощности 40–45 Вт.

Исходя из параметров, приведенных в таблице, для исследования модульного трибометра были выбраны следующие режимы работы: начальная нагрузка 20 и 30 Н; скорость скольжения 0.1, 0.7 и 1.5 м/с; начальная температура 20–25 °C; диапазон изменения температуры узла трения от -90 °C до $+130$ °C.

В качестве объекта для триботехнических испытаний была выбрана открытая пара сухого трения «диск-индентор». Материал образцов-инденторов — композиционный самосмазывающийся материал СКМ ИПМ-304 (предназначен для работы в вакууме [6, 7]), материал образца-диска — термообработанная сталь ШХ-15. Эксперименты проводились при давлении 0.1 Па, так как при этом давлении средний коэффициент трения для выбранной пары трения составляет примерно 0.2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ

Было выполнено три серии экспериментов.

Серия А. Определение температурных характеристик узла трения в зависимости от скорости скольжения. Для исследования температурного режима работы узла трения были выбраны три скорости скольжения: 0.1, 0.7 и 1.5 м/с. Температура измерялась с помощью двух датчиков HEL-705-U-1-12-00 (Honeywell), один из которых был установлен в инденторе, а другой закреплен в наиболее удаленном от индентора месте упругого элемента. Результаты эксперимента приведены на рис. 5.

На рис. 5, *а* показана зависимость температуры индентора от скорости скольжения и продолжительности эксперимента. При скорости скольжения 1.5 м/с температура индентора достигает $+80$ °C уже после 10 мин работы узла трения и имеет тенденцию к дальнейшему увеличению. При скорости скольжения 0.1 м/с температура индентора стабилизируется на уровне $+25$ °C.

Градиент температуры на поверхности упругого элемента (рис. 5, *б*) не превышает 18 °C даже для максимальной скорости скольжения индентора по диску и имеет тенденцию к некоторому уменьшению при увеличении продолжительности работы узла трения. Однако, как показано выше, при увеличении времени эксперимента

температура индентора может достичь предельного значения $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$. (рис. 5, в).

Серия Б. Моделирование влияния орбитального изменения температуры КА на параметры трения. Для проведения эксперимента был выбран следующий режим испытаний: начальная нагрузка на индентор – 30 Н (удельное давление при использовании цилиндрического индентора $\varnothing 2\text{ мм}$ с плоским торцом составляет примерно 1 кг/мм^2); скорость скольжения – 0.7 м/с ; давление в камере 0.1 Па .

В условиях орбитального полета характер изменения температуры пары трения при проведении эксперимента зависит от многих факторов, и на данном этапе исследований не известен. Поэтому для экспериментов серии Б был выбран режим изменения температуры трибометра (узла трения с приводом) от $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$, практически перекрывающий ожидаемый диапазон за время 90 мин, что приблизительно равно времени одного оборота МКС вокруг Земли. Однако в реальных условиях полета за это время температура трибометра, по-видимому, должна вернуться к исходному значению ($-90\text{...}-100\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Охлаждение трибометра до заданной температуры обеспечивалось путем теплообмена излучением с криогенным (азотным) экраном вакуумной камеры. Длительность предварительного охлаждения трибометра до температуры $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляла около 5 ч.

Для нагрева трибометра использовался имитатор солнечной лучистой энергии. Поток световых лучей с помощью эллипсоидного отражателя направлялся на установленный в вакуумной камере трибометр через кварцевый иллюминатор (рис. 4).

Зависимость нормальной нагрузки пары трения (силы прижатия) и силы трения от изменения температуры в диапазоне $-90\text{ }^{\circ}\text{C}\text{...}+130\text{ }^{\circ}\text{C}$ показана на рис. 6, а. Установлено, что с ростом температуры трибометра начальная сила прижатия образцов и сила трения существенно уменьшаются и достигают минимальных значений при температуре трибометра $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$. В то же время коэффициент трения от изменения температуры зависит мало и достигает минимального значения при температуре $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 6, б).

Полученные результаты позволяют сделать следующие предварительные выводы:

- предложенная конструкция узла трения по схеме «диск-индентор» обеспечивает необходимую точность измерения триботехнических характеристик антифрикционных материалов при проведении КЭ в условиях орбитального полета;
- наименьшее значение коэффициента трения для выбранной пары материалов и схемы испытаний наблюдается при температуре индентора $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- установлена слабая зависимость коэффициента трения от изменения начальной нагрузки в процессе испытаний, что подтверждает возможность измерения интегрального износа пары трения (до 50 мкм) в режиме непрерывного мониторинга.

Серия В. Оценка влияния силы гравитации на коэффициент трения. Результаты, приведенные на рис. 6—8 показывают, что коэффициенты трения для верхнего и нижнего инденторов заметно отличаются. Такое различие в коэффициентах трения может быть вызвано:

- а) влиянием типа крепления двухкоординатного упругого элемента на величину силы трения, регистрируемой для верхнего и нижнего инденторов;
- б) различным количеством продуктов износа, которое остается на верхней и нижней дорожках трения образца-диска.

Для проверки предположения а) были проведены испытания при самоустанавливающимся (рис. 3, п. 5) и фиксированном креплении двухкоординатного упругого элемента на корпусе электропривода. Полученные значения коэффициентов трения для верхнего и нижнего инденторов хорошо согласуются между собой (рис. 7).

Для проверки предположения б) было исследовано состояние дорожек трения на верхней и нижней сторонах образца-диска. Обнаружено, что на верхней стороне образца-диска значительная часть отделившихся частиц износа индентора (и диска) остаются на дорожке трения (явление трибопереноса), и при последующих проходах индентора (при повторных циклах взаимодействия) рабочая поверхность инден-

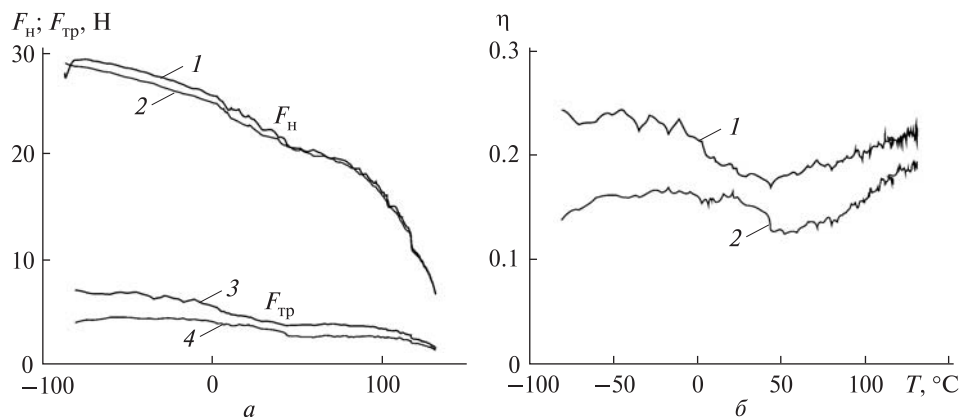


Рис. 6. Зависимость сил прижима F_H и трения $F_{тр}$ (а), коэффициента трения η (б) в диапазоне температур $-90...+130$ °С для пары трения: индентор — материал СКМ ИПМ-304, контртело — сталь ШХ15 (1 и 3 — на нижней стороне диска-контртела, 2 и 4 — на верхней стороне диска-контртела)

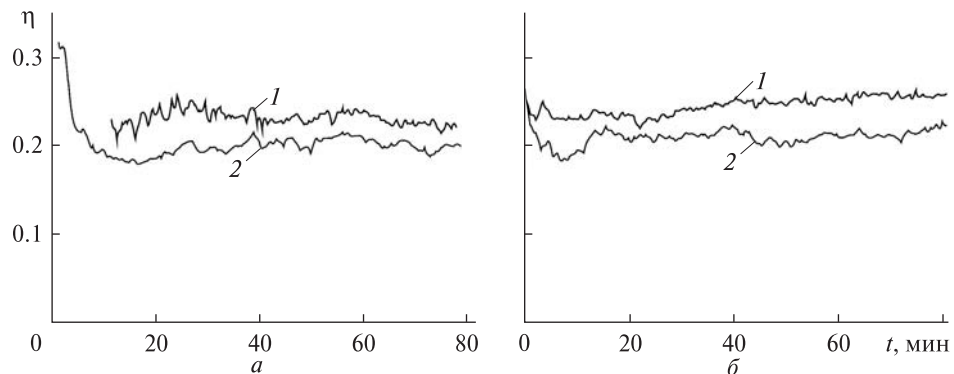


Рис. 7. Зависимость коэффициента трения для фиксированного (а) и самоустанавливающегося (б) упругих элементов при начальной температуре индентора 25 °С (пара трения: индентор — материал СКМ ИПМ-304, диск — сталь ШХ15): 1 — нижняя сторона диска-контртела, 2 — верхняя сторона диска контртела

тора экранируется от ювенильной (исходной) поверхности материала образца-диска слоем перенесенных вторичных структур. В результате после окончания периода приработки трение осуществляется между материалом индентора и слоем, состоящим в основном из частиц износа индентора.

Учитывая, что индентор изготовлен из антифрикционного самосмазывающегося материала СКМ ИПМ-304, явление трибопереноса обеспечивает более низкий коэффициент трения по сравнению с трением в отсутствие такого явления [5].

На дорожке трения нижней стороны образца-диска отделившиеся частицы износа индентора (и диска) под действием сил гравитации систематически удаляются из зоны трения. Трение индентора в этом случае происходит в основном по ювенильной (исходной) поверхности материала образца-диска в режиме квазиприработки, который характеризуется повышенным значением коэффициента трения.

Результаты экспериментов, представленные на рис. 8, показывают, что:

- при скорости скольжения 0.1 м/с износ индентора мал, и коэффициенты трения после пе-

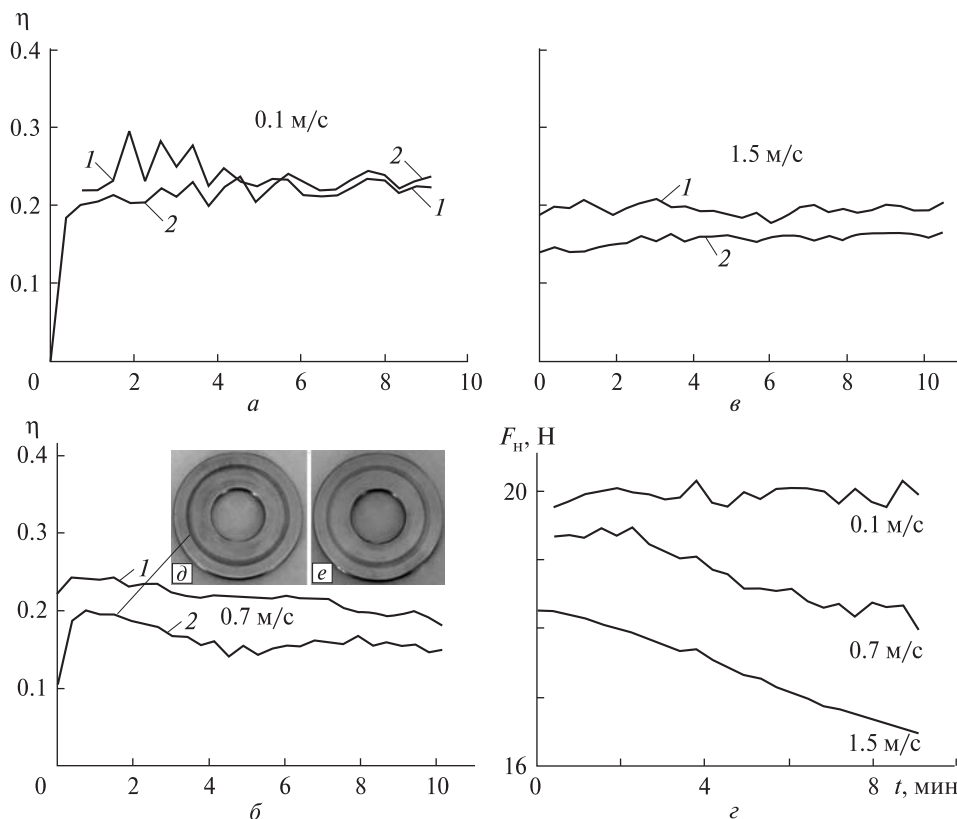


Рис. 8. Зависимость коэффициента трения на верхней (d) и нижней (e) сторонах диска-контртела для скоростей скольжения 0.1 (a), 0.7 (б), 1.5 м/с (в) и усилия прижима (z) от времени испытаний (пара трения: индентор — материал СКМ ИПМ-304, контртело — сталь ШХ15): 1 — коэффициент трения на нижней стороне диска, 2 — на верхней

риода приработки практически одинаковы для нижней и верхней дорожек диска (рис. 8, a);

- при увеличении скорости скольжения интенсивность изнашивания индентора возрастает, о чем свидетельствует снижение нагрузки на индентор (рис. 8, e). Различие коэффициентов трения на верхней и нижней дорожках проявляется сильнее при сохранении более высокого коэффициента трения на нижней дорожке диска (рис. 8, б и в).

- На рис. 8, d показана дорожка трения на верхней стороне диска. Отчетливо видны большие участки, покрытые частицами перенесенного материала индентора. На дорожке трения на нижней стороне диска (рис. 8, e) следов трибоперноса материала индентора заметно меньше.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования подтвердили работоспособность доработанной конструкции модульного трибометра «диск-индентор», выполненного на основе двухкоординатного упругого элемента и предназначенного для испытаний антифрикционных материалов космического назначения в рамках КЭ «Материал — Трение».

Исследовано распределение и градиент температур на поверхности двухкоординатного упругого элемента и температурные характеристики индентора для различных скоростей скольжения.

Обнаружено, что интенсивность изнашивания и коэффициенты трения на верхней стороне

диска меньше, чем на нижней стороне, что свидетельствует о разном влиянии сил гравитации на скорость удаления продуктов износа с поверхности верхней и нижней дорожек трения.

Показано, что размещение инденторов с двух сторон образца-диска позволяет оценить влияние силы тяжести на параметры трения, по крайней мере на примере материала СКМ ИПМ-304.

Таким образом, если моделирование микрогравитации в лабораторных условиях практически невозможно, то оценить влияние продуктов разрушения на формирование дорожки трения в условиях их различного накопления на поверхности трения оказалось возможным, используя разработанную конструкцию узла трения.

1. *Абраимов В. В., Негода А. А., Завалишин А. П., Колыбаев Л. К.* Комплексная имитация факторов космического пространства // *Космічна наука і технологія*. — 1995. — **1**, № 2–6. — С. 76–80.
2. *Боровик В. Г.* Модульный узел трения «диск – индентор» для триботехнических исследований в космическом пространстве // *Космічна наука і технологія*. — 2005. — **11**, № 5/6. — С. 87–91.
3. *Боровик В. Г., Боровик Д. В., Колотило А. Д. и др.* Установка для испытаний модульных трибометров и пар трения по программе подготовки КЭ «Материал-Трение» // *Тез. докладов 6-й Укр. конф. по космич. исслед.*, 3–10 сентября 2006 г. — Евпатория: НЦУИКС, 2006. — С. 89.

4. *Броновец М. А., Гамуля Г. Д., Еланский Ю. А. и др.* Орбитальный трибометр и новые материалы для проведения КЭ «Материал – Трение» // *Космічна наука і технологія*. — 2003. — **9**, № 5/6. — С. 40–46.
5. *Гамуля Г. Д., Фролов Г. А., Колотило А. Д., Боровик Д. В.* Комплект модульных узлов трения для проведения КЭ «Материал–Трение» и результаты их испытаний // *Космічна наука і технологія*. — 2009. — **15**, № 3. — С. 11–19.
6. *Косторнов А. Г., Симеонова Ю. М., Фуцич О. И. и др.* Влияние определяющих параметров процесса сухого трения на формирование структуры зоны трибосинтеза в композициях на медной основе // *Порошковая металлургия*. — 2006. — № 3/4. — С. 14–21.
7. *Косторнов А. Г., Фуцич О. И., Чевычелова Т. М. и др.* Закономерности трения, износа и целенаправленного синтеза поверхностей трения композиционных самосмазывающихся материалов // *Порошковая металлургия*. — 2007. — № 3/4. — С. 11–19.

Надійшла до редакції 01.10.09

G. A. Frolov, G. D. Gamulia, A. D. Kolotilo

THE MODULAR TRIBOMETER FOR THE INVESTIGATION OF ADEQUACY OF FRICTION PARAMETERS UNDER ORBITAL FLIGHT AND LAND LABORATORY CONDITIONS

We investigated the friction unit of the «disk-indenter» modular tribometer for the determination of tribotechnical characteristics of antifrictional materials in the orbital flight conditions and during the simulation of space factor effect. It is shown that the proposed design for the friction unit enables us to estimate the gravity influence on the friction factor of some antifrictional materials in land laboratory conditions.

УДК 520.6+520.8

Ю. Д. Котов, В. Н. Юров, А. И. Архангельский, М. В. Бессонов, А. С. Буслов,
К. Ф. Власик, А. С. Гляненко, В. В. Кадилин, Е. Э. Лупарь, И. В. Рубцов, В. Г. Тышкевич

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

СПЕКТРОМЕТР ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ «НАТАЛЬЯ-2М». ПЕРВОНАЧАЛЬНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ, ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ И НАСТРОЙКА НА ОРБИТЕ КА КОРОНАС—ФОТОН

Прилад «Наталья-2М» у складі КА КОРОНАС-ФОТОН запущено з космодрому Плесецьк (Росія) на навколосезну орбіту 30 січня 2009 р. 19 лютого прилад було увімкнено, перевірено справність його вимірювальних каналів, підлаштовано детектори і виміряно їхні льотні характеристики. Зараз прилад функціонує в робочому режимі та виконує програму наукових експериментів.

Космический аппарат КОРОНАС—ФОТОН с комплексом научной аппаратуры (КНА) ФОТОН был запущен с космодрома Плесецк 30 января 2009 г. и ракетой носителем «Циклон-3» выведен на околоземную орбиту с высотой около 550 км и наклоном 82.5°.

Космический эксперимент КОРОНАС—ФОТОН проводится с целью исследования процессов накопления энергии и её трансформации в энергию ускоренных частиц во время солнечных вспышек, изучения механизмов ускорения, распространения и взаимодействия энергичных частиц в атмосфере Солнца, исследования корреляции солнечной активности с физико-химическими процессами в верхней атмосфере Земли. Модель КА КОРОНАС—ФОТОН с комплексом научной аппаратуры представлена на рис. 1.

Прибор «Наталья-2М» является одним из основных в КНА и использует около 40 % выделенных весовых, энергетических и информационных ресурсов. Он предназначен для регистрации гамма-излучения солнечного и космического происхождения и солнечных нейтронов, измерения их амплитудных и временных спектров в

диапазонах энергии: 0.2—1600 МэВ для гамма-излучения, 20—300 МэВ для нейтронов.

На рис. 2 показана структура прибора. Он состоит из регистрирующего блока (РБ) и блоков электроники. В состав РБ входят: спектрометр энергии из двух секций СЕ-1М и СЕ-2М, детекторы заряженных частиц АК и АС, используемые в режиме антисовпадений.

Для уменьшения влияния перегрузки при регистрации мощных событий СЕ-1М и СЕ-2М собраны из отдельных светоизолированных сцинтилляционных модулей. В каждой из секций два слоя по 4 модуля, ориентированных в перпендикулярных направлениях. Модули с противоположных торцов просматриваются двумя фотоумножителями. Для выравнивания и стабилизации коэффициентов усиления всех каналов используются системы автоподстройки. Чувствительная площадь спектрометров — 38 × 32 см.

Блоки электроники обеспечивают низковольтное и высоковольтное питание, управление, контроль состояния, сбор, накопление и вывод научной информации. Все блоки прибора размещены в гермоотсеке КА. В таблице приведены характеристики прибора «Наталья-2М» и его каналов регистрации.

Вывод данных с прибора осуществляется по шести независимым каналам обмена информа-

© Ю. Д. КОТОВ, В. Н. ЮРОВ, А. И. АРХАНГЕЛЬСКИЙ,
М. В. БЕССОНОВ, А. С. БУСЛОВ, К. Ф. ВЛАСИК,
А. С. ГЛЯНЕНКО, В. В. КАДИЛИН, Е. Э. ЛУПАРЬ,
И. В. РУБЦОВ, В. Г. ТЫШКЕВИЧ, 2010

цией с телеметрической системой сбора и регистрации научной информации (ССРНИ). Суммарная суточная информационная квота составляет около 500 Мбайт.

На рис. 3 показана функциональная схема системы автоподстройки прибора. Световой импульс от образцового (стабильного) генератора с помощью волоконно-оптического световода вводится в кристалл, распространяется в нём и через оптические контакты попадает на фотокатод фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). С анода ФЭУ электрический импульс поступает на предусилитель и затем на плату стабилизации (ПС), на вход управления которой поступает сигнал с генератора. Прошедшие схему пропускания сигналы интегрируются и сравниваются с опорным напряжением, величина которого определяется поданным на цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) кодом. Выходной ток, вырабатываемый ПС, управляет значением напряжения на делителе ФЭУ. Для компенсации изменения светового потока диода предусмотрена возможность управления его величиной с помощью ЦАП. По команде может осуществляться переход с основного на резервный светодиод.

Для привязки шкал каналов прибора к значениям энергии и настройки используется система полётной калибровки с применением «меченых» гамма-квантов, образующихся при распаде радиоактивного изотопа Со-60, внедренного в

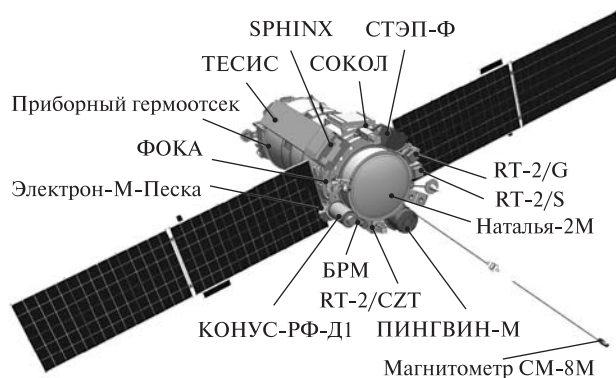


Рис. 1. Размещение комплекса научной аппаратуры на борту КА КОРОНАС—ФОТОН

сцинтиллятор. Сопровождающие каждый распад электроны регистрируются сцинтилляционным детектором, электрическая схема которого вырабатывает сигнал «мечения». По этому сигналу формируются калибровочные спектры. Более подробно спектрометр «Наталья-2М» описан в работах [1, 2].

Прибор был включен и начал функционировать на орбите 19 февраля 2009 г. Все поданные на борт команды были отработаны правильно. В первую очередь на этапе проверки работоспособности был проведён анализ скоростей счёта интенсивметров. На рис. 4 показано характерное изменение скоростей счёта f при прохождении прибором полярных областей, экваториальных

Основные характеристики прибора «Наталья-2М»

Канал	Энергетический диапазон, МэВ	Эффективная площадь, см ²	Энергетическое разрешение $\Delta E/E$	Время накопления
<i>Рентген и гамма-излучение</i>				
R	0.2—2	920	10—11 % (662 КэВ) измеренное	Спектры: 1 с Интенсиметры: 0.1 с
L	1—18	900	5.9 % (2.2 МэВ) измеренное 4.6 % (4.4 МэВ) измеренное	Спектры: 10 с Интенсиметры: 1 с
M	7—250	800	6 % (10 МэВ) расчет 26 % (120 МэВ) измеренное	Спектры: 10 с Интенсиметры: 1 с
H	50—1600	750	26 % (120 МэВ) измеренное	Спектры: 10 с Интенсиметры: 1 с
<i>Нейтроны</i>				
N	20—300	40—120	—	Спектры: 70 с Интенсиметры: 1 с

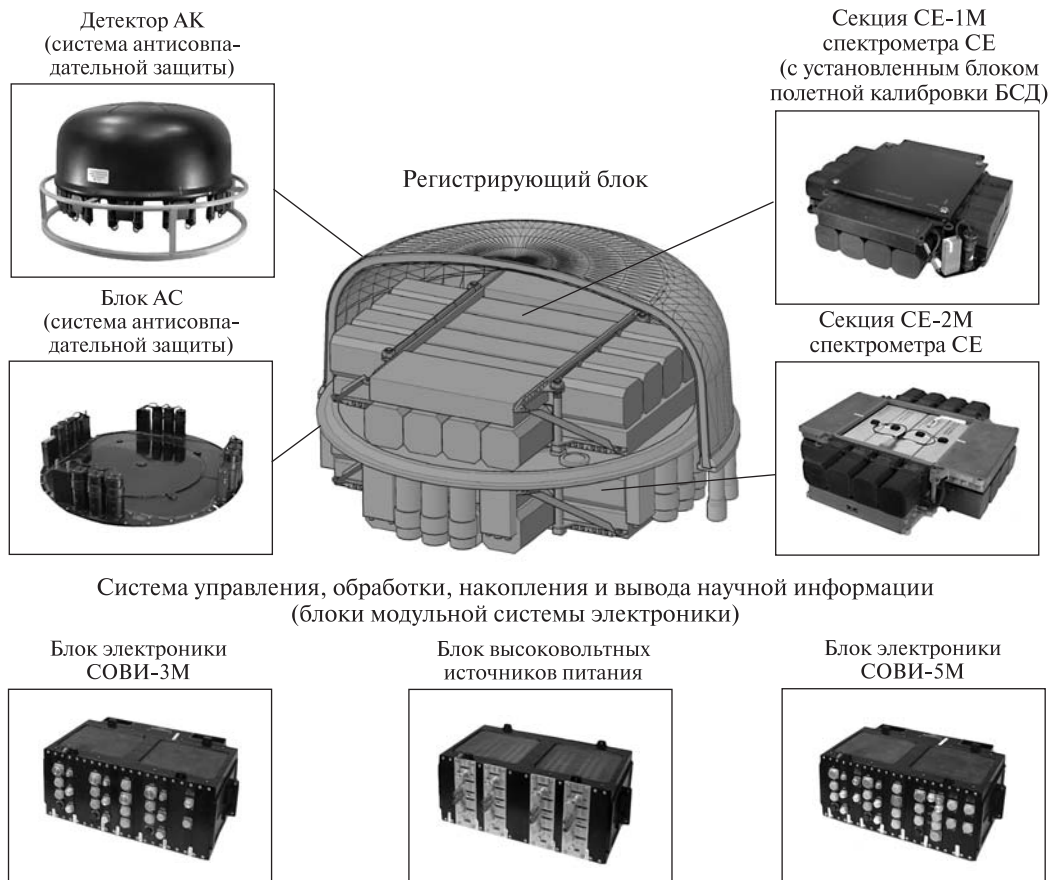


Рис. 2. Структурная схема прибора «Наталья-2М»

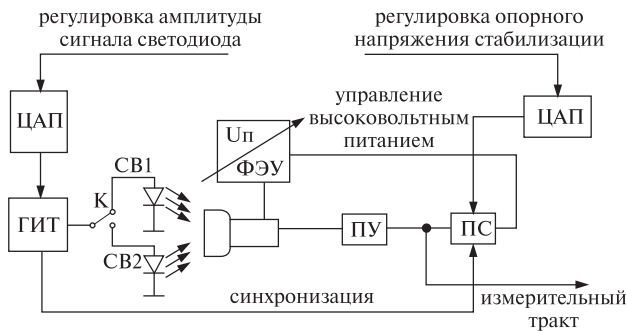


Рис. 3. Функциональная схема системы автоподстройки прибора «Наталья-2М»

зон, Южно-атлантической аномалии. Скорости счёта на орбите изменяются в сотни раз. При прохождении ЮАА было установлено нарушение функционирования системы стабилизации. Видно, что при прохождении КА краёв ЮАА

система работала правильно, но после прохождения центральной зоны скорости счёта модулей слоя С значительно возросли и не возвращались в рабочую область, так как напряжения на ФЭУ выходили за пределы рабочих значений. В результате имитации данного явления на наземном стенде и экспериментальной отработки на орбите был выработан алгоритм подачи управляющих команд на прибор, восстанавливающий нормальное функционирование системы стабилизации после прохождения ЮАА.

За 3–5 мин до входа в зону ЮАА на входы ЦАП всех ФЭУ спектрометра СЕ подаются коды «0» и на делителях устанавливаются минимальные напряжения. Скорости счёта значительно уменьшаются. Через 3–5 мин после выхода из зоны ЮАА на входы ЦАП повторно подаются коды «0» и затем «рабочие» коды, восстанавли-

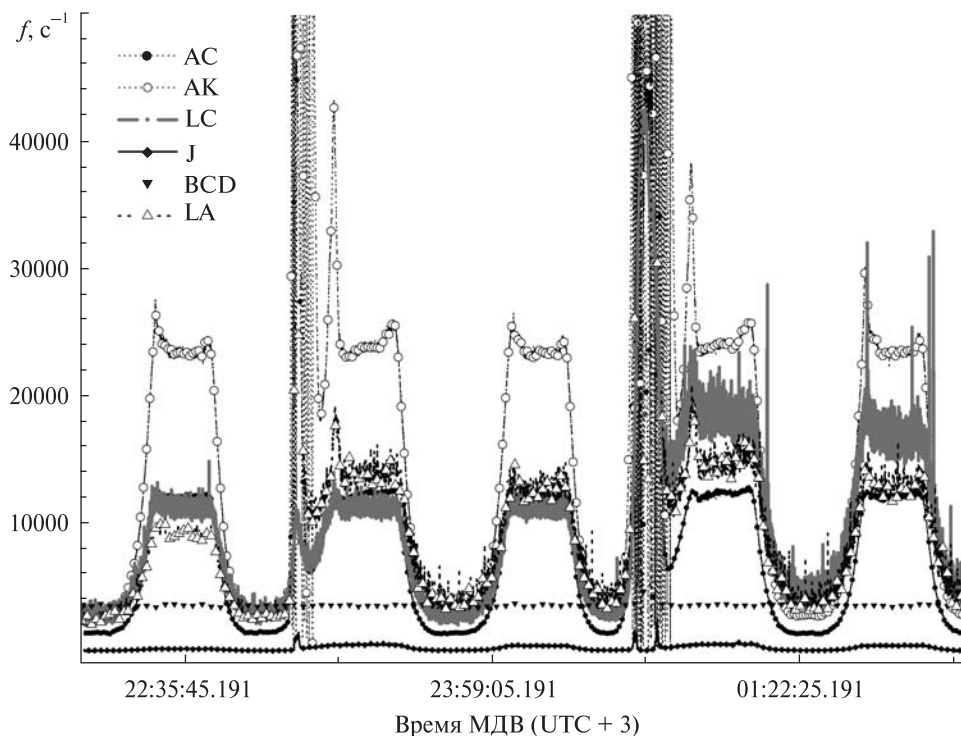


Рис. 4. Изменение скорости счета f при прохождении ЮАА

вающие режим функционирования. Скорости счета всех интенсиметров восстанавливаются.

После завершения проверки работоспособности прибора был проведен этап настройки и градуировки детекторов. В ходе проведения космического эксперимента для настройки и градуировки прибора «Наталья-2М» использовались следующие средства и методы:

- регистрация спектров от источника «меченых» гамма-квантов для всех энергетических диапазонов;
- регистрация спектров от локального фона для энергетических диапазонов R и L;
- регистрация спектров энерговыделений протонов первичного космического излучения для энергетических диапазонов M и H. Отбираются энерговыделения частиц, прошедших по одной полосе в каждом из слоев СЕ и зарегистрированные АК и АС.

На рис. 5, а в качестве примера приведены энергетические спектры отдельных ФЭУ от источника «меченых» гамма-квантов, измеренные на орбите КА. Видно расхождение положений

пиков примерно на 5 %. Так как в R, L, M и H-диапазонах для анализа используются суммарные сигналы с групп ФЭУ, этот эффект заметно ухудшает энергетическое разрешение спектрометра.

Были выполнены работы по подстройке коэффициентов усиления всех 32 ФЭУ обеих секций спектрометра СЕ. На рис. 5, б показано изменение положений пиков в зависимости от поданных кодов на ЦАП ФЭУ № 1 канала R1. Подстройка проводилась таким образом, чтобы положения пиков при измерениях на орбите совпали с положениями, зафиксированными при наземных испытаниях.

Время набора одного спектра составляло 1–1.5 ч. За сутки удавалось подобрать рабочий режим для одного ФЭУ, так как использовались только определенные участки орбиты КА, не включающие зоны радиационных поясов и полярные области. На рис. 6 показаны калибровочные спектры в каналах R3 («меченые» гамма-кванты), M и H (заряженные частицы) после подстройки.

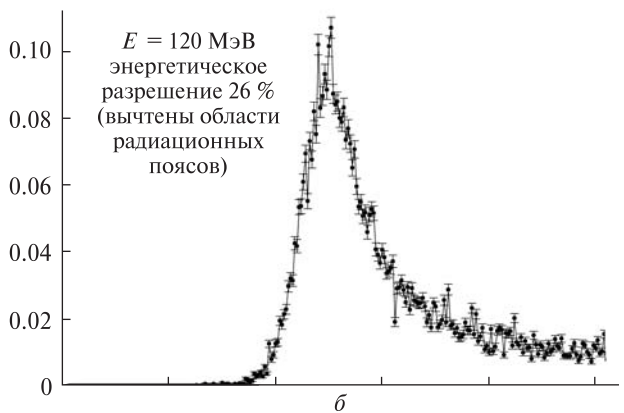
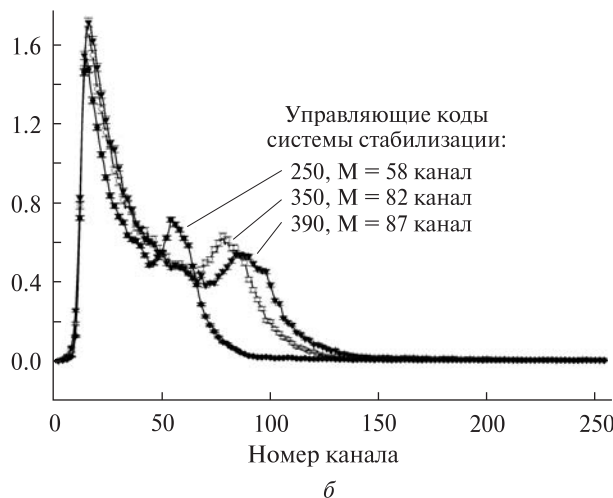
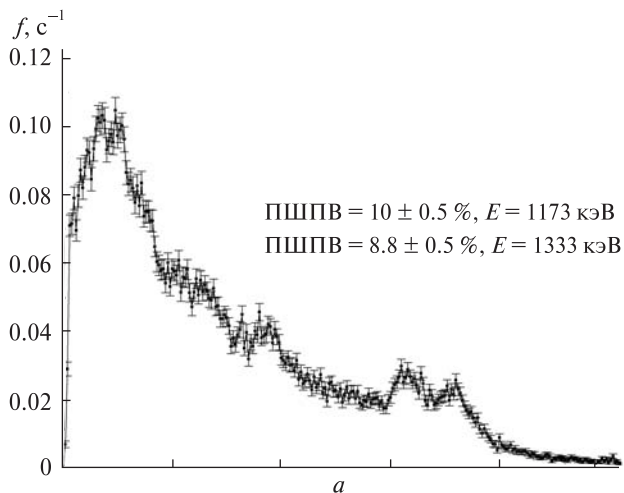
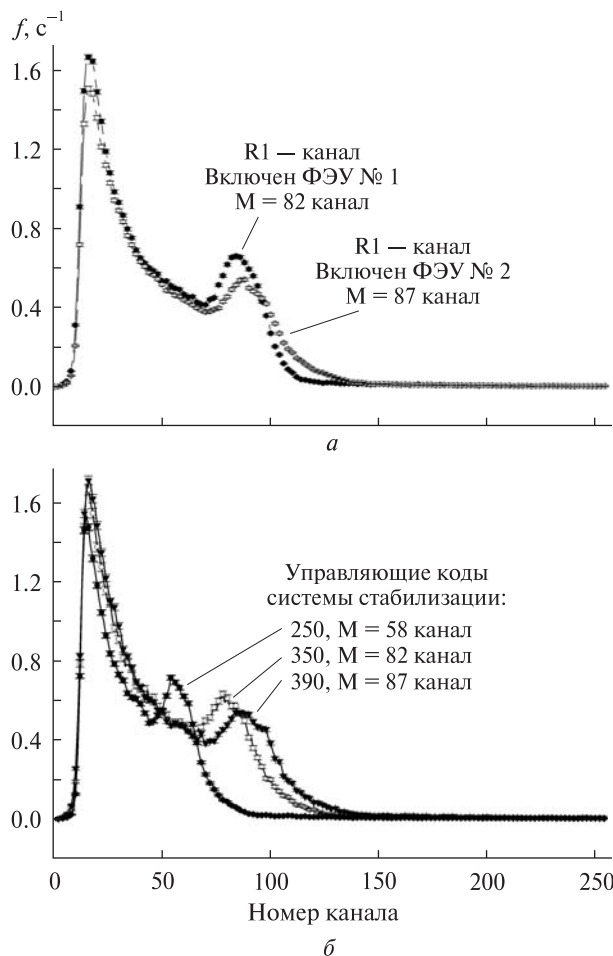


Рис. 5. Спектры совпадений с БСД (источник Co-60) в энергетическом канале R1 (0.2–2 МэВ) при отдельном включении ФЭУ № 1 и ФЭУ № 2 детектора R1 (а) и изменение положения пиков от калибровочного источника в зависимости от управляющих кодов системы стабилизации канала R1 (б)

В результате анализа спектров уточнены следующие характеристики прибора при лётных испытаниях:

- энергетические диапазоны каналов регистрации,
- энергетическое разрешение.

Полученные результаты приведены в таблице. Они незначительно отличаются от предполётных наземных калибровок.

В процессе настройки также проводился выбор порогов по энерговыделению для детекторов АК и АС. На рис. 7 показаны скорости счета

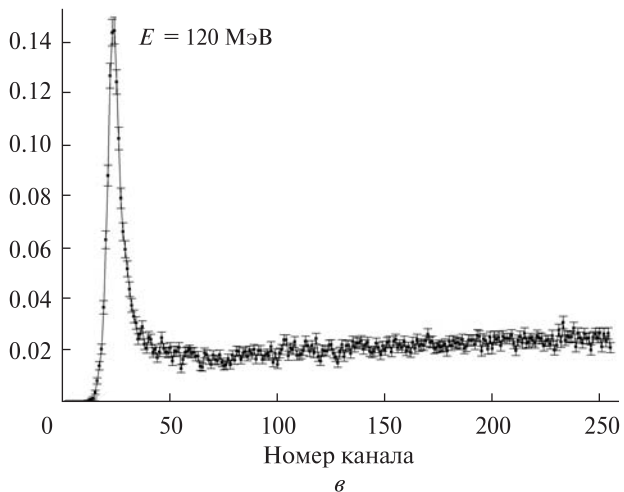


Рис. 6. а — Спектр совпадений с БСД (источник Co-60) в энергетическом канале R3 (0.2–2МэВ) прибора «Наталья-2М»; б, в — спектры энерговыделений заряженных частиц (протонов) в энергетических каналах М (7–250 МэВ) и Н (50–1600 МэВ), набранные в режиме телескопа

заряженных частиц детекторами АК и АС. Их величины на орбите изменяются до сотен раз. Сигналы с АК и АС поступают на входы «запрета» амплитудно-цифровых преобразователей (АЦП) каналов и, в основном, они определяют «мертвое» время прибора. Для выбора величины порога были проведены измерения с различными значениями в диапазоне 0.25—4.0 МэВ. Величины порога устанавливались с помощью команд. В результате измерений было установлено, что изменение порога с 0.25 до 1.0 МэВ уменьшает скорость счета примерно в 1.5 раза. Выбраны рабочие пороги 1.0 МэВ, при этом «живое» время АЦП составляет в районе экватора 96—97.5 %, а в полярных областях — 84—89 %. При прохождении прибором ЮАА «жи-

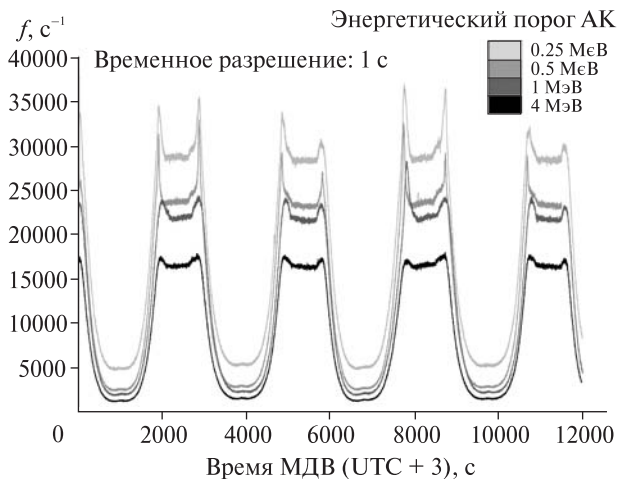


Рис. 7. Темп счета заряженных частиц детектором АК в зависимости от порога регистрации

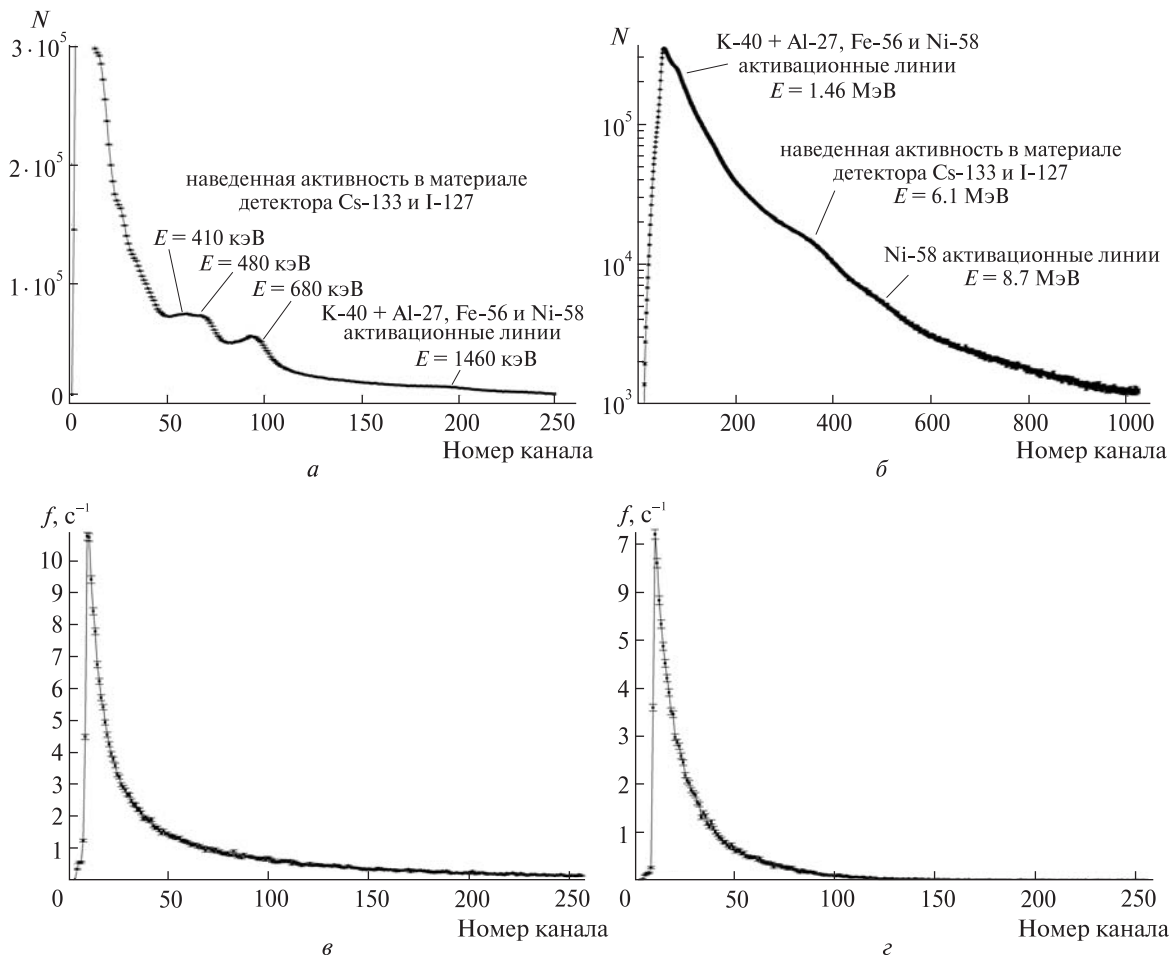


Рис. 8. Фоновые спектры в энергетических каналах прибора «Наталья-2М»: а — R3 (0.2—2 МэВ), б — L (1—18 МэВ), в — M (7—250 МэВ), г — H (50—1600 МэВ)

вое» время АЦП не превышает 7 %, т. е. прибор практически полностью блокируется.

После завершения настройки прибор «Наталья-2М» в полном объеме стал выполнять запланированную программу научных экспериментов. К сожалению, из-за низкой активности Солнца вспышек за прошедший период эксплуатации зарегистрировано не было. В качестве примера на рис. 8 показаны фоновые энергетические спектры, набранные в R, L, M и H-каналах 23 июня 2009 г. В R-канале хорошо видны проявления линий активации сцинтилляционных детекторов CsI(Tl) в областях энергий 410, 480 и 680 кэВ и конструктивных элементов прибора в области 1460 кэВ. В L-канале видны слабо выраженные линии от активации CsI(Tl) и конструктивных элементов прибора и КА (1.46, 6.2 и 8.7 МэВ). Положения активационных линий будут использоваться для контроля характеристик каналов в полёте. В M и H-каналах никаких особенностей в спектрах не наблюдается.

За время настройки и проведенных измерений прибором «Наталья-2М» было зарегистрировано несколько событий типа «гамма-всплеск» (GRB 090408, GRB 090618 и др.). Временные профили событий хорошо согласуются с измерениями, сделанными другими приборами КНА «ФОТОН» (ПИНГВИН-М, КОНУС-РФ, БРМ), что подтверждает возможность регистрации солнечных вспышек и измерения их временных профилей и энергетических спектров.

В настоящее время прибор «Наталья-2М» функционирует в рабочем режиме и выполняет запланированную программу экспериментов.

1. Kotov Yu. D., Arkhangelsky A. I., Yurov V. N., et al. // Instrum. and Exp. Techn. — 1999. — 2, N 5. — P. 590—595.
2. Kotov Yu. D., Samoilenko V. T., Arkhangelsky A. I., et al. // Instrum. and Exp. Techn. — 1999. — 2, N 5. — P. 608—613.

Надійшла до редакції 01.10.09

Yu. D. Kotov, V. N. Yurov, A. I. Arkhangelsky,
M. V. Bessonov, A. S. Buslov, K. F. Vlasik,
A. S. Glyanenko, V. V. Kadilin, E. E. Lupar,
I. V. Rubtsov, V. G. Tyshkevich

THE HIGH-ENERGY RADIATION SPECTROMETER NATALYA-2M. INITIAL SWITCHING ON, TESTING THE OPERATION AND TUNING IN THE ORBIT OF THE SATELLITE CORONAS-PHOTON

The high-energy radiation spectrometer Natalya-2M with the complex of scientific instruments PHOTON onboard the satellite CORONAS-PHOTON was launched into a near-earth circular orbit on 30 January 2009. The device Natalya-2M is intended for the detection of gamma rays and neutrons in solar flares. The energy ranges are 0.2—1600 MeV for gamma rays and 20—300 MeV for neutrons. Before switching on the device in the orbit, its condition was analyzed with the use of onboard satellite telemetry data. On 19 February 2009 the instrument Natalya-2M was switched on. First and foremost the operation of all measuring channels was tested. On the next stage the optimization of detector SE parameters and the restoration of stabilization spectrometric channels system after passing the South Atlantic Anomaly (SAA) were performed.

We obtained the following results:

- an algorithm for the control cyclogram was selected for restoring the stabilization system after passing the SAA;
- the tuning of the Natalya-2M spectrometric detectors was made with the use of the calibrating radiation source;
- the optimal energy levels for anti-coincidence scintillation detectors were chosen.

At present the Natalya-2M instruments are functioning in working mode and are implementing the projected experiment program.

UDC 520.2+520.874.7

V. Kuz'kov¹, D. Volovyk¹, S. Kuzkov¹, Z. Sodnik², S. Pukha³

¹ Main Astronomical Observatory of NASU, Kyiv, Ukraine

² ESTEC ESA, Noordwijk, the Netherland

³ NTUU «KPI», Kyiv, Ukraine

REALIZATION OF LASER EXPERIMENTS WITH ESA'S GEOSTATIONARY SATELLITE ARTEMIS

A laser communication system was developed for space-to-ground laser-link experiments between the geostationary satellite ARTEMIS (orbital position is 21.5° East, orbital inclination is more than 7.2°) and optical ground-based station in Kyiv. The main elements of the system were implemented into the technology platform located at the Cassegrain focus ($F = 10.5$ m) of a 0.7-m astronomical telescope. The pointing and spatial correction system of the telescope was developed for tracking unstable geostationary satellites. A short description of the laser terminal of the ground-based telescope and the results of first tests for the beacon beam of the OPALE laser terminal of the satellite are presented.

Introduction. Within the ESA contract and continuing the previous activities [1–4, 7–9], the Main Astronomical Observatory of Kyiv (MAO) developed [5] some technologies to establish an optical communication link with the geostationary satellite ARTEMIS (orbital position is 21.5° East, inclination equals 7.2°). The developed technologies include the satellite tracking system for an astronomical 0.7-m aperture telescope. The telescope tracking system, which is automatically controlled (with the help of micro-step motors), follows the satellite using its calculated coordinates. The rms error of tracking was measured to be less than 0.68 arcsec along the hour axis and less than 0.34 arcsec along the declination axis during 5.2 min of tracking time. These tests were performed while observing ARTEMIS in reflected sunlight (a stellar magnitude of 12) using digital cameras mounted on the technology platform [6].

The digital cameras of pointing and tracking of the satellite, receiving avalanche photodetector (APD) module, laser diode transmitting module, and additional optical, mechanical components such as atmosphere turbulence compensation optical elements, polarization elements for separation between transmitting and receiving beams are implemented on the technology platform located at the Cassegrain focus ($F = 10.5$ m) of the AZT-2 telescope.

Short descriptions of developed modules and subsystems as well as the results of first tests of the beacon beam of the OPALE (Optical Payload Laser Experiment) laser terminal of the ARTEMIS satellite are presented in the paper.

An overview of the satellite and ground-based systems. At present ARTEMIS is a geostationary satellite with the increasing inclination. Its position on the sky is currently fluctuating up to $\pm 7.2^\circ$ in the North – South direction.

ARTEMIS is a multipurpose communication satellite with radio frequency communication terminals of the Ka, Ku, S, L bands and OPALE laser communication terminal onboard. Table gives the general parameters for the OPALE terminal.

The ground-based laser communication terminal is bound to receive signals from the OPALE terminal (Table) and to send a narrow laser beam in 843–853 nm spectral band with none or 49.3724 Mbps NRZ modulations and left-hand circular polarization.

AZT-2 of the MAO is a reflector-type telescope. The primary telescope mirror is 700 mm in diameter. The diameter of the secondary hyperbolic mirror of the Cassegrain system is 215 mm. The equivalent focus of the Cassegrain system is 10500 mm. The telescope is equipped with the refractor guide having an objective of 200 mm and a focus distance of 2500 mm.

The technological platform with implemented individual components for performing laser communication experiments with the ARTEMIS satellite is

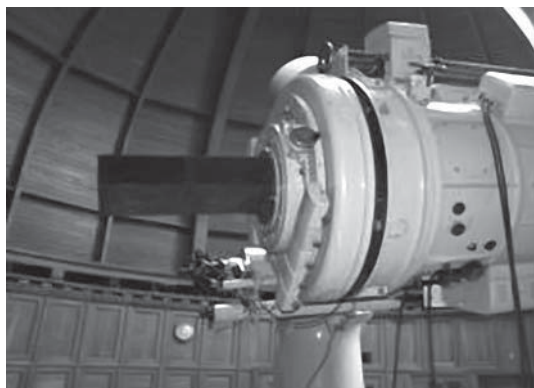


Fig. 1. The AZT-2 telescope with the technological platform in its Cassegrain focus

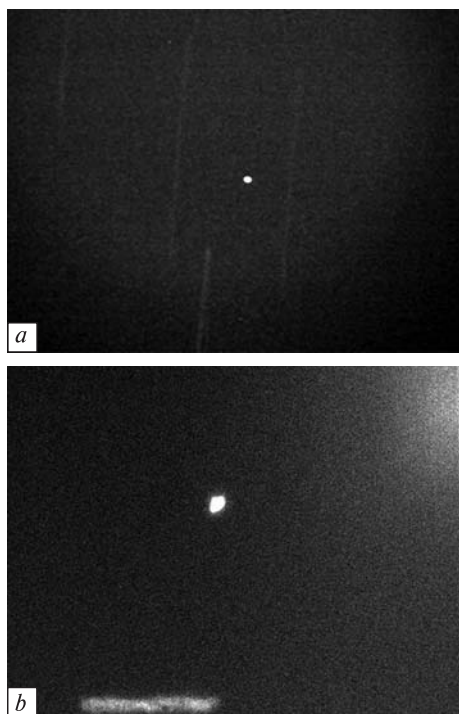


Fig. 2. ARTEMIS and star track images obtained with the use of the pointing camera (a) and the tracking of ARTEMIS by CCD camera (b)

connected with the Cassegrain focus of the AZT-2 telescope. Fig. 1 gives the common view of the technological platform connected with the telescope.

Pointing and tracking digital cameras. Digital cameras for pointing and tracking of the satellite are implemented on the technology platform. Pointing digital camera works with the focal reducer (from 10 m to 5 m), it has the CMOS sensor with 2000×3000 pixels and its field of view is 10.6×16 arcmin. It can operate with time exposures from $1/1000$ to 30 s and more. The focal reducer for the Cassegrain focus was constructed and installed on the technology platform. The following picture shows an example of the ARTEMIS images pointed with the use of this camera.

Another small digital CCD camera (ADC is 16 bits) for tracking of the satellite works without any focal reducer. It has thermoelectrically cooling of a CCD sensor (596×795 pixels) and its field of view is equal to 1.6×2.3 arcmin. The noise level is 0.02 e-/pixel/second and the exposure lies in the range from $1/1000$ s to several hours. Fig. 2 gives an image of tracks of the ARTEMIS and a star.

A receiving module. The receiving module is implemented on the technology platform and uses an avalanche photo detector (APD) cooled to a temperature of 4° C and low-noise electronic amplifiers. The sensitivity of the APD system is 0.15 nW in a bandwidth of 8 MHz [3].

Laser transmitting modules. The laser transmitting system uses a laser diode module, which is thermoelectrically stabilized in the temperature range from 8 to 25° C. The laser diode power is 150 mW, wavelength equals 851 nm. Laser modulation is possible with data rates up to 50 Mbps. The electronic module of power and thermoelectric stabilization is situated outside the technology platform.

Oscillators and a BER test module. The electronic module for generation of 49.3724 MHz, PRBS-15

General Parameters of OPALE Terminal

Beam	Beam divergence (FWHM)	Irradiation at Ground Station	Wave-length	Modulation	Polarization
Beacon beam	$750 \mu\text{rad}$	5 nW/m^2	801 nm	none	none
Communication beam	$5.5 \mu\text{rad}$	30 nW/m^2	819 nm	none or 2.048 Mbps NRZ	Left-hand circular

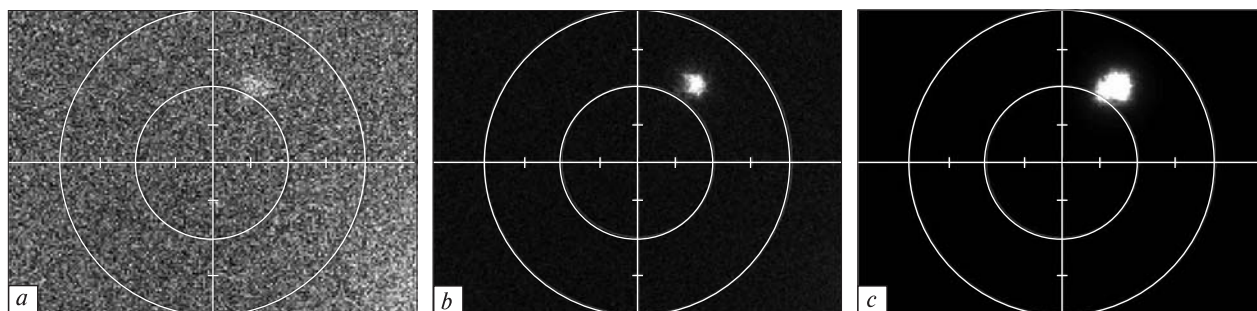


Fig. 3. *a* — ARTEMIS before the beacon start, *b* — the signal after the beacon start, *c* — the beacon signal maximum

(Pseudo Random Bit Sequence) signals and BER (Bit Error) test scheme was produced. To achieve 49.3724 Mbps, the 100 MHz oscillator with the temperature stability less than 5 ppm in the temperature range from -10°C to $+60^{\circ}\text{C}$ and a digital synthesizer is used. This electronic block with a generator and PRBS-15 modulation for a laser beam was produced and adjusted. The frequency was measured and turned out to be 49372320 Hz. The deviation from the nominal frequency is 80 Hz, that equals 1.6 ppm. This value is acceptable for the communication link. The BER test scheme for receiving and testing of 2.048 Mbps laser signals from OPALE was produced in the same module.

Precision of tracking and turbulence compensation.

For the precision of tracking of the satellite and for turbulence compensation, the multi-element (six elements) quadrant photodetector (QPD) module was developed. It operates with the laser moving module. The electronic module of power and precision tracking is situated outside the technology platform.

A quarter wave plate (QWP). To transform the linear polarization of the laser module into the necessary left-hand circular polarization, we use an achromatic in a 840–855 nm band $\lambda/4$ wave plate. [4].

Additional optical elements. Some additional optical elements such as beam splitters, filters and lenses were also implemented into the technology platform.

OPALE beacon test. There were three sessions of the OPALE beacon scanning during each night on 9 and 10 November. Each scanning started at 19, 20 and 21 UTC and extended over 6 min. The OPALE beacon performed the scanning in a double spiral (3+3 min) during each session. All the sessions of

beacon scanning of the first night (9 November) were recorded.

We calculated some part of the beacon images recorded at 21:00 on 9 November. Altogether, 478 images during 6 min of beacon scanning were obtained. We received the beacon signal during all the scanning time (6 min) beyond the time when the beacon beam was oriented to our telescope. We assume that it was a result of the scattering of the beacon beam by atmosphere aerosols. The first maximum of the beacon signal was received within 15 s after turning on the beacon. The second maximum was seen within 19 s after turning on the beacon. This situation repeated 3 min later.

We started observations of ARTEMIS in reflected sunlight before the start of the beacon with an exposure of 0.05 s. We observed bright beacon peaks and a small peaks when the beacon passed close to us. Fig. 3 gives the ARTEMIS images before and after the start of the beacon operation. The exposure was stable during all the observations and was equal to 0.05 sec. Fig. 3a shows an image of ARTEMIS before the beacon start (3.4×10^{-5} nW). Fig. 3b illustrates an image of the beacon beam after the start (1.3×10^{-3} nW). Fig. 3c shows the maximum of the beacon signal (2 nW) when the beacon passed across the observatory position.

We did not calculate all beacon images. Fig. 4 shows the brightness of the beacon during the first scan and after the start of the second scan. We observed similar not bright beacon peaks when the beacon was close to us.

Fig. 5 gives coordinated deviations of the beacon beam during the first scan. A calculated mean devia-

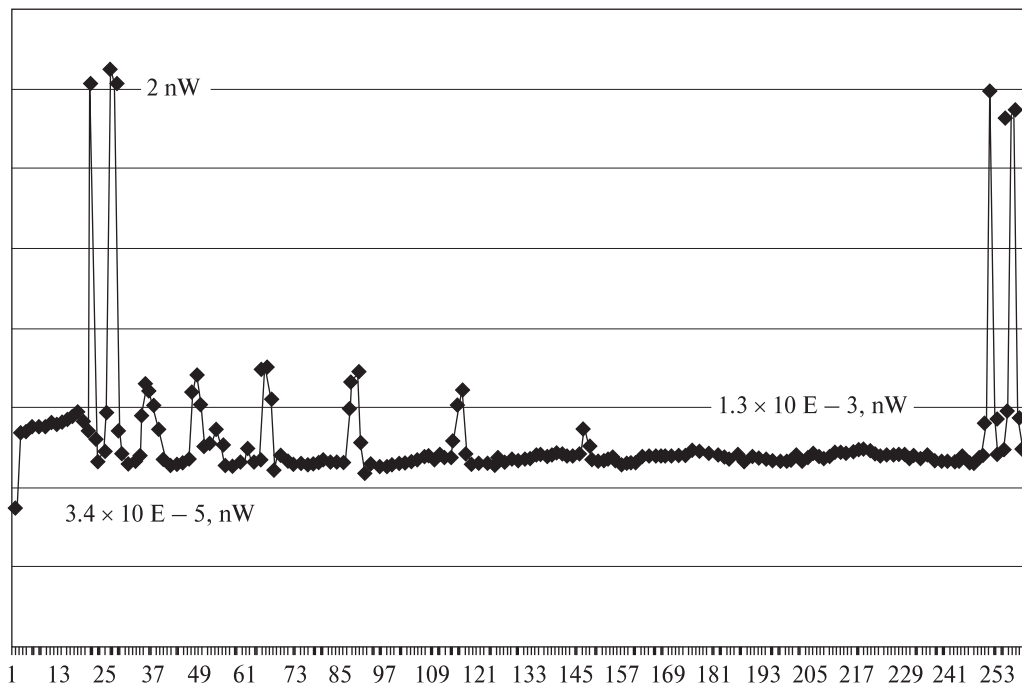


Fig. 4. Photometric data on the first beacon scan and a part of the second scan (258 images) from 21:00 UTC Quarter moon period. Exp. is 0.05 s, cycle is 0.78 s

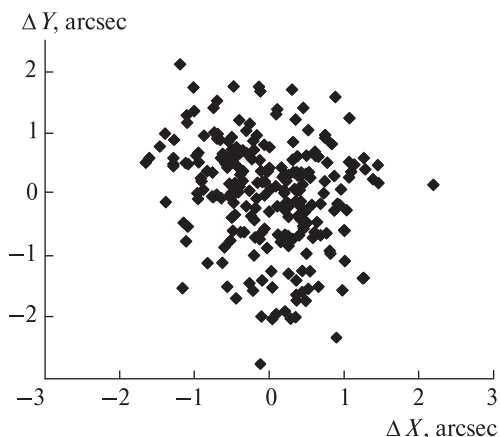


Fig. 5. A deviation of the ARTEMIS position during the first beacon scan. 236 images from 21:00 UTC, 9.11. 2008

tion for the beacon beam (Fig. 5) was $X = 0.56$ arcsec and $Y = 0.69$ arcsec.

The ARTEMIS beacon beam (750 micro radians) intensity on the Earth's surface is 5 nW/m^2 .

According to the attenuation by the telescope and optical elements, the maximum beacon signal observed by the CCD camera was approximately 2 nW

(the exposure was 0.05 s). From calculating the ARTEMIS signal before the beacon start, we estimated the signal/noise ratio for the maximum beacon signal of the CCD camera (the exposure was 0.05 s) as 5.9×10^4 while the beacon passed across the telescope position.

The ARTEMIS communication beam (5.5 micro radians) intensity on the Earth's surface is 30 nW/m^2 . The expected power at APD level after passing the signal across the telescope and optical elements is 9 nW . The APD receiving block sensitivity is 0.15 nW in the frequency band from 0 to 8 MHz. The calculated signal/noise ratio for the communication signal is about 30 for a 0.7-m telescope.

Conclusions. A laser communication system was developed for space-to-ground laser-link experiments between the ARTEMIS satellite and optical ground-based station in Kyiv. The main elements of the system were implemented into the technology platform located at the Cassegrain focus ($F = 10.5 \text{ m}$) of a 0.7-m astronomical telescope. The first laser experiments with the ARTEMIS satellite were performed. The OPALE laser terminal of ARTEMIS

performed spiral scanning of the MAO optical ground-based station. The receiving system detected the beacon during all the period while the beacon was operating (6 min for every time). We assume that it was the scattering of the laser beam by atmosphere aerosol particles. The first maximum of the beacon signal was received within 15 s after turning on the beacon. The second maximum was received within 19 s after turning on the beacon. This situation repeated 3 min later. The mean deviation of the beacon beam position during the beacon scan was $X = 0.56$ arcsec and $Y = 0.69$ arcsec. The signal/noise ratio for the maximum beacon signal was 5.9×10^4 for an exposure of 0.05 s of the CCD tracking camera. The expected signal-to-noise ratio for the communication signal is about 30. Signals are suitable for performing laser link experiments with the ARTEMIS satellite. The investigation was carried out according to ESA ESTEC contract № 19861 and with a financial support of NSAU.

REFERENCES

1. *Alonso A, Reyes M, Sodnik Z., et al.* Performance of satellite-to-ground communications link between ARTEMIS and the Optical Ground Station // Proc. SPIE. – 2004. – **5572**. – P. 372.
2. *Kuz'kov V. P., Medvedskii M. M., Yatskiv D. Ya., et al.* Preparation for optical Communication Experiments with the Geostationary Satellite ARTEMIS // Kosmichna Nauka i Tekhnologiya. – 2003. – **9**, N 4. – P. 79–83.
3. *Kuz'kov V. P., Nedashkovskii V. N.* A Receiver with an Avalanche Photodiode for the Optical Communication Channel from a Geostationary Satellite // Instruments and Experimental Techniques. – 2004. – **47**, N 4. – P. 513–515.
4. *Kuz'kov V. P., Nedashkovskii V. N., Savenkov S. N., et al.* Investigation of the polarization of the laser transmitting module for communication experiments with the geostationary satellite ARTEMIS (ESA) // Kosmichna Nauka i Tekhnologiya. – 2006. – **12**, N 1. – P. 23–28.
5. *Kuz'kov V., Sodnik Z., Kuz'kov S., et al.* Laser communication experiments with a geostationary satellite from a ground telescope // Kosmichna Nauka i Tekhnologiya. – 2008. – **14**, N 2. – P. 51–55.
6. *Kuz'kov V, Volovyk. D., Kuz'kov S., et al.* Pointing and tracking systems of the telescope for laser communication experiments with a geostationary satellite // Kosmichna Nauka i Tekhnologiya. – 2009. – **15**, N 5. – P. 68–73.
7. *Reyes M., Alonso A., Sodnik Z., et al.* Ground to space optical communication characterization // Proc. SPIE. – 2005. – **5892**. – P. 1–16.
8. *Reyes M., Sodnik Z., Lopez P., et al.* Preliminary results of the in-orbit test of ARTEMIS with the Optical Ground Station // Proc. SPIE. – 2002. – **4635**. – P. 38–49.
9. *Tolker-Nielsen T., Oppenhauser G.* In-orbit test result of an operational optical inter satellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX // Proc. SPIE. – 2002. – **4635**. – P. 1–15.

Received October 1, 2009

В. Кузьков, Д. Воловик, С. Кузьков, З. Соднік, С. Пуха

РЕАЛІЗАЦІЯ ЛАЗЕРНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ГЕОСТАЦІОНАРНИМ СУПУТНИКОМ СКА ARTEMIS

Розроблено лазерну комунікаційну систему для експериментів між геостационарним супутником ARTEMIS (положення на орбіті 21.5° с. д., нахил орбіти 7.2°) і наземною оптичною станцією в Києві. Головні елементи системи вбудовано в технологічну платформу, розташовану у фокусі Кассегрена ($F = 10.5$ м) 70-см астрономічного телескопа. Розроблено систему наведення і корекції руху телескопа для супроводження нестабільних геостационарних супутників. Дається короткий опис лазерного терміналу наземного телескопа і результати перших тестувань лазерного маяка супутникового лазерного терміналу.

UDC 579.65

N. O. Kozyrovska¹, I. E. Zaetz¹, O. P. Burlak¹, I. S. Rogutskyy²,
O. V. Mytrokhyn³, S. P. Mashkovska⁴, B. H. Foing⁵

¹ Institute of Molecular Biology & Genetics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

² Institute of Physics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³ Taras Shevchenko Kyiv National University, Kyiv, Ukraine

⁴ National Botanical Garden of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

⁵ ESA/ESTEC/SCI-SR, Noordwijk, The Netherlands

THE CONCEPTION OF GROWING FIRST GENERATION-PLANTS IN LUNAR GREENHOUSES

The ability to grow plants in greenhouses is a practical necessity for providing an advanced life support system for humans while inhabiting a permanently manned lunar base. Plants will provide fresh food, oxygen, and clean water for explorers living in lunar bases. The conception of first-generation plants growing in a lunar base anticipates them to play a main role in forming a protosoil of acceptable fertility needed for purposively growing second generation-plants (wheat, rice, etc.) at a low cost. The residues of the first generation-plants could be composted and transformed by microorganisms into a soil-like substrate within a loop of regenerative life support system. To reduce a cost of early missions to the Moon, it would be practical to use a local material such as the lunar regolith for plant growing in lunar greenhouses. The use of microorganisms for plant inoculation to leach nutritional elements from regolith, to alleviate lunar stressful conditions, to decompose both silicate rocks and plant straw needed for a protosoil formation is a key idea in a precursory scenario of growing pioneer plants for a lunar base.

INTRODUCTION

A lunar rock considered as a potential substrate for a plant growing. The European Space Agency and other space agencies have outlined new visions for solar system exploration that will include a series of lunar robotic missions to prepare for and support a human return to the Moon for future human exploration of Mars and other destinations [12]. In this connection, a permanently manned lunar base (PMLB) is a not-too distant future. A greenhouse within/outside the habitation will be a reality which is being planning nowadays. From the very beginning of an *in situ* Moon exploration, it seems to be practical and cost-effective to use a local material for a plant growing. This effort would need to be integrated closely with bioregenerative life support system. The biotechnological process to release some elements from regolith for propellant and food manufacture can be unified with a processing regolith for a fertile protosoil preparation.

A bioavailability of regolith for plant nutrition and its putative safety had to be tested at first. Various species of plants have been exposed to lunar materials delivered from the Moon to evaluate the biological impact of regolith. Botanical studies indicated that lunar material from Apollo 11 and 12 outposts could provide mineral nutrients for germinating seeds, for liverworts growth, and plant tissue cultures development [15, 36, 39]. The general conclusion was that lunar rock used as a substrate to grow plants was of a low bioavailability and needed some amendment. Moreover, regolith fines aggregated under watering, and the substrate aeration appeared to become worse [25, 37].

Under a scarcity of native lunar material, as a first step, terrestrial analogs may be evaluated in simulation experiments on a plant growing. In model experiments French marigold (*Tagetes patula* L.) could grow in a crushed rock, anorthosite, terrestrial counterpart of a lunar rock, however, a deficit of nutritional substances and probably plant intoxication by liberated ions of some elements did not allow marigold to grow normally [17]. When a consortium of well-defined plant-associated bacteria and mycorrhizal fungi were

© N. O. KOZYROVSKA, I. E. ZAETZ, O. P. BURLAK,
I. S. ROGUTSKYY, O. V. MYTROKHYN, S. P. MASHKOVSKA,
B. H. FOING, 2010

used for seed and substrate inoculation, a plant development was improved [17, 18, 22]. In the NASA-associated study *Arabidopsis* plants were grown in a JSC1a lunar simulant and natural terrestrial analogs. Evaluation of substrates for their potency to support plant growth with and without supplies showed that the native rock and soils required a variety of mitigation steps to support plant growth [11].

Another conception of growing plants in outposts anticipates to use the man-made soils delivered to the lunar surface from the Earth in ready-to-use form. This idea is proposed by A. Tikhomirov in cooperation with J.-B. Gros [9, 33–35] and developed by Liu et al. [20]. Basic characteristics of SLS is a similarity to organogenic fertile soils. In addition, it has high protective properties against phytopathogenic microorganisms, and a regenerative capacity of SLS makes it as element of BLSS. However, it seems costly to fly supplies there from the Earth, even on initial stages.

Terrestrial anorthosites as counterparts to lunar anorthosites. The most representative geomorphic and geologic structures on the Moon are lunar continents and mare which have differences in petrologic content of regolith. According to orbital data of Apollo-14, Apollo-16 and Luna-20, providing sampling of material, highlands are formed by most ancient rocks, described as the ANT association (anorthosite-norite-troctolite), and less distributed dunite and KREEP (K, Rare Earth Element, P) basalt. The main rock-forming minerals of anorthosites are calcium-containing plagioclase $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$, pyroxene (Mg, Fe,Ca) $(\text{Mg,Fe})[\text{Si}_2\text{O}_6]$, and olivine $(\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4]$ [26]. The lunar mare are formed mainly gabbrro. The variation in composition of Apollo-11 through 15 lunar materials used in botanical studies was described by P. H. Johnson et al. [14]; they contained practically all elements needed for plant growth except for C and N.

Ukrainian rocks from Korosten Pluton (Penizevitshi, Turchynka deposits, Zhytomyr oblast) provide suitable test-bed for modeling biomobilization of plant-essential elements from lunar-like rocks. The Penizevitshi anorthosite in addition to intermediate plagioclase, low-calcium pyroxene and olivine contains minor quantities of ilmenite FeTiO_3 , orthoclase $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$, biotite $\text{K}(\text{Mg,Fe})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2]$, and apatite $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3(\text{F,OH,Cl})$ [26]. The Turchynka type anorthosite is composed of plagioclase,

pyroxene of low-calcium content, and olivine [26, 27]. As compared to average composition of lunar anorthosite, Ukrainian anorthosites contain a bit more SiO_2 , Na_2O , FeO , MgO , TiO_2 and less CaO and Al_2O_3 that reflect more «alkaline» composition of plagioclase and a higher content of mafic minerals. There are other rock deposits on the Earth, like the Stillwater (Minnesota, USA) and the Skaergaard Intrusion (East Greenland) complexes which are counterparts to lunar anorthosites [3].

Microorganisms as helpers to improve rocks bioavailability. Rocks contain nearly all the elements essential for growth except for organogenic ones, however, they are of low availability for plants. To use a local lunar material could be profitably, both as a substrate to implant seeds or seedlings and also as a source of essential nutritional elements for a plant growing, however, its availability should be improved. A rationally assembled consortium of microorganisms (RACM) could be applied to liberate plant-essential elements. According to the Committee on Space Research's (COSPAR's) planetary protection policy, decontamination procedures for the Moon are not anticipated because of absence conditions for a life.

Microorganisms are essential plant partners, and a plant innate immunity is suppressed without them [32]. There is a less chance for the plant to survive under stressful conditions and to resist both abiotic and biotic stressors without microbes [21, 40]. Plant growth-promoting rhizobacteria provide protection against soil-borne plant pathogens by antagonistic mechanisms [19]. Plant-associated bacteria, colonizing the root surface, can also trigger systemic resistance in aerial portions of the plant [24, 31]. It is known a capability of any bacteria to reduce accumulation of some heavy metals is known [6, 10]. With the aim to support the plant growth under hostile stressful conditions we propose to prime a plant-candidate with beneficial microbes to prevent suppression of plant immunity, to stimulate plant development, and to provide plants with a bio-factory for substrate leaching and releasing essential elements for plant growth [17, 22, 41]. In further programs helpful microbial communities will be used in biotechnologies to decompose the lunar material for biomining and extraction of needed elements [5].

The stable community of balanced populations of bacteria, cyanobacteria, algae, and fungi will be involved in a promoting plant biomass production and composting plant residuals, as well as in a biodegradation of the rocky substrate with the aim to form protoil of acceptable fertility needed for purposely growing successive generations of plants like wheat, rice, soy, etc. A use of RACM to decompose a local lunar material will help reducing the need for supplies from the Earth. On either step, microbial community must be subjected to control a contamination of facilities etc.

Plants as candidates for protoil preparation. In a long story of resistant plants selection for a fertile soil forming, plant responses on a hostile lunar environment will be studied in biological experiments on payloads [12, 30]. Later selected resistant plants will be involved in different programs at PMBL either to support human beings at habitation or to exploit them for *in situ* resource utilization (ISRU) purposes. The program of industrial growing plants begins from protoil forming. The first plants must produce acceptable biomass for converting into a fertile protoil. One of such a plant candidate is marigold. In the future stages of lunar agroindustry, this plant species may be also applied to recover a tired plant-growing substrate by producing secondary metabolites (allelochemicals) [23]. Marigold is an ideal harbor of arbuscular mycorrhizal fungi and could be used as industrial accumulator of fungi needed for «green» agro-industry. Beside the pragmatic side, the marigold could perform a role in esthetic decoration of the hostile environment of PMBL: the beautiful image of marigold cultivars, familiar to everybody and lovely, would remind an earthly spirit to habitants of PMLB and improve the emotions of lunar explorers.

In situ soil forming. The idea of composting lunar fines with waste products from a manned base was proposed by Walkinshaw and Galliano [37]. Formation of a protoil by microorganisms, composting crop residues, for purposely growing plants is being studied [9, 33–35]. Nowadays it seems to be practical to integrate *in situ* terraforming and waste recycling systems with ISRU to accommodate PMLB and to reduce the demand for energy, transfer mass and cost of future exploration [17, 18]. What microorganisms could be involved in «a lunar» biotechnology of a

protoil forming? It is known that a subset of lithotrophic *Bacteria* and *Archaea* derives their metabolic energy from inorganic substrates (e.g., Mn^{+2} , Fe^{+2} , S etc) and so far associates closely with minerals [4, 7, 16, 29]. Beside them, a wide variety of microorganisms and low eukaryotes interact with mineral surfaces, and among the most familiar are lichens [1], cyanobacteria [5, 8, 13], and fungi [28]. Dissolution of minerals results in releases of ions essential for plant nutrition. A study of a role of microbial communities in degradation of the structural integrity of lunar analogs is the first step to a protoil forming. Microorganisms modify rates of chemical and physical weathering and clay forming which play a fundamental role in a soil like substrate forming. Terrestrial rocks provide a suitable test-bench for modeling biodegradation of lunar rock counterparts, using epi- and endolythic microorganisms. First our results on biocorrosion of the Penizevichi type anorthosite in a contact with *Paenibacillus* sp. were published [22]. Bio-signatures in the calciferous rock have been observed after removing the lichen *Xanthoria elegans* (J.-P. de Vera, personal communication). Results on a model study of the lunar simulant bioweathering demonstrated the physical decrease of the size of a Minnesota basalt grain after dissolution by a cyanobacterium [5]. From examining a biodegradation of a lunar-like rock in a concert with a biocomposting of plant biomass under assistance of microbial community, we will get some valuable information on first signs in terraforming.

Simulative study of biomobilization from a lunar rock by plants and microorganisms. There are evidences that plants mobilize both plant-essential and toxic elements from rocks. For example, seeds germinated in the Apollo-14 lunar material accumulated large quantities of iron, titanium, and other elements [38]. Further studies revealed that lettuce seedlings exposed to neutron-activated Apollo-11 and Apollo-14 lunar fines absorbed scandium, cobalt, manganese, and a variety of elements that included rare earth elements [2]. Apollo-16 investigations showed that cabbage seedlings grown in contact with lunar material accumulated high concentrations of aluminum. Our studies exhibited accumulation of Zn, Fe, Ni, Cr by French marigold grown in the terrestrial anorthosite [41]. It is clear that plants cannot consume

elements from a substrate selectively, and therefore there is concern on human health associated with biomobilization of heavy metals from a rocky substrate for growing plants. The regolith must be tested for ion-exchange capacity and toxicity in simulative model ground-based experiments. The purpose of our study was to examine bioleaching capacity of both bacteria and a plant in contact with anorthosite of the Turchynka deposit and accumulation released elements by plants in model plant microcosms under controlled conditions. In model experiments, the presence of bacteria on the marigold roots improved antioxidant systems of the plant-host and so far protected marigold against toxic doses of accumulated heavy metals. The rationally assembled consortium of bacterial strains promoted a growth of marigold and supported the plant development under growth-limiting conditions by bioleaching and delivering essential nutritional elements to the plant. Due to the bacterial consortium, the model plant was supplied with an additional amount of some basic macro- and microelements. Bacteria corrected Ca/Mg and Fe/Mn-ratio in marigold, approaching them to physiologically optimal.

CONCLUSIONS

Growing first-generation plants such as the French marigold in the presence of a community of microorganisms, including eubacteria, cyanobacteria, mycorrhizal fungi, etc and converting the plant residues by microbes into a soil-like substrate may give the beginning of agro-industry at PMBL. However, bioaugmentation strategy of growing plants for lunar bases needs comprehensive study and a wider body of evidences. The shift in a planetary protection policy from that of absolute sterilization to a probabilistic approach opens the possibility for plant inoculation in green houses, as well as ISRU under assistance of microbial communities.

Acknowledgement. The authors are thankful to the National Space Agency of Ukraine for a financial support, grant N 35-7/08.

REFERENCES

1. *Banfield J., Barker W., Welch S., et al.* Biological impact on mineral dissolution: Application of the lichen model to understanding mineral weathering in the rhizosphere // *PNAS*. — 1999. — P. 3404—3411.
2. *Baur P. S., Clark R. S., Walkinshaw C. H., et al.* Uptake and translocation of elements from Apollo 11 lunar material by lettuce seedlings // *Phyton*. — 1974. — N 32. — P. 133—142.
3. *Bérczi Sz., Józsa S., Szakmány G., et al.* Studies of solar system cumulate rocks from NASA Lunar set and NIPR Martian meteorites // EPSC2008-A-00272, European Planetary Science Congress, EPSC Abstracts. — 2008. — Vol. 3.
4. *Bond P. L., Smriga S. P., Banfield J. F.* Phylogeny of microorganisms populating a thick, subaerial, predominantly lithotrophic biofilm at an extreme acid mine drainage site // *Appl. Environ Microbiol.* — 2000. — **66**. — P. 3842—3849.
5. *Brown I., Sarkisova S. A., Garrison D. H.* Bioweathering of lunar and Martian rocks by cyanobacteria: a resource for Moon and Mars exploration // *Lunar and Planetary Science*. — 2008. — **34**. — 1673 pdf.
6. *Burd G. I., Dixon D. G., Glick B. R.* Plant growth-promoting bacteria that decrease heavy metal toxicity in plants // *Can. J. Microbiol.* — 2000. — **46**, N 3. — P. 237—245.
7. *Edwards K. J., Bond P. L., Gihring T. M., et al.* An archaeal iron-oxidizing extreme acidophile important in acid mine drainage // *Science*. — 2000. — **287**, N 5459. — P. 1796—1799.
8. *García-Pichel F.* Plausible mechanisms for the boring on carbonates by microbial phototrophs // *Sediment. Geol.* — 2006. — **185**. — P. 205—213.
9. *Gros J. B., Poughon L., Lasseur C., et al.* Recycling efficiencies of C, H, O, N, S, and P elements in a Biological Life Support System based on microorganisms and higher plants // *Adv. Space Res.* — 2003. — **31**, N 1. — P. 195—199.
10. *Faisal M., Hasnain S.* Bacterial Cr(VI) reduction concurrently improves sunflower (*Helianthus Annuus* L.) growth // *Biotechnol Lett.* — 2005. — **27**, N 13. — P. 943—947.
11. *Ferl R. J., Paul A.-L.* Plants in long term lunar exploration // NLSI Lunar Science Conference (July 20—23, 2008, California). — California, 2008. — 2159.pdf
12. *Foing B. H., Bhandari N., Goswami J. N., et al.* Udaipur Lunar Declaration 2004 // *Adv. Space Res.* — 2008. — **42**. — P. 240—241.
13. *Friedmann E. I., Hua M., Ocampo-Friedmann R.* Terraforming Mars: dissolution of carbonate rocks by cyanobacteria // *J. Br. Interplanet Soc.* — 1993. — **46**. — P. 291—292.
14. *Johnson P. H., Walkinshaw C. H., Martin J. R., et al.* Elemental analysis of Apollo 15 surface fines used in biological studies in the Lunar Receiving Laboratory // *BioScience*. — 1972. — **22**. — P. 96—99.
15. *Johnston R. S., Mason I. A., Wooley B. C.* Biomedical results of Apollo // *NASA Spec. Publ.* — 1975. — P. 407—424.
16. *Kandler O.* The early diversification of life // *Nobel Symp.* — 1994. — **84**. — P. 152—160.
17. *Kozyrovskaya N. O., Korniiuchuk O. S., Voznyuk T. M., et al.* Microbial community in a precursory scenario of growing *Tagetes patula* L. in a lunar greenhouse // *Kosm. Nauka Technol. (Space Sci. Technol.)*. — 2004. — **10**, N 5/6. — P. 221—225.

18. Kozyrovska N. O., Korniiuchuk O. S., Voznyuk T. M., et al. Growing pioneer plants for a lunar base // *Adv. Space Res.* — 2006. — **37**. — P. 93–99.
19. Lemanceau P., Bakker P. A., De Kogel W. J. Effect of pseudobactin 358 production by *Pseudomonas putida* WCS358 on suppression of fusarium wilt of carnations by nonpathogenic *Fusarium oxysporum* Fo47 // *Appl. Environ. Microbiol.* — 1992. — **58**, N 9. — P. 2978–2982.
20. Liu H., Yu C. Y., Manukovsky N. S., et al. A conceptual configuration of the lunar base bioregenerative life support system including soil-like substrate for growing plants // *Adv. Space Res.* — 2008. — **42**. — P. 1080–1088.
21. Liu J., Maldonado-Mendoza L., Lopez-Meyer M., et al. Arbuscular mycorrhizal symbiosis is accompanied by local and systemic alterations in gene expression and an increase in disease resistance in the shoots // *Plant J.* — 2007. — **50**, N 3. — P. 529–544.
22. Lytvynenko T., Zaetz I., Voznyuk T. M., et al. A rationally assembled microbial community for growing *Tagetes patula* L. in a lunar greenhouse // *Res. Microbiol.* — 2006. — **157**. — P. 87–92.
23. Mashkovska S. P. An accumulation and a role of the volatile oils in forming the allelopathic potential in marigold (*Tagetes* L.) // *Dopovidi Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy (Proc. Nat. Acad. Sci. Ukraine)*. — 2003. — **6**. — P. 167–170 (Ukr).
24. Maurhofer M., Hase C., Meauwly P., et al. Induction of systemic resistance of tobacco to tobacco necrosis virus by the rootcolonizing *Pseudomonas fluorescens* strain CHA0: influence of the *gacA* gene and of pyoverdine production // *Phytopathology*. — 1994. — **84**. — P. 139–146.
25. Monje O., Stutte G. W., Goins G. D. Farming in space: Environmental and biophysical concerns // *Adv. Space Res.* — 2003. — **31**. — P. 151–167.
26. Mytrokhyn O. V., Bogdanova S. V., Shumlyansky L. V. Anorthosite rocks of Fedorivskyy suite (Korosten Pluton, Ukrainian Shield) // *Current problems of geological science*. Eds. Kyiv State University, Kyiv, 2003. — P. 53–57.
27. Mytrokhyn O. V., Bogdanova S. V., Shumlyansky L. V. Polybaric chrysalization of Korosten Plyn anorthosites (Ukrainian shield) // *Mineral. J.* — 2008. — **30** (12). — P. 36–56 (Ukr).
28. Natarajan K. A., Modak J. M., Anand P. Some microbiological aspects of bauxite mineralization and beneficiation // *Miner. Metallurg. Proces.* — 1997. — **14**. — P. 47–53.
29. Pace N. R. A molecular view of microbial diversity and the biosphere // *Science*. — 1997. — **276**. — P. 734–740.
30. Paul A.-L., Ferl R. J. Telemetric biology: evaluating *in situ* resources for biological payloads in a lunar lander // *Joint Annual Meeting of LEAG-ICEUM-SRR* (28–30 Oct 2008, Florida). — Florida, 2008. — 4070 pdf.
31. Pieterse C. M. J., Van Wees S. C. M., Van Pelt J. A., et al. A novel signaling pathway controlling induced systemic resistance in *Arabidopsis* // *Plant Cell*. — 1998. — **10**. — P. 1571–1580.
32. Podolich O. V., Ardanov P. E., Voznyuk T. M., et al. Endophytic bacteria from potato *in vitro* activated by exogenic non-pathogenic bacteria // *Biopolym. Cell.* — 2007. — **23**, N 1. — P. 21–28.
33. Tikhomirov A. A., Ushakova S. A., Manukovsky N. S. Mass exchange in an experimental new-generation life support system model based on biological regeneration of environment // *Adv. Space Res.* — 2003. — **31**. — P. 1711–1720.
34. Tikhomirov A. A., Ushakova S. A., Manukovsky N. S. Synthesis of biomass and utilization of plant wastes in a physical model of biological life-support system // *Acta Astronaut.* — 2003. — **53**. — P. 249–257.
35. Ushakova S. A., Zolotukhin I. G., Tikhomirov A. A., et al. Some methods for human liquid and solid waste utilization in bioregenerative life-support systems // *Appl. Biochem. Biotechnol.* — 2008. — **151**, N 2–3. — P. 676–685.
36. Walkinshaw C. H., Sweet H. C., Venketeswaran S., et al. Results of Apollo 11 and 12 quarantine studies on plants // *BioScience*. — 1970. — **20**. — P. 1297–1302.
37. Walkinshaw C. H., Galliano S. G. New crops for space bases // *Advances in new crops* / Eds J. Janick, J. E. Simon. — Timber Press, 1990. — P. 532–535.
38. Walkinshaw C. H., Johnson P. H. Analysis of vegetable seedlings grown in contact with Apollo 14 lunar surface fines // *HortScience*. — 1971. — **6**. — P. 532–535.
39. Weete J. D., Walkinshaw C. H. Apollo 12 lunar material — effects on plant pigments // *Can. J. Bot.* — 1972. — **50**, N 1. — P. 101–104.
40. Yang J., Kloepper J. W., Ryu C. M. Rhizosphere bacteria help plants tolerate abiotic stress // *Trends Plant Sci.* — 2009. — **14**, N 1. — P. 1–4.
41. Zaetz I., Voznyuk T., Kovalchuk M., et al. Optimization of plant mineral nutrition under growth-limiting conditions at a lunar greenhouse // *Kosm. Nauka Technol. (Space Sci. Technol.)*. — 2006. — **12**, N 4. — P. 1–8.

Received October 1, 2009

Н. О. Козировська, І. Є. Заєць, О. П. Бурлак, І. С. Рогутський, О. В. Митрохін, С. П. Машковська, Б. Фойнг

КОНЦЕПЦІЯ ВИРОЩУВАННЯ ПЕРШОЇ ГЕНЕРАЦІЇ РОСЛИН У МІСЯЧНИХ ОРАНЖЕРЕЯХ

Можливість вирощувати рослини в оранжереях є необхідною умовою для забезпечення досконалою системою життєзабезпечення для людей, які чергують на місячній базі. Рослини надаватимуть свіжу їжу, кисень і чисту воду для дослідників, які живуть на місячній базі. Концепція першого покоління рослин, вирощених на місячній базі, передбачає, що рослини будуть відігравати основну роль у формуванні ґрунту належної родючості, необхідної для вирощування рослин наступних поколінь (пшениця, рис тощо) за низьких витрат. У циклі регенеративних систем життєзабезпечення залишки рослини першого покоління може бути перетворено мікроорганізмами в компост. Для зниження витрат у ранніх місяцях на Місяць на рослинництво було доцільно в місячних оранжереях використовувати місцевий матеріал, місячний реголіт. Використання мікроорганізмів для інокуляції рослин з метою вилучення елементів з реголіту для живлення рослин, послаблення дії місячних стресових умов, компостування рослин та силікатних порід, необхідного для формування ґрунту, є ключовою ідеєю у попередньому сценарії вирощування рослин-піонерів для місячної бази.

UDC 579.65

**O. P. Burlak¹, O. V. Lar¹, I. S. Rogutskyy², B. A. Danilchenko², O. M. Mikheev³,
I. Ye. Zaets¹, J.-P. de Vera⁴, B. H. Foing⁵, N. O. Kozyrovska¹**

¹ Institute of Molecular Biology & Genetics of NASU, Kyiv, Ukraine

² Institute of Physics of NASU, Kyiv, Ukraine

³ Institute of Cell Biology & Genetic Engineering of NASU, Kyiv, Ukraine

⁴ Institute of Planetary Science, DLR, Berlin, Germany

⁵ ESA/ESTEC/SRE-S, postbus 299 NL-2200 AG, Noordwijk, The Netherlands

A BACTERIAL CONSORTIUM ATTENUATES THE LOW-DOSE GAMMA-IRRADIATION EFFECT IN KALANCHOE PLANTLETS

The ability of plants to protect themselves against ionizing radiation is limited. One of the ways how to alleviate irradiation consequences in plants is to use plant-associated bacteria for inoculation. Two defined plant growth promoting bacterial strains were used for inoculation Kalanchoe daigremontiana plantlets before acute irradiation with γ -quanta (⁶⁰Co). The lethal γ -rays doses were 3.0 kGy for Klebsiella oxytoca IMBG26, and 500 Gy for Paenibacillus sp. IMBG156. The bacteria expressed the increase of the pelX promoter activity after sublethal dose irradiation. The pelX promoter activity that was measured as activity of β -galactosidase of the pelX::lacZ fusion in K. oxytoca (pGalP) was 0,88 mkM/ml·min after exposure to 2.0 kGy, e.a. 80 % of the control (untreated) bacterial activity, although the irradiated bacterial population comprised 1.25 % of control one. Integrated index of plantlets development which was relied on both root number and root length reflected fluctuations in metabolic processes in irradiated plantlets without treatment with bacteria. Stabilizing stress-reactions occurred during 10 days after irradiation at different doses (30, 50, 70 Gy), however, index of growth (IG) remained at the level of 30–60 % to control plantlets. The effect of irradiation on kalanchoe plantlets was relieved by bacteria at doses of 30 and 50 Gy, moreover, IG was observed at levels of 500 and 200 %, respectively. A 30 Gy dose was obviously stimulating for K. daigremontiana plantlets. Intense root elongation, instead of development of new coronal roots, led to fast adaptation to stressful conditions and normalization of metabolic processes in kalanchoe plantlets. However, integrated index showed inhibition of both inoculated and non-inoculated plantlets development after getting a 70 Gy dose.

INTRODUCTION

Plants have adapted to respond to abiotic stressors at the molecular, cellular, physiological, and biochemical levels, enabling them to survive. It is suggested that Ionizing Radiation (IR) tolerance in plants relied not only on general but species-specific defense systems [5]. Exposure plants to a low dose rate of IR leads to an efficient induction of anti-oxidant enzyme activities involved in plant protection against reactive oxygen species [24]. A DNA hypermethylation that prevents genome instability is viewed as a defence strategy of plants, allowing survival in the extreme environment [9]. Plant cell protein, as well as storage proteins play roles in plant adaptation mechanism to radioactivity [5, 21]. Various plant species differ in

sensitivity to radiation, depending on efficiency of defense mechanisms. For example, acute irradiation (60 Gy) of pine (*Pinus sylvestris*) resulted in death of pine trees near the Chernobyl atomic power station [1]. By contrast, the lethal dose for Arabidopsis was estimated to be more than 150 Gy [8].

To relieve the hazardous effect of IR in plants might involve the use of microorganisms [20]. The extremely radiation-resistant species of bacteria can survive acute exposures to ionizing radiation and can grow under chronic IR (60 Gy/hour) [14]. For example, *Deinococcus radiodurans* can survive levels of IR (10 kGy) that induce approximately 100 DNA double-strand breaks (DSBs) per genome, whereas *Shewanella oneidensis* is killed by levels of IR (0.07 kGy) that result in 1 DSB per genome. Microbes have evolved several mechanisms to tolerate IR. M. Daly with co-authors (2004) suggested that in resistant bacteria the degree of resistance is determined

© O. P. BURLAK, O. V. LAR, I. S. ROGUTSKYY,
B. A. DANILCHENKO, O. M. MIKHEEV, I. YE. ZAETS,
J.-P. DE VERA, B. H. FOING, N. O. KOZYROVSKA, 2010

not by efficient DNA repair system, but by the level of oxidative protein damage caused during irradiation. Their hypothesis of extreme IR resistance in *D. radiodurans* is that non-enzymic Mn(II) complexes present in resistant bacteria protect proteins, but not DNA, from oxidation during irradiation, with the result that conventional enzyme systems involved in recovery survive and function with far greater efficiency than in sensitive bacteria [3, 4]. The proposed mechanism of extreme IR resistance requires a high intracellular Mn/Fe concentration ratio. Except genes involved in manganese import, the genes coding for nutrient import and DNA repair are likely important for survival and adaptation of deinococci to its hostile environment [6]. Other radiation-resistance mechanisms are in relationship to protective systems such as antioxidative enzymes which involve peroxidase, catalase, and superoxide dismutase [13]. These bacterial enzymes represent an important defensive system against reactive oxygen species induced by hydrogen peroxide and/or radiation. Several bacteria possess a substantial amount of non-enzymatic systems (e. g., vitamins A and E) which contribute to the resistance phenomenon against the deleterious effects of radiation damages.

Two dual strains of bacteria, *Klebsiella oxytoca* IMBG26 and *Paenibacillus* sp. IMBG156, are known as plant growth promoting bacteria [10] which relieve the effect of heavy metals on the plant [23]. The objective of this study was to define whether the consortium of plant-associated bacteria is capable to alleviate γ -irradiation effect on kalanchoe plantlets.

MATERIALS AND METHODS

Bacteria and media. Bacterial strains and plasmids used in this study are listed in Table 1. Bacteria were grown in following nutrient media: *Paenibacillus* sp. in M9 [16] at 28 °C 24 hours, *E. coli* and *K. oxytoca* in LB [16] at 37 °C during 18 hours. Rifampicin (100 mg/ml) and ampicillin (50 mg/ml) were added to nutrient media when appropriate. For acute IR (⁶⁰Co) exposures to doses of 30, 50, 70 Gy, late logarithmic-phase cultures were used. Colony-forming units (CFU) were determined by plate assay, using culture dilutions and spreading on appropriate agar plates. Three independent irradiation treatments of the same kind were performed and served as biological replicates for determining irradiation resistance profiles.

DNA manipulations (the plasmid DNA isolation, DNA restriction with endonucleases and ligation, DNA fragment isolation from agarose gel) were performed according to the recommendations given by Sambrook et al. [19]. *Sma*I and *Pst*I purchased in Fermentas (Lithuania). Plasmid transformation was performed as recommended by Nishimura et al. [18]. A search for promoter sequences was carried out with the use of the program Neural Network Promoter Prediction (http://www.fruitfly.org/seq_tools/promoter.html).

Biochemical analyses. Beta-galactosidase activity was measured as recommended by J. Miller [16]. Inductors Glycerine, Glucose, Na-Polygalacturonate were added when appropriate at a concentration of 0.2 %. The plant extract was prepared as described in [12].

Table 1. Strains and Plasmids Used in the Study

Strain or Plasmid	Genotype or Phenotype	Origin
<i>Escherichia coli</i> JM109	<i>recA1</i> , <i>endA1</i> , <i>gyrA96</i> , <i>thi</i> , <i>hsdR17</i> , <i>supE44</i> , <i>relA1</i> λ^- , $\Delta(lac-proAB)$, F', <i>traD36</i> , <i>proAB</i> , <i>lacI^qZAM15</i>	Institute collection
<i>Klebsiella oxytoca</i> IMBG26 (VN13)	Rif ^r , Ap ^r , wild type	Institute collection
<i>Klebsiella oxytoca</i> IMBG27	PeIX ⁻ , Ap ^s	Institute collection
<i>Paenibacillus</i> sp. IMBG156	wild type	Institute collection
<i>pLC28P</i>	the 3-kb <i>EcoRV</i> - <i>SacI</i> fragment, carrying the <i>peIX</i> gene; Ap ^R	Institute collection
<i>pCB192</i>	promoterless <i>lacZ</i>	Institute of Microbiology, Bayreuth University, FRG
<i>pGalP</i>	<i>peIX::lacZ</i>	Institute collection

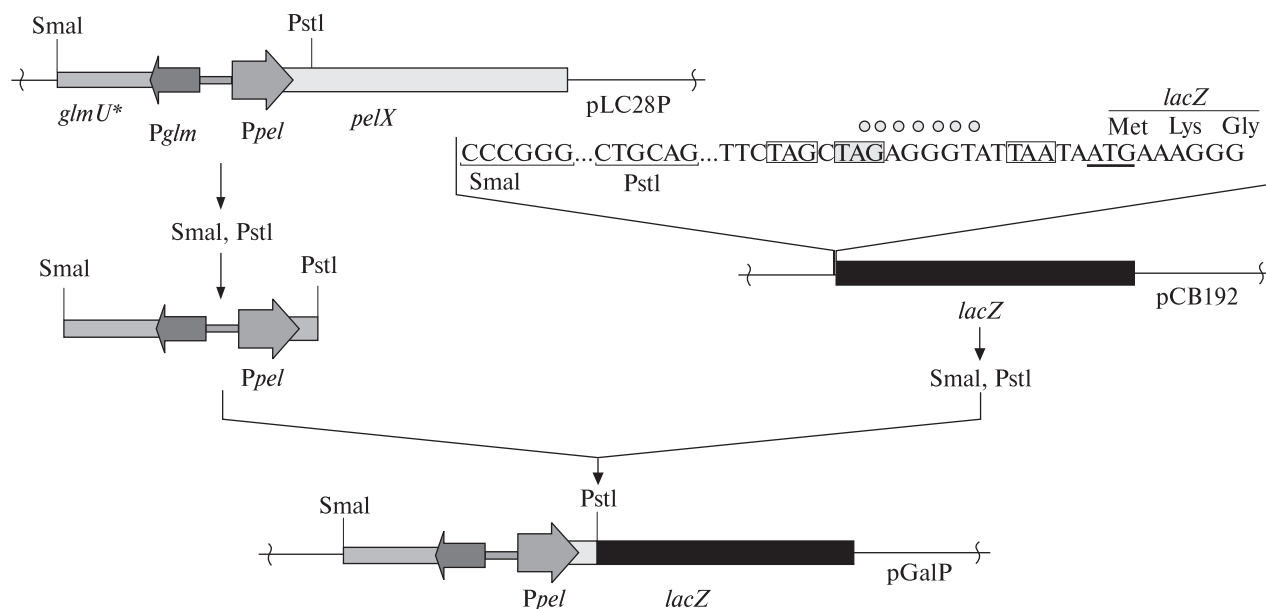


Fig. 1. The scheme of fusion of the *pelX* gene promoter with the *lacZ* gene coding part. Stop codons that terminate translation are marked with frames, the ribosome binding site are marked with circles. The beginning of the *lacZ* gene and the translated amino acid sequence is displayed. The fusion is used to measure the β -galactosidase activity in irradiated bacterial population

Plantlets inoculation was performed with the 1:100 diluted overnight cultures mixed in equal aliquots. One-size two-leaves plantlets were dropped into the mixed culture (10^6 CFU/ml) for 20 min a day before irradiation.

Plantlets irradiation was performed on MPX- γ -25M (Institute of Physics of NASU) with the use of doses of 30, 50, and 70 Gy. Plant inoculation was done with *K. oxytoca* IMBG26, and *Paenibacillus* sp. IMBG156 a day before irradiation. After irradiation the plantlets were put onto 2.0 % agar medium and photographed every day under standard conditions within 20 days. The root length was measured in pixels using the tpsDig v.2 program. The increase of both root length and number of roots under some dose n was determined by Index of Growth (IG): $IG_n = N_i/N_0$, where N_i is number of roots in a day i , N_0 denotes number of roots in the first day. IG of control untreated plants (IG_c) was taken as 100 %, and IG of experimental plants (IG_n) corresponded with control: $(IG_n/IG_c) \cdot 100 \% = K_n$.

The statistical analysis of the significance of differences between means was based on Student's t -test ($P < 0.05$).

RESULTS AND DISCUSSION

A translation fusion *pelX*::*lacZ* construction. We constructed the translation fusion of the *pelX* promoter with the coding part of the *lacZ* reporter gene to monitor the exopeptidase gene expression by biochemical analysis (Fig. 1). The *pelX* was identified, cloned, and sequenced earlier [11]. A promoter part was determined based on a full gene nucleotide sequence inserted in *pLC28P*, and the *SmaI-PstI* fragment was restricted and transferred into *pCB192*, carrying the promoterless *lacZ* gene. The resulted *pGalP* contained both three stop-codons that terminated translation within three reading frames and a ribosome-binding site, allowing the *lacZ* gene translation (see Fig. 1). So far mRNA was being transcribed from the *pelX* gene promoter and translated into β -galactosidase. Resulted *pGalP* was introduced in both *E. coli* JM109 and *K. oxytoca* IMBG27.

Comparative studies on expression of the *pelX*::*lacZ* fusion in *E. coli* and *K. oxytoca* using such inducers as a plant extract, sodium polygalacturonate, glycerine or glucose showed a low constitutive level of the *pelX* expression in *K. oxytoca*, as well incomplete derepression effected by these inducers.

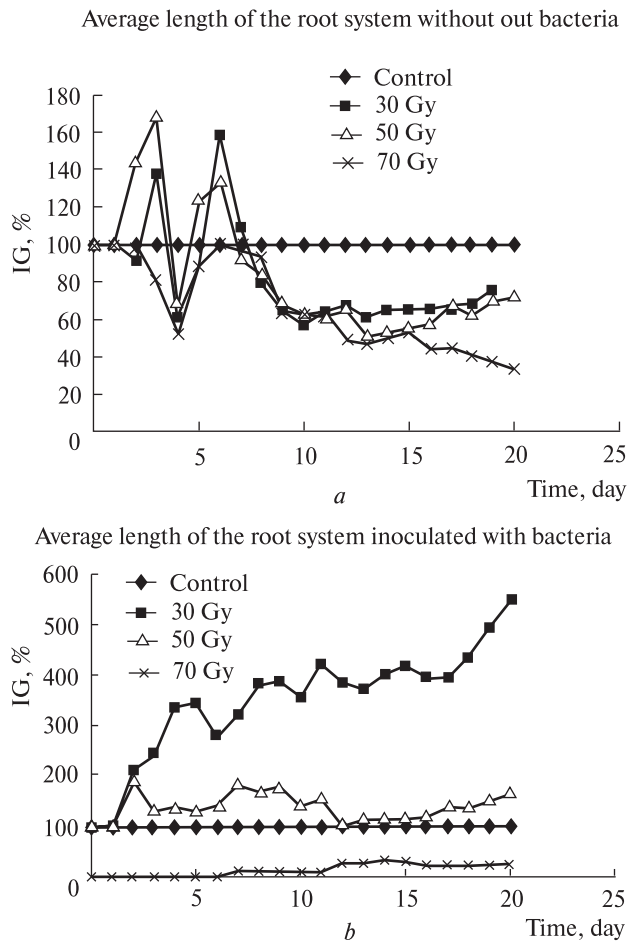


Fig. 2. The effect of acute doses of ionizing radiation (^{60}Co) on a state of primary root system of *Kalanchoe daigramontiana* without (a) and using plantlet inoculation with plant growth promoting bacteria (b) reflected with integrated tolerance index which comprises both the number and length of primary roots. IG (Index of Growth) reflects an increase of root numbers at the certain dose n : $IG_n = N_i/N_0$, where N_i is the root number at the estimated day, N_0 denotes the root number at the first day. For representation of all doses effect, IG_c of control plantlets is accepted as 100 %, other indexes corresponded as $(IG_n/IG_c) \cdot 100 \% = K_n$

β -Galactosidase activities of the *pelX::lacZ* fusion in *E. coli* JM109 and *K. oxytoca* IMBG27 are represented in Table 2.

Irradiation of model bacteria. Acute irradiation with γ -quanta showed that the sublethal dose for *K. oxytoca* IMBG26 was 2 kGy, and for *Paenibacillus* sp. IMBG156 it was 300 Gy. As compared to other bacteria, selected species were not highly resistant to

IR. After exposure to a sublethal dose the *K. oxytoca* (*pGalP*) *pelX* gene activity was 0.88 mkM/ml·min, e.a. 80 % of control (untreated) bacterial activity, although the irradiated bacterial population comprised only 1.25 % from control one (Table 3). These data may show an increased level of the *pelX* gene expression in irradiated bacteria as compared to untreated ones. The conclusion was done that a low-dose IR was not harmful for model bacteria.

Effect of bacterial inoculation on morpho-physiological parameters of irradiated plants. A state of root meristem as the most sensitive to external factors was taken into account for the evaluation of *Kalanchoe* plantlets radiotolerance in a period of embryogenesis. After a low-dose gamma irradiation both a number and length of roots were measured, as well as average length of a root system taken as a ratio of average root length to average root number. As seen from Fig. 2a, a reaction of plantlets on irradiation without bacterial inoculation was not unimodal. In the next day after acute irradiation the plantlet roots showed an increased growth as compared to untreated plants, however, a sharp intensity of metabolic processes resulted in growth inhibition. At the end of the first week a small activation of metabolic processes was

Table 2. β -Galactosidase Activity of the *pelX::lacZ* Fusion in *Escherichia Coli* JM109 and *Klebsiella Oxytoca* IMBG27

Inductors, 0.2%	β -galactosidase activity, mkM/(ml·min)	
	<i>E. coli</i> (<i>pGalP</i>)	<i>K. oxytoca</i> (<i>pGalP</i>)*
Glycerine	27.55	3.21
Glucose	16.69	2.07
Na-Polygalacturonate	18.7	6.95
Plant extract	28.5	3.31

* The result was obtained when bacteria grew on antibiotic-containing medium as the indication for bacteria conferring plasmid.

Table 3. β -Galactosidase Activity of Irradiated *Klebsiella oxytoca* (*pGalP*)

Strain	The <i>pelX</i> promoter activity, mkM/(ml·min)	Average CFU/ml
<i>K. oxytoca</i> (<i>pGalP</i>) (control)	1.08	$4 \cdot 10^9$
<i>K. oxytoca</i> (<i>pGalP</i>) (irradiated; 2 kGy)	0.88	$5 \cdot 10^7$

seen again, however, it was below the control level, except a variant exposed to a 30 Gy dose. Integrated index of growth (IG), displaying dependence of average root length on doses of acute ionizing radiation, includes both parameters mentioned above, and seems to be more systemic in evaluation of IR effect on the plantlet. In this experiment, the integrated index reflected a fluctuation of metabolic processes in noninoculated plantlets which resulted in a stabilizing stress-reactions within 10 days after the irradiation; IG remained at the level from 30 to 60 % as compared with the control plantlets (see Fig. 2a).

In experiments on inoculations, *Paenibacillus* sp. IMBG156 and *K. oxytoca* IMBG26 were used for kalanchoe plantlets treatment. The effect of irradiation on kalanchoe plantlets was relieved by bacteria, however, this varied in dependence on an implemented dose (Fig. 2b). Integrated index showed inhibition of inoculated plantlets development after getting a 70 Gy dose. This IR dose appeared injured root cap meristem and inhibited root elongation. However, lower doses, both a 30 and 50 Gy doses, accepted by plantlets more easier after bacterial inoculation than by the control plantlets. Moreover, IG was observed at levels of 500 and 200 %, respectively. Intense root elongation instead of roots bearding led to fast plant adaptation to stressful conditions and normalization of metabolic processes in the irradiated plantlets. M. Melki and B. Sallami [15] tried to explain the stimulation of the root system after low-dose IR with the availability of more soil volumes to the plants to explore and therefore to support better water shortages by keeping more hydrated tissues and less damaged cell membranes at least during their first development stages. By all means, the volume of a root system plays a major role in plant survival under adverse conditions, and plant growth promoting bacteria activated this instrument of plant protection.

In this study the bacterial consortium alleviated the negative effect of gamma-irradiation on the plantlet root system development at doses of 30 and 50 Gy. Survival in the plant world depends on the ability to resist not only diseases, but also changes in the physical surroundings. There are several common elements responded on abiotic stressors in terrestrial plants, and repression of growth-related genes is one of them [7]. Model plant growth promoting bacteria increased the

root length in irradiated kalanchoe and probably prevented repression of the genes related to plant growth. We may also speculate that acquisition of tolerance to 30 and 50 Gy doses in kalanchoe plantlets may be explained with induction of systemic tolerance to abiotic stressors by bacteria, however, this should be investigated in further studies. It is known that the rhizosphere microbes can protect plants against such environmental stressors, like heavy metal toxicity, salt, and drought via induction of systemic tolerance [22]. Reactive oxygen species (ROs) are produced intracellularly in response to various stressors due to malfunctioning of cellular components, and have been implicated in many different signaling cascades in plants [17]. Protection against ROS is at the basis of every stress response, and bacteria may alleviate oxidative stress. Earlier we showed that stimulation of plant antioxidant system and phenolics production under assistance of plant-associated bacteria resulted in heavy metals tolerance in soybeans [23].

REFERENCES

1. Arkhipov N. P., Kuchma N. D., Askbrant S., et al. Acute and long-term effects of irradiation on pine (*Pinus sylvestris*) stands post-Chernobyl // Sci. Tot. Environ. — 1994. — 157. — P. 383—386.
2. Daly M. J. Engineering radiation-resistant bacteria for environmental biotechnology // Curr. Opin. Biotechnol. — 2000. — 11. — P 280—285.
3. Daly M. J., Gaidamakova E. K., Matrosova V. Y., et al. Accumulation of Mn(II) in *Deinococcus radiodurans* facilitates gamma-radiation resistance // Science. — 2004. — 306. — P. 1025—1028.
4. Daly M. J., Gaidamakova E. K., Matrosova V. Y., et al. Protein oxidation implicated as the primary determinant of bacterial radioresistance // PLoS Biol. — 2007. — 5. — P. 769—779.
5. Danchenko M., Skultety L., Rashydov N. M., et al. Proteomic analysis of mature soybean seeds from the Chernobyl area suggests plant adaptation to the contaminated environment // J. Proteome Res. — 2009. — 8, N 6. — P. 2915—2922.
6. de Groot A., Dulermo R., Ortet P., et al. Alliance of proteomics and genomics to unravel the specificities of Sahara bacterium *Deinococcus deserti* // PLoS Genet. — 2009. — 5, N 3. — e1000434.
7. Dittami S., Scornet D., Petit J.-L., et al. Global expression analysis of the brown alga *Ectocarpus siliculosus* (Phaeophyceae) reveals large-scale reprogramming of the transcriptome in response to biotic stress // Genome Biology. — 2009. — 10. — R66.

8. Kovalchuk I., Abramov V., Pogribny I., et al. Molecular aspects of plant adaptation to life in the Chernobyl zone // Plant Physiol. — 2004. — **135**. — P. 357—363.
9. Kovalchuk O., Burke P., Arkhipov A., et al. Genome hypermethylation in *Pinus silvestris* of Chernobyl — a mechanism for radiation adaptation // Mutat. Res. — 2003. — **529**. — P. 13—20.
10. Kozyrovska N., Negrutskaya V., Kovalchuk M., et al. *Paenibacillus* sp., a promising candidate for development of a novel technology of plant inoculant production // Biopolymers and Cell. — 2005. — **21**, N 4. — P. 312—319.
11. Lar O. V., Kovtunovych G. L., Kozyrovska N. O. Cloning and analysis of the gene encoding pectate lyase, the *Klebsiella oxytoca* VN13 *pelX* // Biopolymers and Cell. — 2002. — **18**, N 5. — P. 417—422.
12. Lar O. V., Kovtunovych G. L., Kozyrovska N. O. A study of *Klebsiella oxytoca* exopeptidase lyase the *pelX* gene // Biopolymers and Cell. — 2005. — **21**, N 3. — P. 264—270.
13. Le-Tien C., Lafortune R., Shareck F., et al. DNA analysis of a radiotolerant bacterium *Pantoea agglomerans* by FT-IR spectroscopy // Talanta. — 2007. — **71**, N 5. — P. 1969—1975.
14. Makarova K. S., Omelchenko M. V., Gaidamakova E. K., et al. *Deinococcus geothermalis*: The pool of extreme radiation resistance genes shrinks // PLoS ONE. — 2007. — **2**, N 9. — P. 955.
15. Melki M., Sallami D. Studies the effects of low dose of gamma rays on the behaviour of chickpea under various conditions in Pakistan // J. Biol. Sci. — 2008. — **11**, N 19. — P. 2326—2330.
16. Miller J. H. Experiments in Molecular Genetics. — New York, Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1972. — 432 p.
17. Mittler R., Vanderauwera S., Gollery M., et al. Reactive oxygen gene network of plants // Trends Plant Sci. — 2004. — **9**. — P. 490—498.
18. Nishimura A., Morita M., Sugino Y. A. Rapid and highly efficient method for preparation of competent *Escherichia coli* cells // Nucl. Acid Res. — 1990. — **18**. — P. 6169.
19. Sambrook J., Fritsch E. F., Maniatis T. Molecular Cloning: a laboratory manual. — Cold Spring Harbor Laboratory Press, Cold Spring Harbor, N. Y., 1989.
20. Sorochinskiy B., Kozyrovska N. Biotechnological aspects of problem associated with phytoremediation of the environment from radionuclide pollution // Agrobiotechnology. — 1998. — **2**. — P. 123—130.
21. Sorochinskiy B., Prokhnevskiy O., Ruchko M. Some mechanisms of somatic effects of irradiation indicated in plants from the 10 km zone of Chernobyl APS // Cytologia i Genetika. — 1996. — **30**, N 4. — P. 15—19.
22. Yang J., Klopper J. W., Rye C. M. Rhizosphere bacteria help plants tolerate abiotic stress // Trends Plant Sci. — 2009. — **14**. — P. 1—4.
23. Zaetz I. E., Kozyrovska N. O. Effect of a bacterial consortium on oxidative stress in soybean plants in cadmium-contaminated soil // Biopolymers and Cell. — 2008. — **24**. — P. 246—253.
24. Zaka R., Vandecasteele C. M., Misset M. T. Effects of low chronic doses of ionizing radiation on antioxidant enzymes and G₆PDH activities in *Stipa capillata* (Poaceae) // J. Exp. Bot. — 2002. — **53**, N 376. — P. 1979—1987.

Received October 1, 2009

О. П. Бурлак, О. В. Лар, І. С. Рогутський,
О. М. Міхеев, І. Є. Засць, Ж.-П. де Вера,
Б. О. Данільченко, Б. Н. Фойнг, Н. О. Козирівська

БАКТЕРІЙНИЙ КОНСОРЦІУМ ПОСЛАБЛЮЄ ДІЮ ГАММА-РАДІАЦІЇ НИЗЬКОЇ ДОЗИ В ЛИСТКОВИХ БРУНЬКАХ КАЛАНХОЕ

Здатність рослин захищати себе від іонізуючого опромінення є обмеженою. Одним із засобів полегшити наслідки опромінення рослин є використання для їхньої інюкуляції бактерій, асоційованих з рослинами. Для інюкуляції листкових бруньок *Kalanchoe daigremontiana* були використані два види бактерій, якими обробляли рослини перед опроміненням γ -квантами ^{60}Co . Летальними дозами γ -опромінення для *Klebsiella oxytoca* IMBG26 були 3 кГр, а для *Paenibacillus* sp. IMBG156 — 500 Гр. Бактерії показали підвищення фізіологічної активності після сублетальної дози радіації. Активність *pelX* промотора, що вимірювалась як активність β -галактозидази гена *pelX::lacZ*, перенесеного в *K. oxytoca* (pGalP), була 0.88 мкм/(мл·хв) після опромінення дозою 2 кГр, що складає 80 % від контролю (неопромінена культура), хоча опромінена бактеріальна популяція становила лише 1.25 % від контрольної. Комплексний показник розвитку рослин, який визначали за числом і довжиною коренів, відображав коливання обмінних процесів в опроміненій рослині без обробки бактеріями. Стабілізація стрес-реакції відбувалася через 10 діб після опромінення при різних дозах (30, 50, 70 Гр), однак збільшення індексу росту (ІР) залишалось на рівні 30--60 % до контролю. Вплив опромінення на каланхоє послаблювався бактеріями при дозах 30 і 50 Гр. Крім того, ІР спостерігався на рівні 500 і 200 % відповідно, а доза 30 Гр, очевидно, була стимулюючою для розвитку *K. daigremontiana*. Інтенсивне подовження кореня, замість розвитку нових мочкуватих корінців, призвело до швидкої адаптації до стресових умов і нормалізації обмінних процесів у каланхоє. Разом з тим комплексний показник показав гальмування розвитку листкових бруньок каланхоє після отримання дози 70 Гр.

АРХАНГЕЛЬСЬКИЙ Андрій Ігорович — науковий співробітник Інституту астрофізики Національного дослідного ядерного університету «МІФІ».

Напрямок науки — розробка астрофізичної апаратури та дослідження проявів сонячної активності.

БЕЗСОНОВ Михайло Володимирович — інженер Інституту астрофізики Національного дослідного ядерного університету «МІФІ», кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — розробка астрофізичної апаратури та дослідження проявів сонячної активності.

БЕЛЯЄВ Борис Іларіонович — завідувач відділу науково-дослідної установи «Інститут прикладних фізичних проблем ім. А. Н. Севченка» Білоруського державного університету (Мінськ), доктор фізико-математичних наук, професор. Лауреат Державної премії СРСР.

Напрямок науки — космічне приладобудування.

БЕЛЯЄВ Юрій Володимирович — старший науковий співробітник лабораторії дистанційної фотометрії науково-дослідної установи «Інститут прикладних фізичних проблем ім. А. Н. Севченка» Білоруського державного університету (Мінськ), кандидат технічних наук.

Напрямок науки — космічне приладобудування.

БУРЛАК Олексій Петрович — аспірант Інституту молекулярної біології і генетики Національної академії наук України.

Напрямок науки — генетика мікроорганізмів.

БУСЛОВ Антон Сергійович — інженер Інституту астрофізики Національного дослідного ядерного університету «МІФІ», кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — розробка астрофізичної апаратури та дослідження проявів сонячної активності.

ВЛАСИК Костянтин Федорович — провідний інженер Інституту астрофізики Національного дослідного ядерного університету «МІФІ», кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — розробка астрофізичної апаратури та дослідження проявів сонячної активності.

ВОЛОВИК Дмитро Володимирович — провідний інженер лабораторії атмосферної оптики Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрямок науки — розробка електронної і мікропроцесорної апаратури, програмування.

ГАМУЛЯ Гарій Дмитрович — провідний інженер Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України.

Напрямок науки — триботехнічні дослідження матеріалів.

ГЛЯНЕНКО Олександр Степанович — завідувач науково-дослідного сектору КОРОНАС Інституту астрофізики Національного дослідного ядерного університету «МІФІ», кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — розробка астрофізичної апаратури та дослідження проявів сонячної активності.

ГОЛУБНИЧИЙ Петро Іванович — завідувач кафедри фізики Східноукраїнського національного університету, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрямок науки — фізика високих густин енергії та елементарних частинок.

ДАНИЛЬЧЕНКО Борис Олександрович — завідувач відділу Інституту фізики Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрямок науки — фізика твердого тіла.

ДЕ ВЕРА Жан-Поль — науковий співробітник Інституту планетарних досліджень Берлінської філії Німецького космічного агентства, ФРН.

ДОМАРАЦЬКИЙ Олександр Володимирович — провідний інженер-конструктор науково-дослідної установи «Інститут прикладних фізичних проблем ім. А. Н. Севченка» Білоруського державного університету (Мінськ).

Напрямок науки — космічне приладобудування.

ЗАСЦЬ Ірина Євгенівна — науковий співробітник Інституту молекулярної біології і генетики Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрямок науки — біохімія.

ІВЧЕНКО Василь Миколайович — завідувач кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрямок науки — астрофізика, фізика сонячно-земних зв'язків, навколосонячний космічний простір.

КАДИЛІН Володимир Валерійович — старший науковий співробітник Інституту астрофізики Національного дослідного ядерного університету «МІФІ», кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — розробка астрофізичної апаратури та дослідження проявів сонячної активності.

КАТКОВСЬКИЙ Леонід Володимирович — головний науковий співробітник науково-дослідної установи «Інститут прикладних фізичних проблем ім. А. Н. Севченка» Білоруського державного університету (Мінськ), доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрямок науки — космічне приладобудування.

КОЗАК Людмила Володимирівна — доцент кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика навколосемного космічного простору.

КОЗИРОВСЬКА Наталя Олексіївна — завідувач лабораторії Інституту молекулярної біології і генетики Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрямок науки — генетика мікроорганізмів.

КОЛОТИЛО А. Д. — науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України.

Напрямок науки — матеріалознавство, нанесення газотермічних покриттів, триботехнічні дослідження.

КОТОВ Юрій Дмитрович — директор Інституту астрофізики Національного дослідного ядерного університету «МІФІ», науковий керівник проекту КОРОНАС-ФОТОН, кандидат фізико-математичних наук, доцент. Лауреат премії Уряду Російської Федерації в галузі науки і техніки 2009 р.

Напрямок науки — розробка астрофізичної апаратури та дослідження проявів сонячної активності.

КРОТ Юрій Олександрович — молодший науковий співробітник науково-дослідної установи «Інститут прикладних фізичних проблем ім. А. Н. Севченка» Білоруського державного університету (Мінськ).

Напрямок науки — космічне приладобудування.

КУЗЬКОВ Володимир Павлович — старший науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — прилади і дослідження в ІЧ-діапазоні, системи лазерного зв'язку, вплив атмосфери на розповсюдження лазерного випромінювання.

КУЗЬКОВ Сергій Володимирович — інженер лабораторії атмосферної оптики Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрямок науки — моделювання систем наведення і супроводження космічних об'єктів; наземно-космічні системи лазерного зв'язку, волоконно-оптичні та відкриті оптичні системи зв'язку, прикладна електроніка.

ЛАР Олена Василівна — науковий співробітник Інституту молекулярної біології і генетики Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрямок науки — біохімія.

ЛУПАР Євген Едуардович — інженер Інституту астрофізики Національного дослідного ядерного університету «МІФІ».

Напрямок науки — розробка астрофізичної апаратури та дослідження проявів сонячної активності.

МАШКОВСЬКА Світлана Петрівна — старший науковий співробітник Ботанічного саду Національної академії наук України, кандидат біологічних наук.

Напрямок науки — ботаніка.

МИТРОХІН Олександр Володимирович — доцент Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат біологічних наук.

Напрямок науки — геологія.

МІХЄЄВ Олександр Миколайович — завідувач лабораторії Інституту клітинної біології і генетичної інженерії Національної академії наук України, доктор біологічних наук.

Напрямок науки — клітинна біологія і генетична інженерія.

ПУХА Сергій Петрович — завідувач лабораторії СКБ «Шторм» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Напрямок науки — розробка електронної апаратури системи наведення та супроводження.

РОГОВЕЦЬ Анна Володимирівна — молодший науковий співробітник науково-дослідної установи «Інститут прикладних фізичних проблем ім. А. Н. Севченка» Білоруського державного університету (Мінськ).

Напрямок науки — космічне приладобудування.

РОГУЦЬКИЙ Іван Станіславович — науковий співробітник Інституту фізики Національної академії наук України.

Напрямок науки — фізика твердого тіла.

РУБЦОВ Ігор Васильович — провідний інженер Інституту астрофізики Національного дослідного ядерного університету «МІФІ».

Напрямок науки — розробка астрофізичної апаратури.

СОДНІК Зоран — провідний спеціаліст Європейського центру науково-технологічних досліджень (ESTEC) Європейського космічного агентства (ESA).

Напрямок науки — наземно-космічні системи лазерного зв'язку.

СОСЕНКО Віктор Андрійович — завідувач лабораторії науково-дослідної установи «Інститут прикладних фізичних проблем ім. А. Н. Севченка» Білоруського державного університету (Мінськ), кандидат технічних наук.

Напрямок науки — космічне приладобудування.

СУМАРУК Петро Васильович — провідний науковий співробітник Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — геомагнетизм.

СУМАРУК Тарас Петрович — науковий співробітник Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — геомагнетизм.

ТИШКЕВИЧ Володимир Георгійович — старший науковий співробітник Інституту астрофізики Національного дослідного ядерного університету «МІФІ».

Напрямок науки — розробка астрофізичної апаратури.

ФІЛОНЕНКО Анатолій Дмитрович — професор кафедри фізики Східноукраїнського національного університету, доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика високих густин енергії та елементарних частинок.

ФІНГ Бернард Г. — провідний науковий співробітник науково-технологічного центру Європейського космічного агентства, Нідерланди, доктор філософії.

Напрямок науки — космічна техніка.

ХВАЛІСЬ Сергій Володимирович — науковий співробітник науково-дослідної установи «Інститут прикладних фізичних проблем ім. А. Н. Севченка» Білоруського державного університету (Мінськ), кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — космічне приладобудування.

ХОМИЦЕВИЧ Андрій Даріянович — молодший науковий співробітник науково-дослідної установи «Інститут прикладних фізичних проблем ім. А. Н. Севченка» Білоруського державного університету (Мінськ).

Напрямок науки — космічне приладобудування.

ШУЄНКО Олександр Васильович — студент кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрямок науки — астрофізика.

ФРОЛОВ Геннадій Олександрович — завідувач відділу Інституту проблем матеріалознавства Національної академії наук України, доктор технічних наук.

Напрямок науки — високотемпературна теплофізика, дослідження матеріалів для ракетно-космічної техніки, геліотехніка.

ЮРОВ Віталій Миколайович — заступник директора Інституту астрофізики Московського державного інженерно-фізичного інституту, головний конструктор комплексу наукової апаратури ФОТОН, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — розробка астрофізичної апаратури та дослідження проявів сонячної активності.

МІЖНАРОДНІ АВІАКОСМІЧНІ ОРГАНІЗАЦІЇ

29—30 вересня в Києві пройшов Українсько-канадський космічний та авіаційний бізнес-саміт, організований Національним космічним агентством України, Посольством Канади в Україні та Українським науково-технологічним центром з метою налагодження взаємовигідних контактів між українськими і канадськими підприємствами, науково-дослідними установами, що працюють в космічній та авіаційній сферах. Саміт відкрили: Даніел Карон — посол Канади в Україні та Олександр Зінченко — генеральний директор Національного космічного агентства України.

В роботі саміту взяли участь представники десяти авіакосмічних компаній Канади, серед яких: MacDonald, Dettwiler and Associates (MDA), Bombardier, NovAtel, Export Development Canada (EDC), Aerospace Industries Association of Canada, National Research Council. Україна була представлена 46 підприємствами та інститутами авіаційної та космічної галузей.

Нижче наведено відомості про деякі авіакосмічні компанії Канади.

Aerospace Industries Association of Canada (AIAC)

Канадська асоціація аерокосмічної промисловості (AIAC) є національною торговельною асоціацією, неприбутковою організацією, що керується потребами своїх членів та підтримує рівень канадської конкурентоспроможності в глобальній аерокосмічній галузі. AIAC представляє інтереси понад 400 компаній по всій країні. Завдання AIAC полягає в розумінні, забезпеченні консенсусу та координації політики аерокосмічної галузі з актуальних для неї питань. AIAC працює також для покращення іміджу Канади на світовій арені шляхом повідомлення про досягнення галузі та надання інформаційної підтримки аерокосмічним компаніям Канади на міжнародних ринках.

Bombardier Aerospace

Bombardier Aerospace є світовим лідером у впровадженні інноваційних транспортних рішень: від виробництва літаків регіонального призначення та реактивних літаків бізнес призначення до обладнання, систем і пос-

луг для залізничних перевезень. Це світовий лідер в конструюванні та виробництві інноваційної авіаційної продукції та наданні послуг у цій сфері для ринків літаків бізнес і регіонального призначення та літаків-амфібій. Ця інноваційна спадщина об'єднує понад 60 років історії авіації і включає розробку 23 успішних нових моделей літаків з 1989 року. У Bombardier Aerospace зайнято приблизно 26 500 працівників в цілому світі. Центральний офіс Корпорації знаходиться в Канаді.

Canadian Space Agency (CSA)

Космічне агентство Канади було засновано у 1989 р. для координації всіх цивільних програм та норм, пов'язаних з космічною галуззю для уряду Канади. Бюджет CSA складає 350 млн канадських доларів на рік. В Агенції працюють 650 співробітників, а головний офіс розташований поблизу міста Монреаль в Квебеку. CSA спрямовує свої ресурси та діяльність на окремі сектори ринку, які слугують національним інтересам: спостереження за Землею, космічні науки та дослідження космосу, супутниковий зв'язок та освіта. З початку опанування Канадою космосу космічна програма Канади спиралася на співробітництво з іншими країнами, що досліджують космос. Канада є другою за розміром країною в світі, тому їй необхідний космос для забезпечення зв'язку, спостереження та моніторингу (цей список далеко не повний).

Export Development of Canada

Корпорація розвитку експорту є офіційною кредитно-експортною агенцією Канади, котра пропонує широкий спектр інноваційних комерційних рішень для допомоги канадським експортерам та інвесторам, а також їхнім міжнародним клієнтам в розширенні міжнародного бізнесу. Щороку 6400 канадських компаній та їх міжнародні клієнти використовують знання та партнерські зв'язки Корпорації на близько 200 ринках світу. Для задоволення потреб канадських компаній та їх іноземних клієнтів Корпорація розвитку експорту використовує гнучкий підхід у структуризації угод. Корпорація сприяє проведенню транзакцій будь-якого розміру та може надавати кредити державним та комерційним установам.

До складу фінансових послуг Корпорації входять пряме кредитування покупців, кредитні лінії, купівля нот, синдикування кредитів та лізинг.

Global Partnership Program / Foreign Affairs and International Trade Canada

Програма Глобального Партнерства (ПГП) є частиною Міністерства зовнішніх справ та міжнародної торгівлі Канади і відповідає за управління внеском Канади розміром у 1 млрд канадських доларів до Глобального партнерства Великої вісімки проти поширення ядерної зброї і матеріалів для її виготовлення (глобальне партнерство), яке було розпочато лідерами держав в 2002 р. на саміті в місті Канананскіс. З метою зниження загроз глобальній безпеці, які становлять розповсюдження зброї масового знищення та матеріалів для її виготовлення та потенційне використання цієї зброї терористами лідери Великої вісімки створили ініціативу глобального партнерства, розраховану на 10 років з бюджетом 20 млрд доларів США. Програма Партнерства працює в п'яти ключових сферах: знищення хімічної зброї, демонтаж ядерних субмарин, ядерна та радіологічна безпека, перекваліфікація науковців, які в минулому розробляли зброю, та біологічна безпека.

Враховуючи існуючий ризик найму колишніх фахівців з розробки зброї терористичними організаціями чи країнами, що представляють проблему з точки зору розповсюдження зброї масового знищення, Канада вжила ряд заходів для забезпечення перекваліфікації таких спеціалістів, надання їм постійної зайнятості на мирних наукових проєктах. В підтримку міжнародного центру науки та технології та Науково-технологічного центру України Канада продовжує фінансувати програми з розбудови потужностей для допомоги колишнім науковцям з розробки зброї стати фінансово незалежними. До діяльності в цій сфері входять семінари, майстер-класи та конференції, програми підтримки комерціалізації та фінансування участі у заходах, що допомагають краще зрозуміти потреби міжнародного ринку науки та технологій та для полегшення сумісних наукових проєктів. ПГП також регулярно проводить заходи для інформування канадців щодо можливостей цих двох центрів та для поширення розуміння переваг від використання науки та технологій в Канаді. На сьогодні Канада профінансувала близько 200 проєктів та провела перекваліфікацію понад 3000 колишніх науковців з розробки зброї. В рамках сумісних дослідницьких проєктів до програми підключалися промисловість, університети та уряд Канади.

L-3 WESCAM

L-3 WESCAM's MX-Series — єдина в галузі родина модулних баштових EO/ІЧ/лазерних систем спостереження та наведення. До серії входять моделі MX-15, MX-15i, MX-15HD, MX-20 та MX-20HD, які отримують стабільні

сильно збільшені зображення з пересувних платформ та передають відео та дані в режимі реального часу до стаціонарних та мобільних центрів прийому для їх негайного аналізу. Серія MX пропонує: 1080p True HD з роздільною здатністю зображення 1920x1080, масою змонтованої установки на 20 кг меншою за звичайну, EO зображення у режимі 24/7, високонадійну стабілізацію, покращену дальність та рівень бачення в погіршених умовах, можливість керування, націлювання та відслідковування цілей. WESCAM забезпечує надання клієнтам найякісніших послуг та обслуговування. Цілодобова технічна підтримка, локальні центри обслуговування WESCAM та команда висококваліфікованих місцевих представників з обслуговування працюють разом для забезпечення інформації та підтримки клієнтів в обслуговуванні придбаних систем та успішному виконанні завдань.

MDA Corporation (MacDonald, Dettwiller and Assotiates Ltd)

MDA (MacDonald, Dettwiller and Assotiates) — це успішна компанія, акції якої котуються на біржі. Представництва компанії є в Канаді, США та Великобританії, щорічний прибуток компанії становить понад 1 млрд доларів США, а кількість співробітників у філіях у Канаді, США та Великобританії перевищує 3000 осіб. MDA є світовим лідером у системах космічної робототехніки. Компанія розробила дистанційний маніпулятор для шатлу NASA та систему робототехніки для міжнародної космічної станції, а саме — мобільну обслуговуючу систему (MSS) та гнучкий маніпулятор спеціального призначення (SPDM) для Канадської космічної агенції. MDA також є основним світовим постачальником наземних елементів дистанційного зондування та постачає системи для великого спектру супутників з оптичною бортовою апаратурою та супутників з бортовими РЛС, включаючи ERS, RADARSAT, NextView (головна комерційна програма дистанційного зондування США), WorldView та Landsat а також багатьох інших. MDA має великий досвід в конструюванні, розробці та інтеграції супутникових систем до ряду провідних світових програм. До значних місій входять Anik-C — перший в світі супутник прямої трансляції; MSAT — перший в світі супутник мобільного зв'язку; RADARSAT-1 — перший в світі супутник дистанційного зондування комерційного призначення; RADARSAT-2 — найновітніший супутник космічної пошукової РЛС комерційного призначення; RapidEye — недорогий комерційний багатоспектровий проєкт зондування, розроблений для німецької компанії RapidEye AG; CASSIOPE — багатфункціональний науковий та комерційний проєкт; та RADARSAT Constellation Mission (RCM) — канадське угруповання нового покоління трьох супутників дистанційного зондування, контракт щодо створення якого було нещодавно надано компанії MDA.

MDS Aero Support Corporation

MDS Aero Support Corporation є інженерною організацією, основне завдання якої полягає в наданні приміщень та систем для проведення випробувань авіаційних, промислових та морських газотурбінних двигунів. MDS пройшла сертифікацію згідно норм ISO 9001 та 14001 і вже 23 роки надає приміщення для випробувань «під ключ», обладнання для проведення випробувань, системи отримання даних та інженерні послуги різноманітним підприємствам та організаціям в усьому світі. Основний штат у 200 осіб, 75 % з яких становлять досвідчені у різних областях інженерної справи інженери та технологи, надає MDS можливість надавати клієнтам єдине джерело для всіх їхніх інженерних та проектних потреб. Відданість MDS якості та задоволенню споживача разом з набутим досвідом в класичних інженерних технологіях та новітніх інженерних засобах забезпечує клієнтам корпорації отримання надійних, новітніх та рентабельних рішень. Виходячи з рівня активності в даному регіоні, MDS нещодавно додала Росію до списку своїх міжнародних представництв. Філія MDS у Росії підтримуватиме наявних споживачів у регіоні та надаватиме допомогу розвитку поточного бізнесу в Україні.

National Research Council of Canada / Institute for Aerospace Research

Інститут аерокосмічних досліджень (IAR) є частиною Національної наукової ради Канади (NRC) і є канадською національною аерокосмічною лабораторією. В цій ролі NRC-IAR проводить наукові і технологічні дослідження в широкому діапазоні питань, пов'язаних з конструюванням, виробництвом, експлуатацією, використанням і безпекою повітряних і космічних апаратів. Деякі аспекти роботи NRC-IAR також стосуються виробничого і автомеханічного секторів. NRC-IAR розташований в Оттаві, проте одна лабораторія знаходиться в Монреалі. NRC-IAR є лідером у впровадженні інноваційних ідей в аерокосмічній галузі через цілеспрямовані дослідницькі

та розвиткові програми, партнерства і співпрацю з промисловістю, урядом та університетськими партнерами і клієнтами. NRC-IAR також займається консалтингом, випробуваннями і стандартизацією для сотень компаній та організацій в цілому світі. NRC-IAR активно розширює клієнтів, співавторів, власників патенту для надання послуг, розвитку технологій та знань.

NovAtel Inc.

NovAtel Inc. — лідер в наданні компонентів та підсистем для точних Глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS). Головна мета компанії — досягнення надзвичайно високого рівня прибутку на інвестований капітал та надання винятково високоякісних послуг своїм клієнтам. NovAtel сертифіковано за стандартом ISO 9001. Компанія розробляє високоякісне OEM-обладнання, до якого входять ресивери, компоненти, антени та програми ПЗП, інтегровані до високоточних програм позиціонування в різних країнах світу. До цих програм входять збір інформації, картографія географічних інформаційних систем (ГІС), керівництво високоточними сільськогосподарськими пристроями, автоматизація портів, гірнична справа, морська галузь. Вихідні ресивери компанії NovAtel складають ядро наземної мережі національної авіації США, Японії, Європи, Китаю та Індії. Лінійку продукції компанії NovAtel розроблено таким чином, щоб задовольнити різні рівні вимог до точності та вартості. Використовуючи найефективніші передові технології компанія NovAtel розробляє ресивери з позиціонування, які легко інтегрувати, що не потребують великих витрат енергії та обладнанні оптимальними наборами блоків інформації для конфігурації та внесення даних. NovAtel постійно в пошуку інновацій в радіочастотах та цифровому дизайні, а також в обробці сигналів та програм в ПЗП і таким чином постійно вдосконалює свої технології та асортимент продукції, зміцнюючи позиції новатора та лідера технологій в точному позиціонуванні.