

УДК 550.38

Г. В. Лизунов<sup>1</sup>, В. И. Глемба<sup>2</sup>, В. Е. Корепанов<sup>2</sup>,  
Е. И. Крючков<sup>1</sup>, А. А. Лукенюк<sup>2</sup>, Т. В. Скороход<sup>1</sup>,  
О. П. Федоров<sup>1</sup>, В. А. Шувалов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований Национальной академии наук Украины и Национального космического агентства Украины, Киев

<sup>2</sup>Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, Львів

<sup>3</sup>Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Национального космического агентства Украины, Днепропетровск

## Космический эксперимент «Потенциал» на борту спутника «Сич-2»

Надійшла до редакції 27.11.07

Наприкінці 2008 р. на циркулярну сонячно-синхронну орбіту з висотою 650 км і нахиленням  $i = 98^\circ$  планується вивести супутник дистанційного зондування Землі «Сич-2». У корисне навантаження супутника введено приладовий комплекс «Потенціал» для діагностики польового, нейтрального і заряджених компонентів верхньої атмосфери, що включає давачі вимірювання параметрів нейтральних часток ДН1, ДН2, зонд Ленгмюра ДЕ, давач електричного потенціалу ЕЗ, ферозондовий магнітометр ФЗМ і систему збору наукової інформації. Описано основні наукові задачі проекту.

### ВВЕДЕНИЕ

Решением Национального космического агентства Украины от 10 октября 2007 г. в полезную нагрузку спутника дистанционного зондирования Земли «Сич-2» включен комплект научной аппаратуры (КНА) «Потенциал» для измерения параметров частиц и полей в верхней атмосфере Земли. Эксперимент ставит целью отработку методов диагностики космической среды и апробацию в летных условиях соответствующего приборного комплекса. Эксперимент «Потенциал» предваряет более масштабный проект космической программы Украины «Ионосат».

Конструктивно КНА «Потенциал» состоит из прибора для диагностики нейтральных частиц ДН, включающего два идентичных датчика ДН1 и ДН2, датчика заряженных частиц ДЭ, электрического зонда ЭЗ, магнитометра ФЗМ, а так-

же системы сбора научной информации ССНИ (табл. 1). Датчики ДН и ДЭ являются разработкой Института технической механики Национальной академии наук и Национального космического агентства Украины (ИТМ), остальные приборы изготовлены в Львовском центре Института космических исследований Национальной академии наук и Национального космического агентства Украины (ЛЦ ИКИ).

### НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТА «ПОТЕНЦИАЛ»

Стратегической целью космических проектов «Потенциал» и «Ионосат» [1] помимо проведения научных исследований является отработка методов мониторинга космической погоды и геофизических эффектов в ионосфере. Следует отметить, что ближний космос сегодня стал «сре-

Таблица 1. Комплект научной аппаратуры проекта «Потенциал»

Датчик	Измеряемая величина	Технические характеристики	Разработчики
Датчики кинетических параметров ДН, ДЭ	концентрация нейтральных частиц $n_n$ : $10^4 \dots 10^{10} \text{ см}^{-3}$ давление: $10^{-8} \dots 10^{-2} \text{ Па}$ концентрация заряженных частиц $n_e$ : $10^3 \dots 10^{11} \text{ см}^{-3}$ температура электронов $T_e$ : $0.01 \dots 1.5 \text{ эВ}$	габариты (без кабелей): ДН: $\varnothing 50 \times 85 \text{ мм}$ ДЭ: $\varnothing 12 \times 248 \text{ мм}$ потребляемая мощность < 2 Вт	ИТМ, Днепропетровск
Электрический зонд ЭЗ	потенциал электрического поля диапазон частот ДС — 200 КГц шум $10 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$	потребляемая мощность $\leq 0.2 \text{ Вт}$ вес < 0.2 кг габариты (без кабелей): $\varnothing 60 \times 182 \text{ мм}$	ЛЦ ИКИ, Львов
Феррозондовый магнитометр квазипостоянного поля ФЗМ	вектор магнитного поля $\mathbf{V}$ диапазон частот ДС — 1 Гц динамический диапазон $\pm 65000 \text{ нТл}$	потребляемая мощность < 0.4 Вт, вес: датчика < 0.2 кг, блока электр. < 0.5 кг габариты (без кабелей): $116 \times 45 \times 40 \text{ мм}$	ЛЦ ИКИ, Львов
Система сбора научной информации ССНИ	объем памяти 4 Гб	потребляемая мощность < 4 Вт, вес < 1 кг	ЛЦ ИКИ, Львов

дой обитания» пилотируемых космических аппаратов и разнообразных технических средств: связи, навигации, дистанционного зондирования Земли и пр. А поскольку количество систем спутникового базирования из года в год возрастает, проблемы и задачи диагностики, изучения и предсказания изменений параметров космической среды актуальны сегодня и в перспективе.

К важнейшим характеристикам околоземной космической среды относятся пространственно-временные распределения нейтральных и заряженных частиц, электромагнитных полей и токов. Эти характеристики взаимозависимы и вариативны, что затрудняет их экспериментальный контроль и адекватное теоретическое прогнозирование.

На высотах ниже 800 км, где концентрация заряженных компонентов не превосходит 10 %, динамика нейтрального газа играет важную, а во многих случаях — определяющую роль в поведении ионосферы. Основная экспериментальная информация о процессах в верхней нейтральной атмосфере получена в наземных наблюдениях именно плазменных возмущений,

в то время как прямые спутниковые измерения параметров нейтральных частиц очень редки. Практически все они были получены несколькими спутниками серии «Эксплорер» (АЕ-С, АЕ-Е, ДЕ2 и др.) в 1970-х и начале 1980-х гг. С позиций сегодняшнего дня объем информации, переданной на Землю спутниками тех лет, выглядит весьма скромно. Современный космический эксперимент с длительным мониторингом атмосферно-ионосферных параметров позволит исследовать динамику верхней атмосферы на качественно новом уровне.

Для диагностики нейтральных частиц «Эксплореры» оснащались сложными приборными комплексами, включающими инструменты для определения температуры нейтрального газа и масс-спектрометры для измерения концентраций отдельных газовых компонентов. Спутник «Сич-2» предлагается оснастить прибором ДН — датчиком давления для измерения температуры и концентрации нейтральных частиц без определения химического состава; его апробация на борту спутника «Сич-2» является одной из основных задач проекта «Потенциал».

Остальные инструменты КНА предназначены

для синхронной регистрации плазменных и электромагнитных параметров. Для измерения электронной концентрации и температуры служит разработанный в ИТМ датчик заряженных частиц ДЭ, являющийся реализацией зонда Ленгмюра [6].

В качестве служебного магнитометра на спутнике «Сич-2» установлен высокоточный научный прибор — феррозондовый магнитометр ФЗМ, разработанный и изготовленный в ЛЦ ИКИ. Данные этого прибора будут записываться в ССНИ проекта «Потенциал». Говоря о необходимости магнитных измерений, особо подчеркнем актуальность изучения вариаций магнитного поля Земли  $\delta B$  и их связи с динамикой нейтральной атмосферы. Значительный интерес представляют электромагнитные эффекты атмосферных гравитационных волн (АГВ). На высотах  $E$ -области АГВ индуцируют системы электрических токов, заполняющих силовую трубку магнитного поля — от части ионосферы, возмущенной прохождением АГВ, до магнитосопреженной ионосферы. Существование таких токонесущих силовых трубок было теоретически предсказано в работе [4] и косвенно подтверждено в этой же работе данными наземных электромагнитных наблюдений. Поиск электромагнитных структур АГВ в космосе является совершенно новой научной задачей, которая может быть решена с помощью КНА «Потенциал».

Еще один изготовленный в ЛЦ ИКИ прибор полезной нагрузки — электрический зонд ЭЗ — служит для измерения потенциала корпуса спутника относительно плазмы. По данным ЭЗ будет определена компонент квазипостоянного электрического поля  $\delta E$ , что позволит оценивать параметр  $\delta E/\delta B$ , важный для правильной интерпретации магнитогидродинамических процессов в ионосфере.

Измерение потенциала спутника создает дополнительную возможность плазменной диагностики по методике измерения параметров солнечного ветра, предложенной и описанной в работе [5]. Оценка параметров ионосферы с помощью электрического зонда ЭЗ будет одновременно служить независимым тестом работоспособности датчика заряженных частиц ДЭ.

Наличие прибора ЭЗ на борту «Сич-2» открывает возможность проведения технологического эксперимента по измерению собственных элект-

ромагнитных шумов платформы МС-2-8 (разработанной и изготовленной в ГKB «Южное»). Вопрос об электромагнитной чистоте платформы представляет интерес для ее дальнейшего использования в других космических экспериментах, в частности в проекте «Ионосат».

Космический эксперимент «Потенциал», как и любой другой ионосферный и магнитосферный проект, должен максимально использовать возможности наземной диагностики и активного воздействия на ионосферу. Время от времени «Сич-2» будет проходить над наземными испытательными полигонами, в том числе мощными КВ-передатчиками, что позволит проводить комбинированные эксперименты с нагревом ионосферы и регистрацией эффекта на спутнике. Значительный интерес представляют эксперименты с использованием аврорального стенда Европейской ассоциации ионосферного рассеяния EISCAT (г. Тромсе, Норвегия), сверхмощных станций HAARP, HIPAS (Аляска, США) и «Сура» (Россия), а также национальных средств: нагревного стенда некогерентного рассеяния Института ионосферы Национальной академии наук и Министерства образования и науки Украины (Харьков), акустического источника ЛЦ ИКИ и пр.

Еще одной актуальной задачей проекта «Потенциал» является проведение синхронных измерений магнитного поля на спутнике и на цепочках многочисленных наземных магнитометрических станций. Такие станции достаточно неравномерно распределены по земному шару: главным образом в высоких широтах обоих полушарий. Регистрация магнитных вариаций в одной силовой трубке на борту «Сич-2» и на земной поверхности позволит решить ряд оригинальных задач наземно-космической интерферометрии собственных и вынужденных колебаний магнитного поля Земли. Особый интерес представляют измерения над Украинской антарктической станцией (УАС) «Академик Вернадский», оснащенной современной магнитной обсерваторией.

Резюмируя вышеизложенное, сформулируем задачи предлагаемого эксперимента.

1. Разработка методологии синхронной регистрации параметров электромагнитного, нейтрального и заряженного компонентов верхней атмосферы. Апробация в космическом эксперименте

датчиков кинетических параметров частиц ДН, ДЭ.

2. Отработка методики диагностики параметров ионосферной плазмы по данным измерений флуктуаций потенциала спутника с помощью электрического зонда ЭЗ.

3. Изучение волновой активности верхней атмосферы. Анализ отдельных событий (case study) и статистических закономерностей.

4. Выявление электромагнитных структур АГВ по данным прямых спутниковых измерений.

5. Измерение характеристик электромагнитных шумов платформы МС-2-8.

6. Проведение комбинированных экспериментов с наземными средствами диагностики и активного воздействия на ионосферу.

#### ТРЕБОВАНИЯ К ПРИБОРНОМУ КОМПЛЕКСУ И ЦИКЛОГРАММАМ ИЗМЕРЕНИЙ

Запуск «Сич-2» планируется на конец 2008 г. Спутник предполагается вывести на циркулярную солнечно-синхронную орбиту с высотой около 650 км и наклоном  $i = 98^\circ$ . Такая орбита пересекает все широтные районы ионосферы: полярные шапки, авроральные овалы, L-оболочки радиационных поясов и пр. В циклограммах включений КНА «Потенциал» следует предусмотреть приоритетные «окна» для проведения экспериментов с наземными средствами дистанционного зондирования ионосферы. К пунктам включений следует отнести прежде всего места расположения национальных геофизических полигонов: г. Харьков и его окрестности, где находятся радар некогерентного рассеяния и станция вертикального зондирования ионосферы (Институт ионосферы Национальной академии наук и Министерства образования и науки Украины), система ионосферного зондирования на базе крупнейшей фазированной антенной решетки радиотелескопа УТР-2, низкочастотная обсерватория (Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины), установки частичного отражения и многочастотного доплеровского зондирования (Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина), магнитометрические системы (Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина и Радиоастрономический

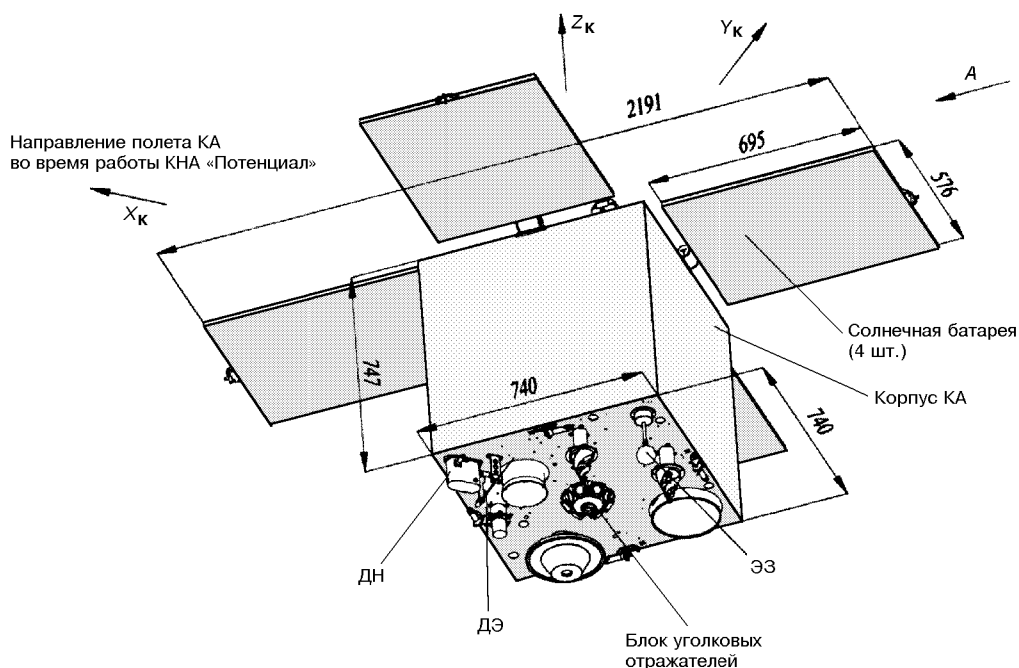
институт Национальной академии наук Украины). Кроме того, на территории Украины расположены такие уникальные системы диагностики, как радиоинтерферометр УРАН (г. Змиев, Полтава, Одесса, Шацк), стенд мощного инфразвукового воздействия (г. Львов, ЛЦ ИКИ), сеть магнитных и метеорологических станций (Госгидромет, ИГУ Национальной академии наук Украины). Необходимо также предусмотреть сеансы измерений при пролете спутника над испытательным полигоном УАС [2, 3].

Средние значения и диапазоны вариаций ионосферных параметров и электромагнитных полей на высотах «Сич-2» хорошо известны. Параметры нейтрального компонента атмосферы изучены недостаточно. Высота 650 км соответствует экзосфере; здесь нейтральные частицы движутся без столкновений по индивидуальным баллистическим траекториям, и атмосферный газ не обладает упругостью. В таких условиях квазиволновые вариации экзосферных параметров возникают вследствие бесстолкновительного переноса возмущений снизу, а экзосферные неоднородности воспроизводят волновую активность атмосферы на высоте экзобазы (около 350 ... 500 км в зависимости от уровня солнечной активности).

Характеристики сигналов, регистрацию которых должен обеспечивать КНА «Потенциал», приведены в табл. 2. Частота опроса датчиков задается быстродействием самого медленного прибора ДН ( $f = 1$  Гц). Поскольку при этом

Таблица 2. Характерные величины возмущений электромагнитного поля, плазмы и нейтральных частиц на высоте 650 км

Явление	Параметры сигнала
Квазипостоянные поля и их вариации	магнитное поле Земли: 30000 ... 60000 нТл, вариации: $\delta B \sim 1$ нТл, $\delta B_{\max} \sim 300$ нТл электростатическое поле: $\delta E \sim 1$ мВ/м, $\delta E_{\max} \sim 0.1$ В/м
Заряженные частицы	$n_e \sim 5 \cdot 10^4$ см <sup>-3</sup> , $\delta n_e \sim 10^2 \dots 10^4$ см <sup>-3</sup> , $\delta n_{e\max} \sim n_e$
Нейтральные частицы	$n_n \sim 10^6$ см <sup>-3</sup> , $\delta n_n \sim 10^3$ см <sup>-3</sup> , $\delta n_{n\max} \sim 10^5$ см <sup>-3</sup>



Расположение датчиков эксперимента «Потенциал» на борту «Сич-2»

орбитальное смещение спутника между двумя последовательными отсчетами составляет 7.7 км, масштаб Найквиста, определяющий минимально разрешимую длину волны, равен  $2 \times 7.7 \text{ км} = 15.4 \text{ км}$ . Этого вполне достаточно для измерения тонкой структуры экзосферных неоднородностей, систем продольных магнитосферно-ионосферных токов, магнитогиродинамических волн, электромагнитных полей, генерируемых АГВ, плазменных «баблов», перемещающихся ионосферных возмущений и пр. Вместе с тем диагностика мелкомасштабных плазменных неоднородностей (минимальные размеры которых сравнимы с величиной дебаевского радиуса около 10 см) в эксперименте «Потенциал» невозможна. Размещение датчиков КНА на спутнике «Сич-2» показано на рисунке.

#### РЕЖИМЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Проведение эксперимента «Потенциал» выдвигает определенные требования к ориентации «Сич-2». Прибор для регистрации параметров

нейтральных частиц ДН содержит датчики ДН1 и ДН2, входные отверстия которых направлены взаимно перпендикулярно. Оптимальным является такое положение спутника, когда одно из входных отверстий направлено по вектору движения, что позволяет по комбинации показаний ДН1 и ДН2 разделить динамический напор набегающего на спутник газа и тепловое давление. При иной ориентации спутника «Сич-2» измерения по-прежнему возможны, но интерпретация данных ДН потребует дополнительных расчетов.

Спутник дистанционного зондирования Земли «Сич-2» предусматривает два базовых режима ориентации:

1) «на Землю», когда оси спутниковой платформы устанавливаются совершенно определенным образом для проведения измерений приборами дистанционного зондирования Земли. Такое положение удерживается в течение сеанса измерений — около 15 мин;

2) ориентация «на Солнце» для зарядки солнечных батарей. В этом режиме спутник проводит основную часть времени, неуправляемо прецессируя вокруг главной оси.

С учетом сказанного можно предложить следующие основные режимы измерений.

1. Мониторинговый-1. Включается в режиме ориентации платформы «Сич-2» «на Землю» (приблизительно на 15 мин). Частота опроса всех датчиков 1 Гц.

2. Мониторинговый-2. Включен непрерывно в режиме ориентации «на Солнце». Частота опроса всех датчиков 1 Гц.

3. Высокочастотный. Имеет целью измерение электромагнитных шумов спутниковой платформы. Длительность включения определяется заполнением квоты памяти эксперимента «Потенциал» в бортовом цифровом вычислительном комплексе. Частота опроса электрического зонда ЭЗ в этом режиме 1 КГц, остальных датчиков — 1 Гц.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплект научной аппаратуры «Потенциал» предназначен для длительного мониторинга параметров полевого, нейтрального и заряженного компонентов космической среды на высотах термосферы и экзосферы. Помимо проведения геофизических исследований апробация приборного комплекса «Потенциал» на борту «Сич-2» имеет целью подготовку проекта «Ионосат» Общегосударственной космической программы Украины на 2008—2012 гг.

Работа поддержана контрактами Национального космического агентства Украины № 1 02/03, № 1-05/03 и № 12-14/07.

1. Івченко В. Н., Корепанов В. Є., Лізунов Г. В. та ін. Іоносферний супутниковий проект «Іоносат» // Космічна наука і технологія.—2007.—13, № 3.—С. 55—66.
2. Розробка науково-технічних пропозицій щодо досліджень «космічної погоди»: (Заключний звіт) / ЛЦ ІКД НАНУ і НКАУ; Керівник робіт В. Є. Корепанов. — № 0104V007930 (шифр «КОСМОКАРТА-ЛЦ»). — Львів, 2004.—37 с.
3. Электромагнитные проявления геофизических эффектов в Антарктиде / Под ред. Л. Н. Литвиненко, Ю. М. Ямпольского. — Харьков: РАИ НАНУ, 2005.—343 с.
4. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н. и др. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью // Радиофизика и радиоастрономия.—2004.—9, № 2.—С. 130—151.
5. Grard, R. J. L. Spacecraft potential control and plasma diagnostic using electron field emission probe // Space Sci. Instrum.—1975.—1.—P. 363—373.
6. Shuvalov V. A., Pis'mennyi N. I., Priymak A. I., Kochubey G. S. A probe diagnostics for high-speed flows of rarefied partially dissociated plasma // Instruments and Experimental Techniques.—2007.—5, N 3.—P. 370—378.

#### SPACE EXPERIMENT «POTENTIAL» ONBOARD THE SICH-2 SATELLITE

*G. V. Lizunov, V. I. Glemba, V. E. Korepanov,  
E. I. Krjuchkov, A. A. Lukenjuk, T. V. Skorokhod,  
O. P. Fedorov, V. A. Shuvalov*

The remote sensing satellite Sich-2 is planned to be placed in the circular solar-synchronous orbit with the altitude of 650 km and inclination of 98° in late 2008. The satellite payload includes the instrumentation set for diagnostics of neutral, plasma and field components of the upper atmosphere. The set «Potential» includes the sensors DN1, DN2 for the detection of neutral particles, a Langmuir probe, the EZ sensor of electric potential, flux-gate magnetometer FZM and data acquisition system. We describe the main scientific purposes of the project.