

50 РОКІВ ЕКСПЕРИМЕНТУ «АРАКС». ЗОНДУВАННЯ ІОНОСФЕРИ ТА МАГНІТОСФЕРИ ЗЕМЛІ ПОТУЖНИМ ЕЛЕКТРОННИМ ПУЧКОМ

Початок активного освоєння навколосезонного простору у сімдесяті роки минулого століття ознаменувався успішною реалізацією низки міжнародних дослідницьких проєктів, які стали можливими у період короткострокової розрядки міжнародної напруженості. Завдяки домовленостям між СРСР і США активізувалося науково-технічне співробітництво між країнами двох протилежних таборів, зокрема у сфері космічних досліджень. Підписання договорів щодо обмеження систем протиракетної оборони та стратегічних озброєнь створило можливість для проведення спільних експериментів у сфері мирного освоєння космосу, серед яких найбільш показовими можна вважати історичну радянсько-американську місію «Союз-Аполлон», в ході якої виконано стикування та спільний пілотований політ космічних кораблів обох наддержав, а також радянсько-французький (за участі США) експеримент «АРАКС», присвячений вивченню фізичних процесів у іоносфері Землі, зокрема тих, що супроводжуються полярними сяйвами [1–4].

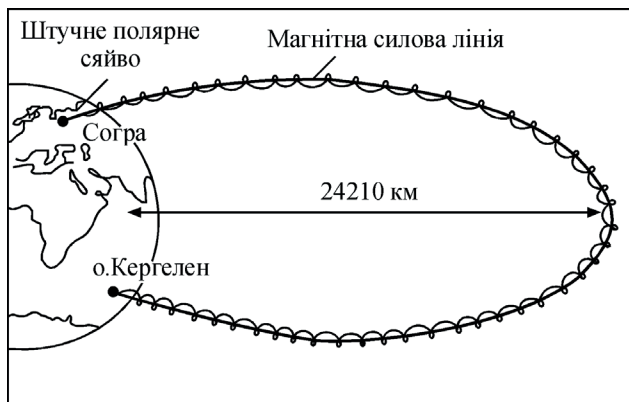
Задум експерименту «АРАКС» (Artificial Radiation and Aurora at Kergelen and Sogra) окрім наукових цілей, які полягали у дослідженні взаємодії високоенергетичних частинок із земним магнітним полем та атмосферою, перевірки теоретичних моделей та гіпотез фізики плазми, мав на меті також суто практичні завдання. Це, зокрема, відпрацювання конструкції потужних джерел енергії, систем управління, автоматики та збору даних в умовах екстремальних впливів космічного середовища, натурні дослідження процесів надзвукового обтікання космічного апарату розрідженою плазмою іоносфери Землі та електризації елементів корпусу до високих потенціалів, здатних перешкодити штатному функціонуванню бортової електронної апаратури включно з її пошкодженнями та виходом з ладу. Привабливою рисою експерименту була також естетична складова, відображена в його назві, а саме створення штучного полярного сяйва.

Суть експерименту полягала в інжекції у магнітосферу Землі електронного пучка, що генерується електронно-променевою гарматою (бетатроном), для вивчення динаміки руху електронів у магнітному полі Землі та їх взаємодії з іоносферою. На відміну від пасивних методів, коли досліджуються ті чи інші явища незалежного (від дослідника) по-



дження, у даному випадку мав місце активний космічний експеримент, який полягав у спрямованому впливі на об'єкт дослідження з контрольованими параметрами та подальшим аналізом отриманих результатів, як це відбувається в наземних лабораторіях. Серед безлічі лабораторних і пасивних експериментів, які проводяться за даною тематикою, у світовій практиці кількість саме активних досліджень до цього часу є досить обмеженою. Зокрема, з жовтня 1974 р. проведено серії американських активних експериментів EXCEDE [5], Echo [6–8], експерименти Spacelab 1 (1983) [9], Atlas-1 (1992) [10, 11] та Veam-PIE (2023) [12], американсько-японські Charge-2 (1985) [13], SEPAC [14] та ін.

Активний експеримент «АРАКС» фактично був першим (січень-лютий 1975 р.) подібним успішним дослідженням з технічними характеристиками бортової апаратури, які вдалося повторити практично через півстоліття. Ініціаторами проєкту були д.ф.-м.н. І.О. Жулін (Інститут земного магнетизму та розповсюдження хвиль в атмосфері, СРСР) і проф. Ф. Камбу (Центр з вивчення випромінювання (CESR), Тулуза, Франція). Головні наукові установи, що брали участь у проєкті: у Франції – Національний центр з дослідження космічного простору (CNES), м. Тулуза; Центр з вивчення випромінювання (CESR), м. Тулуза; Група дослідження іоносфери (GRI), м. Сен-Мор-де-Фоссе; в СРСР – Інститут космічних досліджень, м. Москва; Інститут земного магнетизму та розповсюдження хвиль в атмосфері, м. Москва; Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона АН УРСР, м. Київ; Інститут електродинаміки АН УРСР, м. Київ; Інститут атомної енергії ім. Курчатова, м. Москва. Абревіатура АРАКС є співзвучною назві річки Аракс у Вірменії, де вперше було досягнуто угоду про проведення цього експерименту.



Згідно з планом експерименту необхідно було обрати пару магнітно-пов'язаних точок, здійснити пуск ракети по балістичній траєкторії, згенерувати в одній з точок пучок бета-частинок (електронів) і виконати реєстрацію очікуваних фізичних ефектів наземними, авіаційними та космічними засобами.

У якості магнітно-пов'язаних точок на суші було обрано унікальну пару – на острові Кергелен (Франція, Південна частина Індійського океану) та біля населеного пункту Согра (Архангельська область, СРСР). Обидві точки знаходяться на суші та розташовані у високих широтах різних півкуль на відстані більш ніж 12600 км одна від одної.

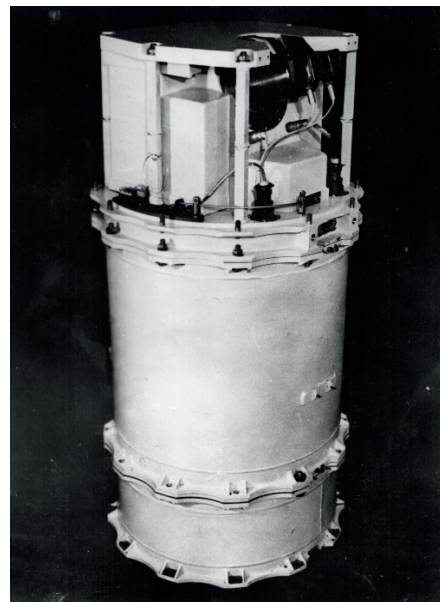
Електронний пучок, що генерується прискорювачем у районі о. Кергелен, мав розповсюдитися вздовж силової лінії на північ і в районі Архангельської області, входячи в щільні шари атмосфери, проявити себе як «збурювач спокою» середовища. Частково плазма, відбившись у північній півкулі, мала повернутися до місця старту практично повторюючи початкову траєкторію.

Запуск експериментального обладнання виконувався французькою ракетою «Ерідан», останній ступінь якої містив дві експериментальні системи, що взаємодіяли одна з одною: електронно-променевою гарматою, пристрої непрямої зміни потенціалу, детектори потоку частинок та відокремлюваний конус, що відкидався зі швидкістю 40 м/с^{-1} від головної частини ракети. На цьому конусі були розміщені антени, що призначені для виявлення радіохвиль, створених електронним променем при його взаємодії з іоносферою.

Для проведення експерименту були створені наземні вимірювальні стенди. При цьому важливе значення мали оптичні та радарні вимірювання в Північній напівкулі, у магнітно-пов'язаній точці з о. Кергелен, а також наднизькі та надвисокі частотні вимірювання в обох точках. До того ж, безпосередньо перед пуском ракети «Ерідан» над о. Кергелен на висоті $\sim 80 \text{ км}$ на парашутах розміщувались рентгенівські датчики, доставлені туди ракетою «Areas». Рентгенівський експе-

римент проводився Х'юстонським університетом (США).

Досвід розробки електронно-променевої апаратури, що розміщувалась на ракетах і супутниках, дозволив ІЕЗ і ІЕД створити для «ARAKS» прискорювач електронів, що має рекордні характеристики. Куратором проекту «ARAKS» в ІЕЗ був Д.А. Дудко. Основне керівництво за напрямками робіт здійснювали: О.К. Назаренко – електронно-променева гармата; В.Д. Шелягін – високовольтне джерело живлення; Ю.М. Ланкін – електроніка та автоматика; В.С. Патон – конструювання.



За основними технологічними параметрами прискорювач (бетатрон) апарату «ARAKS» був аналогічним одній із кращих промислових електронно-променевих зварювальних установок тих років У-250 А з гарматою У-530, тобто забезпечував потужність пучка 15 кВт, дозволяв працювати в імпульсному режимі, забезпечував відхилення електронного пучка на кути до $\pm 90^\circ$. Габаритно-вагові характеристики та надійність прискорювача перевищували відповідні параметри будь-якого відомого на той час наземного обладнання. Так, вага прискорювача «ARAKS» без акумуляторної батареї складала 120 кг, а об'єм – $0,2 \text{ м}^3$, що в 17 разів за вагою та в 20 разів за об'ємом менше, ніж у У-250 А, який було виконано на електронних лампах.

Цього вдалося досягти завдяки високому фаховому рівню співробітників ІЕЗ ім. Є.О. Патона та їх досвіду в розробці та практичному використанні потужної електронно-променевої апаратури та технологій у дослідженнях процесів вакуумного зварювання, переплаву, напилення тощо [15, 16]. Зокрема, зварювальна установка «Вулкан» успішно відпрацювала в космосі під час першого в сві-

ті експерименту зі зварювання в космосі на кораблі «Союз-6» 16 жовтня 1969 р. В експерименті «ARAKS» було застосовано спеціально розроблене потужне інверторне транзисторне джерело живлення електронно-променевої гармати, високовольтний секціонований випрямляч на напівпровідникових діодах, системи управління та автоматичного регулювання на транзисторах та інтегральних мікросхемах, що тільки з'явилися в той час.

До того ж, прискорювач «ARAKS» відповідав усім вимогам, що висувалися до космічної апаратури: діапазон робочих температур, вібро- та ударостійкість, рівень генеруємих радіозавад, надійність тощо, що підтверджено численними наземними випробуваннями в СРСР і Франції.

Прискорювач «ARAKS», створений на початку 70-х років минулого століття, набагато випередив свій час. Інверторні джерела живлення на транзисторах для електронно-променевого зварювання з подібними характеристиками з'явилися лише на самому початку нового тисячоліття. А для використання в космосі прискорювачі з подібними характеристиками вдалося створити лише у 2023 р., наприклад в рамках проекту Veam-PIE.

Після закінчення всіх наземних випробувань у жовтні 1974 р. учасники частини експедиції з СРСР за програмою «ARAKS» вилетіли літаком з Москви із зупинками в Дар-ес-Саламі (Танзанія), Антананаріву (Мадагаскар) і Сен-Дені (о. Реюньон, Франція). Звідти разом із членами французької експедиції, які приєдналися до них, 30 жовтня на теплоході «Аничков», що прибув з усім науковим обладнанням, відпливли на о. Кергелен, куди прибули 4 листопада.



До складу експедиції входили співробітники ІЕЗ Ю.М. Ланкін, Є.М. Байштрук, В.К. Мохнач і Ю.В. Непорожній, співробітник ІЕД Г.Ф. Пазєєв. Слід нагадати, що віддаленість о. Кергелен від найближчої материкової суші (Антарктида) складає біля двох тисяч кілометрів, а від африканського континенту – більше трьох тисяч кілометрів.

Така віддаленість і наявність лише морського сполучення висували жорсткі вимоги щодо організаційних аспектів, надійності обладнання, вимагали ретельного та детально продуманого планування експедиції в цілому, злагоджених дій всіх учасників команди.

Три місяці пішло на облаштування, монтаж, налагодження та випробування всього комплексу обладнання «ARAKS». І нарешті, коли 26 січня 1975 р. на о. Кергелен і в Архангельській області одночасно створилися сприятливі погодні умови для проведення експерименту, відбувся перший запуск ракети «Ерідан» за програмою «ARAKS».

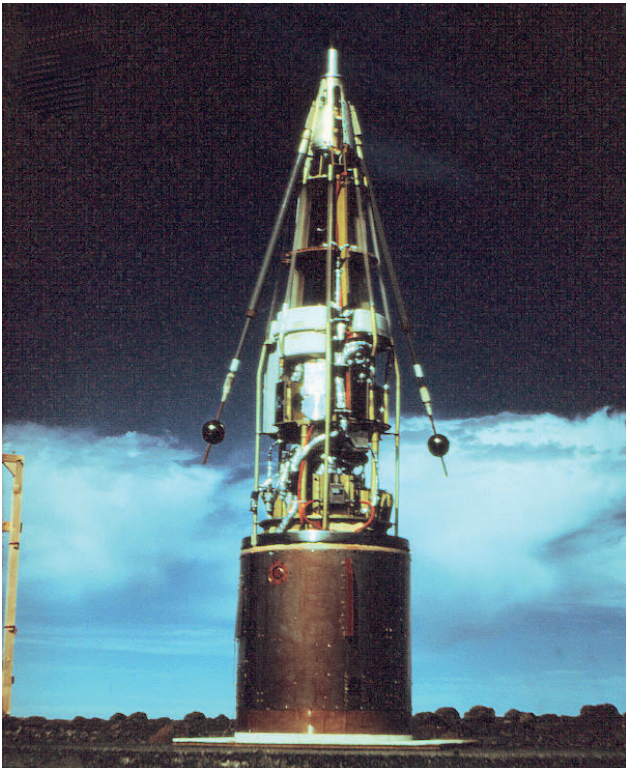
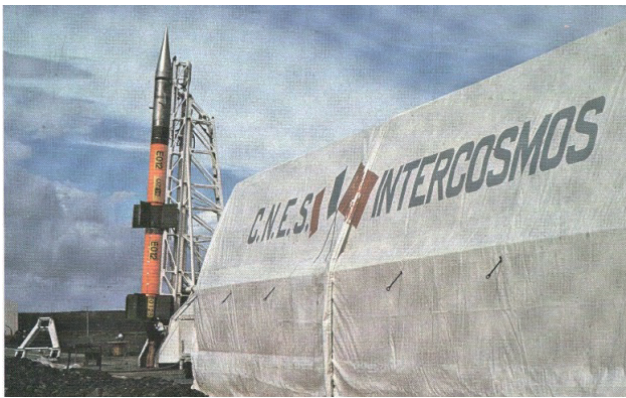
Обов'язки по синхронізації всіх апаратних складових експерименту, бортових і наземних, розташованих в різних півкулях нашої планети, а також команду на пуск ракети було покладено на Ю.М. Ланкіна. Ракета летіла на Північ за магнітним меридіаном по балістичній кривій на висоту ~ 200 км. Електронно-променева гармата інжектувала в магнітосферу модульований в часі за складною програмою струм (0,5 А) високої енергії (15 і 27 кВ) з різними кутами відносно осі ракети (-70° , 0, $+70^\circ$). Носовий конус відокремлювався на велику відстань (~ 10 км) попереду ракети. Він був обладнаний радіоприймачами, перемикачами частоти від 0 до 5 МГц для вивчення випромінювання від взаємодії електронного пучка з іоносферою. У магнітно-пов'язаній точці (Архангельська область) проводилися оптичні та радіолокаційні спостереження за електронним пучком.

Другий запуск відбувся 15 лютого 1975 р. На відміну від першого запуск було здійснено на Схід, відхилення пучка електронів відносно осі ракети складало -30° , 0, $+70^\circ$.

Інжектор електронів спрацював за повною програмою і, будучи головним науковим приладом на борту, в основному забезпечив успіх всього експерименту. Електронний пучок, інжектуючий на о. Кергелен, пройшовши більше 10000 км, викликав у магнітно-пов'язаній точці в Архангельській області штучне північне сяйво, зафіксоване радаром. Отримано радіовипромінювання в СВЧ діапазоні при взаємодії електронного пучка з іоносферною плазмою. Здійснено перехоплення пучка, магнітно відбитого від пов'язаної точки, а також від атмосфери при інжекції пучка вниз до Землі.

Аналіз телеметричної інформації показав, що обидва запуски ракети «Ерідан» пройшли успішно. Усі вітчизняні та більшість французьких приладів працювали нормально та виконали намічену програму.

Проект «ARAKS» зробив видатний внесок у фізику плазми (виникнення нестійкості плазми в



необмеженому просторі, викликане електронним пучком), а також у геофізику (топографія геомагнітних полів тощо). Отримано цінну наукову інформацію щодо процесів інжекції, взаємодії інжектваного пучка з навколишнім середовищем і струменем цезієвої плазми, що призначалася для компенсації позитивного заряду тіла ракети, що виникає при ухиланні високоенергетичних електронів від прискорювача. При цьому виявлено нові ефекти, які не очікували раніше. Зокрема, отримано цікаві дані про виникнення та розвиток нестійкості плазми, тобто про процеси, що мають



кардинальний інтерес для проблеми керованих термоядерних реакцій.

З практичної точки зору розуміння фізики взаємодії хвиль і частинок може мати в близькій перспективі дуже важливі дещо екзотичні застосування, такі як передбачення землетрусів, відновлення радіаційних поясів з метою захисту біосфери.

Список літератури

1. (2000) *Космос: технологии, материаловедение, конструкции*. Сб. науч. тр. Патон Б.Е. (ред), Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины.
2. Gendrin, R. (1974) The French-Soviet «ARAKS» experiment. *Space Sci. Rev.*, **15**, 905–931. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00241068>
3. Cambou, F., Lavernat, J., Migulin, V.V., Morozov, A.I., Paton et al. (1978) ARAKS – Controlled or puzzling experiment? *Nature*, **271**, 723–726. DOI: <https://doi.org/10.1038/271723a0>
4. Cambou, F., Dokoukine, V.S., Lavernat, J. et al. (1980) General description of the ARAKS experiments. *Ann. Geophys.*, **36**, 271–284.
5. McNutt, R.L.Jr., Rieder, R.J., Keneshea, T.J. et al. (1995) Energy Deposition in the Upper Atmosphere in the EXCEDE III Experiment *Advanced Space Research*, **15**(12). 13–16. DOI: [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00002-V](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00002-V)
6. Hendrickson, R.A., McEntire, R.W., Winckler, J.R. (1975) Echo I: an experimental analysis of local effects and conjugate return echoes from an electron beam injected into the magnetosphere by a sounding rocket. *Planet. Space Sci.*, **23**, 1431. DOI: [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(75\)90039-2](https://doi.org/10.1016/0032-0633(75)90039-2)
7. Winckler, J.R., Arnoldy, R.L., Hendrickson, R.A. (1975) Echo II: A study of electron beams injected into a high-latitude ionosphere from a large sounding rocket. *J. Geophys. Res.*, **80**, 2083–2088. DOI: <https://doi.org/10.1029/JA080i016p02083>
8. Hendrickson, R.A., Winckler, J.R., Arnoldy, R.L. (1976) Echo III: the study of electric and magnetic fields with conjugate echoes from artificial electron beams injected into the auroral zone ionosphere. *Geophysical Research Letters*, **3**, 409–412. DOI: <https://doi.org/10.1029/GL003i007p00409>
9. Sasaki, S., Kawashima, N., Kuriki, K. et al. (1986) Vehicle charging observed in SEPAC Spacelab-1 experiment. *J. Spacecraft Rockets*, **23**, 194–199. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.25801>
10. Burch, J.L., Mende, S.B. et al. (1993) Artificial Auroras in the upper atmosphere: 1. Electron beam injections. *Geophysical Research Letters*, **20**(6), 491–494. DOI: <https://doi.org/10.1029/93GL00595>
11. Mende, S.B., Burch, J.L. et al. (1993) Artificial Auroras in the upper atmosphere: 2. Imaging results. *Geophysical Research Letters*, **20**(6), 495–498. DOI: <https://doi.org/10.1029/93GL00594>
12. Reeves, G.D., Delzanno, G.L. et al. (2020) The Beam Plasma Interactions Experiment: An Active Experiment Using Pulsed Electron Beams. *Front. Astron. Space Sci.*, **7**:23. DOI: <https://doi.org/10.3389/fspas.2020.00023>
13. Sasaki, S., Oyama, K.I., Kawashima, N., Obayashi, T. et al. (1988) Tethered rocket experiment (CHARGE-2) initial results on electrodynamics. *Radio Sci.*, **23**, 975–988. DOI: <https://doi.org/10.1029/RS023i006p00975>
14. Obayashi, T. et al. (1982) Space Experiments with Particle Accelerators (SEPAC). In: Grandal, B. (eds) *Artificial Particle Beams in Space Plasma Studies*. NATO Advanced Study Institutes Series, vol. 79. Springer, Boston, MA. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4684-4223-6_44
15. Назаренко О.К. (1965) *Електронно-лучевая сварка*. Киев, Наукова думка.
16. Патон Б.Е., Назаренко О.К. и др. (1971) Особенности аппаратуры и процессов электронно-лучевой сварки и резки в условиях космоса. *Автоматическая сварка*, **3**, 3–8.

Учасник експерименту д.т.н. Юрій Ланкін