

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

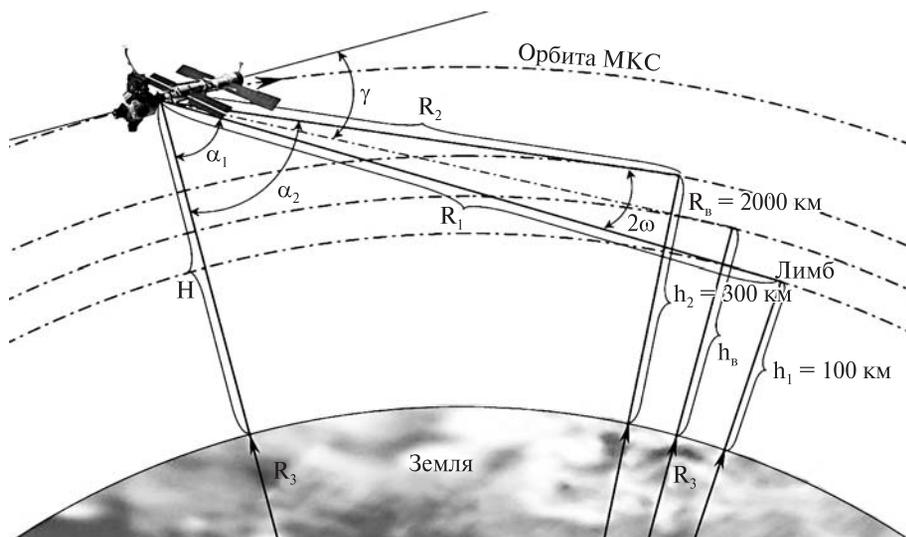


Рис. 1. Схема проведения КЭ «Диагностика»

- 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  $\lambda$  557.7 нм (на высотах 110–130 км),  $\lambda$  630.0 нм (на высотах 290–

320 км), азота на длине волны  $\lambda$  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  $\lambda$  557.7 нм), либо второго (красная линия  $\lambda$  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.

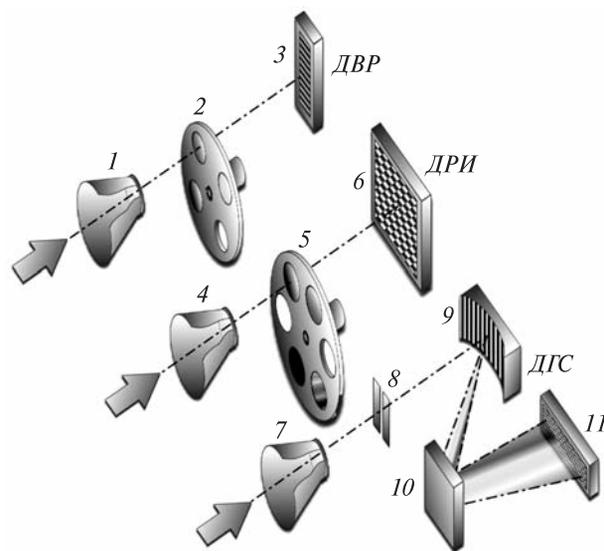


Рис. 2. Оптико-кинематическая схема блока оптических датчиков оптического модуля ОРФК: 1, 4, 7 – входные объективы с блендами; 2 – турель ДВР с шаговым двигателем и интерференционными фильтрами ( $\lambda\lambda$  557.7, 630.0, 427.8 нм, без фильтра); 3 – приемная линейка 3648 элементов; 5 – турель ДРИ ( $\lambda\lambda$  650–750 нм – «Спрайт»,  $\lambda\lambda$  390–430 нм – «Джет», «Эльф»,  $\lambda$  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-

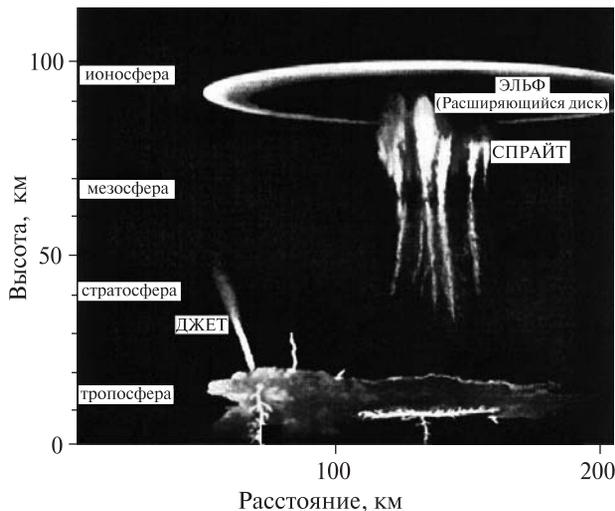


Рис. 3. Спрайт, джет и другие свечения, сопровождающие направленные вверх разряды молний в атмосфере

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  $\lambda$  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  $\tau$  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 $^{-1}$ ·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  $Q_{\lambda}$ , так и через спектральную чувствительность матрицы  $S_{\lambda}$ . В этих выражениях  $\varepsilon_{\text{вх}}$  — относительное отверстие,  $\tau_{\text{вх}}$  и  $\tau_{\lambda}^{\phi}$  — коэффициенты пропускания входного объектива и фильтра,  $a$ ,  $b$  — размеры пикселя приемника по горизонтали и вертикали, фотонная светимость источника  $P_{\lambda}$  (в Рэлях) вычислена для соответствующего спектрального диапазона с учетом полуширины фильтра,  $\lambda$  обозначает регистрируемую линию излучения, константа  $N_0 = 10^6$  (фот.·с<sup>-1</sup>см<sup>-2</sup>), определяющая 1 Рэлей,  $h$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света,  $e$  — заряд электрона,  $\tau_i$  — 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  $\lambda$  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<sup>-</sup> 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 гидроксидов.

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».