

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ГЕОМАГНЕТИЗМ
И
АЭРОНОМИЯ

Том XIV

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

6

МОСКВА · 1974

УДК 550.388.2

ИССЛЕДОВАНИЯ В ИОНОСФЕРЕ ПРИ ПОМОЩИ ИСЗ «КОСМОС-378»

1. ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

К. И. Грингауз, Г. Л. Гдалевич

Спутник «Космос-378», параметры орбиты которого — перигей 240 км, апогей 1770 км, наклонение к экватору 74°, предназначен для исследования глобальных характеристик ионосферы, концентрации и температуры частиц ионосферной плазмы и их связи с высыпаящимися заряженными частицами различных энергий.

Эксперименты, проведенные на «Космосе-378», сравниваются с экспериментами других советских и зарубежных спутников; приводится пример результатов, одновременно полученных комплексом научных приборов при пролете спутника через южный полярный касп на высотах 1500—1750 км.

17.II 1970 г. спутник «Космос-378» был выведен на орбиту с параметрами: перигей ~240 км, апогей ~1770 км, наклонение к экватору ~74°. Спутник предназначен главным образом для проведения длительных глобальных комплексных исследований характеристик ионосферной плазмы зондовыми методами. На спутнике установлено запоминающее устройство, позволяющее вести регистрацию ряда параметров непрерывно в течение его полного оборота вокруг Земли.

В период запуска спутника северная высокоширотная часть его орбиты проходила в ионосфере, находившейся в условиях полярной ночи, когда воздействие волнового излучения Солнца на ионосферу отсутствует и ее характеристики во многом определяются потоками энергичных заряженных частиц. В частности поэтому на спутнике были установлены приборы для изучения потоков энергичных заряженных частиц.

До настоящего времени опубликованы лишь немногие фрагментарные данные, полученные при помощи «Космоса-378» [1—3]. Настоящей статьей начинается систематизированная публикация результатов, полученных с этого спутника, а также на сети наземных геофизических обсерваторий, проводивших на территории СССР учащенные измерения во время пролетов спутника над районами расположения этих обсерваторий. Статья является вводной и содержит основные сведения о спутнике, его задачах и установленных на нем приборах, а также примеры полученных результатов.

«Космос-378» — одна из модификаций унифицированных спутников серии «Космос». [4]. Он не имел системы принудительной ориентации;

для определения в некоторый момент времени его ориентации использовались данные трехкомпонентного магнитометра, установленного специально для этой цели. Во время первых оборотов спутника вокруг Земли он совершал сложные вращения вокруг центра масс; основная составляющая его вращения имела место вокруг продольной оси с периодом ~ 3 мин., затем постепенно это вращение замедлялось. Запоминающее устройство позволяло регистрировать ряд величин при опросности ~ 12 гц в течение 100 минут. При пролете спутника над территорией Советского Союза имелась возможность регистрировать результаты измерений во время радиосвязи со спутником со значительно большей частотой опроса. Энергопитание аппаратуры на спутнике осуществлялось при помощи солнечных батарей и химических источников тока. Запоминающее устройство прекратило работу после ~ 200 оборотов спутника вокруг Земли, однако регистрация результатов измерений, проводимых научными приборами, продолжалась при помощи прямой радиосвязи до 9.VIII 1971 г.

Программа комплексных ионосферных исследований, выполнявшихся при помощи приборов, установленных на спутнике, включала в себя:

1) измерение распределения концентрации ионосферных заряженных частиц вдоль орбиты спутника при помощи а) сферической ионной ловушки с «плавающим потенциалом» внешней сетки (для измерения ионной концентрации n_i), б) сферической электронно-ионной ловушки (модификация прибора, примененного на спутнике «Ариэль-1» [5], и используемая для измерения концентраций электронов n_e и ионов n_i), в) цилиндрического зонда Ленгмюра (для определения n_e);

2) измерение электронной T_e и ионной T_i температур ионосферной плазмы и функции распределения электронов при помощи а) сферической электронно-ионной ловушки (T_e , T_i и функция распределения электронов), б) сферического высокочастотного зонда (измерение эффективного значения T_e). В разработке последнего использована модификация метода, применявшегося в Японии при ракетных исследованиях ионосферы [6], в) цилиндрического зонда Ленгмюра (T_e), г) шести ионных ловушек сотового типа [7] (T_i);

3) исследование изменений вдоль орбиты массового состава ионов при помощи сферической электронно-ионной ловушки;

4) исследование потоков электронов с энергиями $0,1 < E < 12$ кэв, энергетических спектров, распределений по питч-углам (при помощи двух цилиндрических электростатических анализаторов типа, описанного в [8]);

5) исследований потоков электронов с $E_e > 40$ кэв и потоков протонов с $E_p > 1$ Мэв, их распределений по питч-углам, определение конуса потерь этих потоков на высотах спутника при помощи двух газоразрядных счетчиков (для измерения потоков электронов с $E_e > 40$ кэв и $E_e > 150$ кэв) и полупроводникового счетчика (для измерения протонов с $E_p > 1$ Мэв);

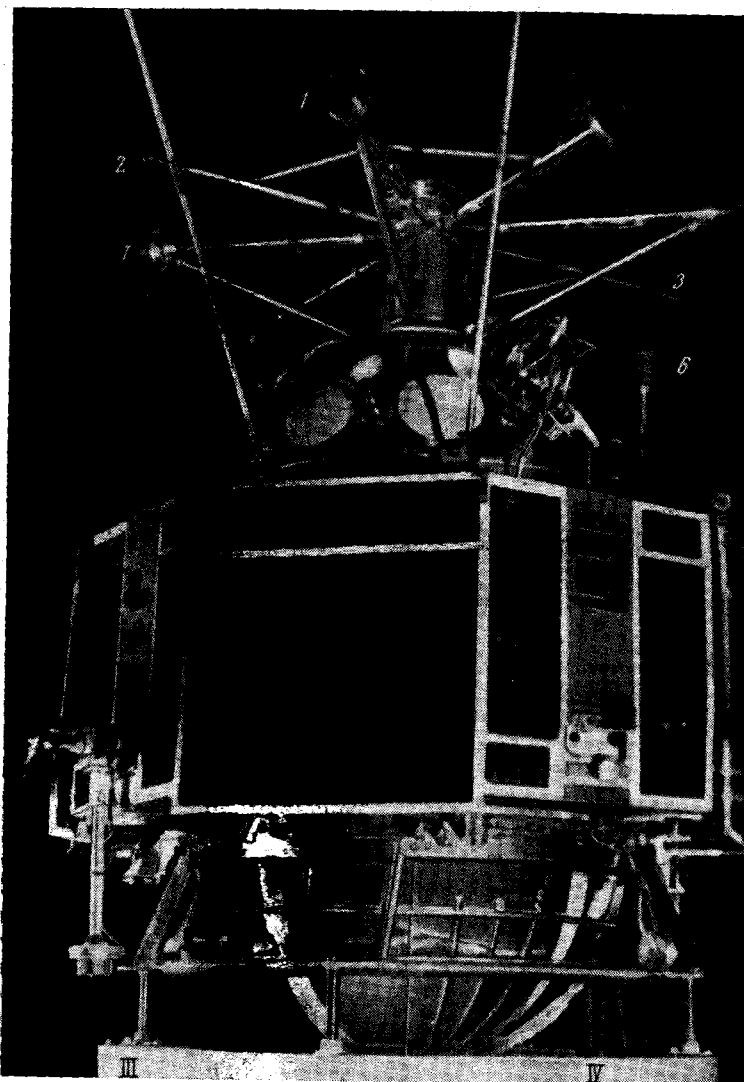
6) изучение связи состояния ионосферной плазмы с высыпанием потоков заряженных частиц при помощи сопоставления данных приборов на спутнике, а также наземных обсерваторий.

Сведения о чувствительности, динамическом диапазоне и других параметрах и особенностях каждого из этих приборов приводятся в последующих статьях настоящего цикла.

Фотография спутника «Космос-378» на технологической подставке приведена на фиг. 1. Видно, как были расположены чувствительные элементы некоторых названных выше измерительных приборов.

Хотя по отдельности различные характеристики ионосферы и потоков заряженных частиц, выполненные на «Космосе-378», измерялись на многих космических аппаратах, совместные измерения характеристик ионо-

сферной плазмы и спектров электронов с энергиями до 12 *кэв* проводились только на спутниках ISIS-1, ESRO-1A и ESRO-1B. Однако вследствие того, что измерения потоков электронов на ISIS-1 велись лишь на $H > 574$ км (таков был перигей орбиты спутника [9, 10]), а спутник



Фиг. 1. Спутник «Космос-378» на подставке: 1 — сотовые ловушки, 2 — сферическая ионная ловушка, 3 — цилиндрический зонд Ленгмюра, 4 — сферический зонд для измерений температуры электронов в/ч методом, 5 — электростатический анализатор, 6 — магнитометр

ESRO-1A имел практически круговую орбиту и, так же как и ESRO-1B, прекратил функционировать до запуска «Космоса-378» [11], результаты, полученные на спутнике «Космос-378», не дублируют результаты, полученные на указанных спутниках, но дополняют последние (ибо они получены в различное время и в различных областях ионосферы).

Измерения электронных спектров в этом диапазоне энергий на «Космосе-261» [12] и «Космосе-348» велись без одновременных прямых ионосферных измерений. Кроме того, применение запоминающего устройства со сравнительно высокой частотой опроса позволило получать при регистрации электронных спектров на спутнике «Космос-378» лучшее разрешение во времени и, следовательно, и в пространстве, чем в [12] (один спектр в режиме запоминания снимался за 15 сек., а в [12] — за 48 сек.).

Особенно большое внимание уделено измерениям температуры ионосферных заряженных частиц. Без знания пространственного распределения величины T_e невозможно построение ни теоретических, ни эмпирических моделей ионосферы, так как высотное распределение T_e определяется не только массовым составом ионов и гравитационным полем, но и взаимодействием ионов с электронами, в свою очередь существенно зависящим от T_e . Сама величина T_e сильно зависит от местного времени, геомагнитной широты, геомагнитной активности, притока тепла из плазмосферы, высыпания энергичных частиц и других факторов; методы расчета T_e и T_i еще весьма несовершенны (см., например, [13]).

Измерения, связанные с эффективной температурой электронов и с их функцией распределения, велись на «Космосе-378», как видно из данного выше перечня приборов, одновременно тремя различными методами: при помощи сферического высокочастотного зонда, сферической электронно-ионной ловушки и зонда Ленгмюра.

Особенность метода высокочастотного зонда состоит в том, что результаты определений T_e этим методом записываются при помощи весьма малого объема информации, что делает его особенно удобным для непрерывной регистрации T_e при помощи запоминающего устройства. Метод зонда Ленгмюра, напротив, требует для регистрации результатов большого объема информации (записи всей вольт-амперной характеристики), и поэтому он использовался только во время сеансов непосредственной радиосвязи со спутником. Определение T_e при помощи электронно-ионной ловушки проводилось в процессе регистрации зондовой характеристики и первой и второй производных зондового тока по потенциалу зонда; данные этих измерений также регистрировались запоминающим устройством, однако со значительно меньшим разрешением по времени, чем в случае измерений высокочастотным зондом.

За рубежом измерения T_e в последние годы проводились на спутниках «Эксплорер-31» и «Алуэт-2» (запуск в ноябре 1965 г.) [14], «Эксплорер-32» (май 1966 г.), ESRO-1A (октябрь 1968 г.) [15], ESRO-1B (октябрь 1969 г.) [11], OGO-6 (июнь 1969 г.) [16]. Однако изучение характеристик орбит этих спутников (областей соответствующих высот и широт) и интервалов времени, к которым относятся получаемые с этих спутников результаты, показывает, что результаты «Космоса-378» должны дополнять полученные на этих спутниках данные, а не повторять их.

Измерения T_e проводились также на спутниках «Интеркосмос-2» (1969 г.) [17] и «Интеркосмос-8» (1972–1973 гг.). Однако орбита «Интеркосмоса-2» наклонена к экватору всего на 49° , а апогей орбиты «Интеркосмоса-8», имеющей наклонение орбиты $\sim 71^\circ$, составляет всего ~ 670 км. Таким образом, данные с указанных спутников дополняют результаты, полученные на «Космосе-378», но не могут их заменить.

Измерения ионной концентрации, выполненные при помощи сферической ионной ловушки с плавающим потенциалом ее внешней сетки, также существенны для понимания взаимной связи температур, концентрации заряженных частиц в области F ионосферы и потоков энергичных частиц, высыпающихся в эту область.

На высокоширотных участках орбиты спутника счетчики энергичных

заряженных частиц при росте геомагнитной широты четко регистрировали зону захваченной радиации, слабо выраженную зону квазизахвата и область полярной шапки. При уменьшении широты картина повторялась в обратном порядке. Регистрация электронов с $E_e > 40$ кэв позволяла, в частности, легко находить границу между замкнутыми и разомкнутыми силовыми линиями геомагнитного поля, знание которой существенно облегчает интерпретацию наблюдаемых в высокоширотных областях явлений и помогает выделить на дневной стороне орбиты область полярного каспа [1].

Начальный период существования спутника был весьма интересен в геофизическом отношении. Вывод его на орбиту произошел в магнито-спокойных условиях, затем 18.I 1970 г. началась интенсивная магнитосферная буря. Эта буря была изолированной; после нее 20.II наступила магнитоспокойная обстановка, которая вновь сменилась сильной бурей. Последствия этой бури наблюдались в течение нескольких дней как по выпадению энергичных частиц, так и по изменениям характеристик ионосферной плазмы. Эти магнитосферные и ионосферные события происходили во время полета спутника с работающим запоминающим устройством вдоль его полной орбиты; полученные в этот период результаты измерений бортовых приборов, сопоставленные с данными наземных измерений полярных сияний, пульсаций геомагнитного поля, ОНЧ-излучения и т. п., будут рассмотрены в отдельной статье.

В качестве примера дополняющих друг друга результатов одновременных измерений бортовых приборов, установленных на «Космос-378», приведем на фиг. 2 график, заимствованный из [1].

На фиг. 2 приведены данные, полученные 27.II 1970 г. при пролете спутника в высокоширотной ионосфере южного полушария в районе апогея (на высотах $\sim 1500-1750$ км). Важная особенность орбиты спутника «Космос-378» состоит в том, что в районе апогея за интервал времени реального полета ~ 10 мин. он проходит через интервал местного времени ~ 5 час. В верхней части фиг. 2 приведены значения углов α между геомагнитным полем и нормалью к апертуре датчиков, значения $\alpha_{N_e} < 10$ кэв относятся к электростатическим анализаторам и $\alpha_{N_e} > 40$ кэв — к газоразрядному счетчику. Ниже приведены потоки электронов с $E_e > 40$ кэв и $E_e < 10$ кэв. Падающий и возрастающий участки кривой N_e ($E_e > 40$ кэв) на фиг. 2 показывают границы замкнутых силовых линий геомагнитного поля, являющиеся границами дневного полярного каспа [18], а кривые N_e (1 кэв) и N_e (2 кэв) показывают временные или пространственные изменения потоков электронов в дневном полярном каспе.

На фиг. 2 приведены также данные об ионной концентрации n_i , измеренной при помощи сферической ионной ловушки. В нижней части фигуры приведены электронные температуры T_e ; сплошная кривая построена по данным сферического высокочастотного зонда, а треугольники показывают значения T_e по данным сферической электронно-ионной ловушки; штриховая — отсутствие измерений.

На оси абсцисс показано местное время (на орбите спутника) и мировое время. Видно, что дневной касп во время рассматриваемого пролета спутника наблюдался в интервале местных времен от ~ 11 до ~ 16 час. Прохождение спутника через полярный касп характеризовалось существенным падением потоков электронов с $E_e > 40$ кэв, резким ростом потоков электронов с $E_e > 1$ кэв, увеличением концентрации ионосферных заряженных частиц на высотах $1700-1750$ км, существенным возрастанием T_e (~ 4000 до $\sim 7000^\circ$ К). Явлениям в полярном каспе, наблюдавшимся при пролетах «Космоса-378» через эту область, посвящена одна из последующих статей с изложением результатов полета этого спутника.

В отдельных статьях будут также рассмотрены результаты наблюдений при помощи «Космоса-378» захваченной радиации и высыпавшихся в ионосферу энергичных заряженных частиц, зон существования электронов с энергиями $E_e < 10$ кэВ и их энергетических спектров, температуры

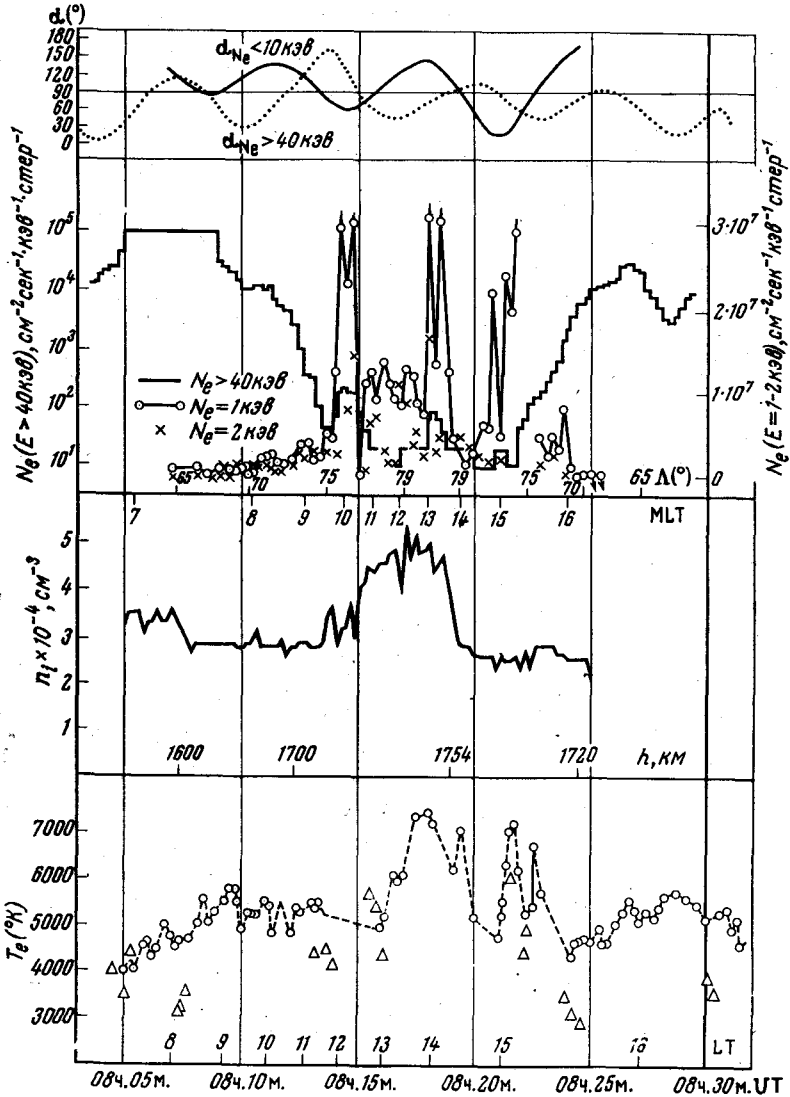


Рис. 2

ионосферных заряженных частиц и вариаций функции распределения ионосферных электронов, сопоставления результатов одновременных наземных и спутниковых определений характеристик ионосферы.

В подготовке экспериментов на «Космосе-378», обработке и интерпретации результатов участвовал большой коллектив научных работников, в том числе В. В. Афонин, Б. Н. Горожанкин, В. Ф. Губский, Ю. И. Логачев, О. П. Коломийцев, А. П. Ремизов, Э. К. Соломатина, В. Г. Столповский, М. З. Хохлов, С. М. Шеронова и др. При интерпретации результа-

тов использованы наблюдения наземных геофизических обсерваторий: Мурманск, Борок, Норильск, Подкаменная Тунгуска, Мыс Шмидта, Тикси и др., выполненные, в частности, О. М. Распоповым, Г. А. Жеребцовым, В. А. Куриловым, Н. Г. Клейменовой, Э. Г. Мирмовичем, В. Д. Гусевым.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. I. Gringauz, G. L. Gdalevich, M. Z. Khokhlov et al. Space Res. XIII, Akademie-Verlag, Berlin, 1973.
2. В. В. Афонин, М. И. Веригин, Г. Л. Гдалевич и др. X Всесоюз. конф. по распространению радиоволн. Тезисы докладов. Секция I. «Наука», 1972, 436.
3. Ю. В. Гоцелюк, С. Н. Кузнецов, Ю. И. Логачев и др. Космические исследования, 1973, 11, 635.
4. Ю. И. Зайцев. Спутники «Космос». «Знание», 1970.
5. P. J. Bowen, R. L. F. Boyd, C. L. Henderson, A. P. Willmore. Proc. Roy. Soc., 1964, A281, 514.
6. S. Miyazaki et al. Rept. Ionosphere Space Res. Japan, 1960, 14, 148.
7. В. В. Афонин, Т. К. Бреус и др. Сб. «Исследования космического пространства», «Наука», 1965, 151.
8. E. J. Лейн, Л. Г. Ольдекоп, В. В. Поленов и др. ПТЭ, 1971, № 6, 44.
9. J. H. Whitecher et al. J. Geophys. Res., 1972, 77, 6121.
10. A. Hruska, I. B. McDiarmid, J. R. Burrows. J. Geophys. Res., 1973, 78, 2311.
11. Report of ESRO presented to the XVI COSPAR Meeting, Konstanz, Germany, May 1973.
12. А. Д. Болюнова и др. Космические исследования, 1970, 8, 108.
13. K. Rawer. URSI Bulletin, No. 180, September 1971, 24.
14. L. H. Brace, J. A. Findley. PIEEE, 1969, 57, 1057.
15. C. S. Deehr. Particle and auroral observation from the ESRO-1 Auroras Satellite. ESRO SR-20, June 1972.
16. W. B. Hanson, S. Sanatani, D. Zuccaro, T. W. Flowerday. J. Geophys. Res., 1970, 75, 5483.
17. К. И. Грингауз и др. Космические исследования, 1973, 11, 95.
18. К. И. Грингауз. Сб. «Физика магнитосферы». «Мир», 1972, 566.

Институт космических исследований
АН СССР

Статья поступила
30 января 1974 г.