

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ЦЕЛЕВОЙ АППАРАТУРЫ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

И. Б. Калошин^{*}, А. Г. Харламов, В. О. Скрипачев, И. В. Суровцева, В. К. Иванов

Московский технологический университет (МИРЭА)
Российская Федерация, 119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
^{*}E-mail: kaloshin@mirea.ru

Предлагается использовать методы системного анализа при проектировании и комплектовании малых космических аппаратов. Показано, что перспективный малый космический аппарат может быть представлен как совокупность технических подсистем, которые характеризуются различными параметрами: показателями назначения, показателями надежности (безотказности, долговечности, ремонтпригодности), показателями технологичности, показателями стандартизации и унификации. Применен системный подход к выбору рационального состава комплекса бортовых приборов целевого назначения. Обоснована актуальность космического мониторинга средствами бортовой научной аппаратуры малых космических аппаратов с целью получения информативных источников геофизического назначения. Рассмотрены физические явления, связанные с сейсмической активностью и регистрируемые комплексом приборов малых космических аппаратов. Приведены результаты анализа литературных источников, содержащих предвестниковую информацию. Предложена методика выбора информативных спутниковых данных, получаемых бортовыми геофизическими приборами, комплектация которых определяется требованиями к их составу и техническим характеристикам малых космических аппаратов. Проведено экспертное оценивание основных источников предвестниковой информации и программно реализован метод парных сравнений с учетом «порогового принципа», исходя из актуальности предвестника землетрясения, экономической обоснованности и реализуемости приборов. Получен значимый коэффициент конкордации, который свидетельствует о сильной связи между оценками экспертов. Приведены результаты расчета приоритетности показателей предвестниковой информации, исходя из обозначенных критериев. Предложена визуализация результатов селекции предвестниковой информации. Обоснована применимость и оптимальный состав бортовой научной аппаратуры малых космических аппаратов для диагностики сейсмической активности. Определены перспективы развития космической системы мониторинга предвестников землетрясений. Реализованный системный подход может быть использован при формировании облика перспективных малых космических аппаратов различного назначения, в том числе для решения задач дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: малый космический аппарат, бортовая научная аппаратура, геофизический мониторинг, экспертный метод, критерии отбора, метод парных сравнений, коэффициент конкордации.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 868–875

SYSTEM APPROACH OF SELECTION TO PURPOSE DESIGNED EQUIPMENT OF SMALL SPACECRAFT

I. B. Kaloshin^{*}, A. G. Kharlamov, V. O. Skripachev, I. V. Surovceva, V. K. Ivanov

Moscow Technological University (MIREA)
78, Vernadsky Av., Moscow, 119454, Russian Federation
^{*}E-mail: kaloshin@mirea.ru

It is proposed to use methods of system analysis in designing small spacecraft. It is shown that a perspective small spacecraft can be represented as a set of technical subsystems that are characterized by various parameters: target indicators, reliability indicators (reliability, durability, maintainability), processability indicators, standardization and unification. A systematic approach to the selection of the rational composition of a set of on-board instrumentation for a specific purpose was adopted. We prove the urgency of space monitoring by means of onboard scientific equipment (OSE) of small spacecraft (SS), with the purpose of receiving geophysical data. We consider physical phenomena associated with seismic activity and registered by a number of SS instruments. We present an analysis of publications that demonstrate the possibility of space monitoring of seismic activity. We propose methodology for analyzing satellite data obtained by onboard geophysical instruments, the composition of which depends on content requirements and technical SS characteristics. We conducted an expert review of the sources of basic predictive information. To choose the criteria, we implemented the method of paired comparisons with the “threshold principle”. The criteria chosen were: the

urgency of the earthquake precursor, and the economic validity and feasibility of the instruments's creation. A significant concordance coefficient has been obtained, it indicates a rigid coupling between the experts' assessments. The results of calculating the priority of predictive information indicators are presented, based on the indicated criteria. We proposed the visualization of the selection of the predictive information results. We validated the applicability and optimal composition of on-board scientific equipment (OSE) of SS to diagnose the seismic activity. Finally, we determined the prospects of developing a space monitoring system for earthquake precursors. The realized system approach can be used for forming the appearance of perspective small spacecraft for various purposes, including for solving problems of remote sensing of the Earth.

Keywords: Small spacecraft, on-board scientific equipment, geophysical monitoring, expert method, selection criteria, paired comparisons, concordance coefficient.

Введение. Современные космические системы используются для решения широкого круга прикладных задач: спутниковая связь, дистанционное зондирование Земли, навигация, исследование Солнечной системы и т. д. Задача обеспечения высокой эффективности и результативности для различных космических систем является весьма актуальной.

В последнее десятилетие стали востребованными разработка, производство и эксплуатация малых космических аппаратов (МКА) с массой до 100 кг, которые наиболее экономически обоснованы, чем тяжелые космические аппараты.

На различных этапах проектирования сложных технических систем, в том числе и МКА, необходимо использование методов системного анализа [1]. Поскольку МКА обладают существенными ограничениями по массе, габаритам, энергопотреблению и другим техническим параметрам, то одной из задач системного анализа является выбор и обоснование рационального состава комплекса приборов целевого назначения.

В состав МКА входят служебные и целевые средства бортовой аппаратуры, рассматриваемые как подсистемы. Поэтому перспективный МКА может быть представлен как совокупность технических подсистем, т. е.

$$C_{\text{МКА}} = \{A_1, \dots, A_N\},$$

где $C_{\text{МКА}}$ – разрабатываемый МКА; A_i – его подсистемы с порядковым номером $i = 1, \dots, N$.

При этом технические средства A_i характеризуются различными параметрами: показатели назначения, показатели надежности (безотказности, долговечности, ремонтпригодности), показатели технологичности, показатели стандартизации и унификации и др.

Для геофизического мониторинга бортовая научная аппаратура (БНА) МКА имеет потенциальные возможности решать задачи наблюдения за различными процессами и явлениями на Земле. Актуальность мониторинга предвестников землетрясений посредством БНА обусловлена высокими требованиями по оперативности получения данных, глобальности обзора поверхности Земли и достаточности набора данных по их полноте (информативности).

Процесс подготовки сильных коровых землетрясений сопровождается появлением различных предвестников: деформация земной коры, вариации электромагнитного поля, аномальные облачные образования и др. Для эффективного краткосрочного анализа предвестников сейсмической опасности необходимо

использование космического сегмента, так как наземные службы недостаточно отражают изменения параметров окружающей среды в силу локализации их измерений.

Геофизические явления и бортовая научная аппаратура. Рассмотрим некоторые геофизические явления, связанные с сейсмической активностью и регистрируемые посредством БНА МКА.

Известно, что землетрясения сопровождаются развитием крупных тепловых аномалий, которые возникают за 2–3 недели до события и существуют в течение 1–2 дней после него. Интенсивность таких аномалий обычно составляет 3–4 °С, причём нагревается не только земная поверхность, но и воздух над эпицентром. Эти аномалии можно зафиксировать оптическими средствами, работающими в ИК-диапазоне, посредством сканирующих радиометров [2].

Целесообразно учитывать результаты и линейментного анализа космических изображений подстилающей поверхности в различных областях спектра: зеленой, красной и ближней ИК-диапазона. В сейсмических регионах локальные линейменты лучше всего выражаются на космических изображениях, сформированных в зеленой зоне спектра, а региональные, как правило, – в ближнем ИК-диапазоне. Поэтому с целью сохранения максимальной информативности космических изображений и экономии времени на их обработку полезно использовать промежуточную (красную) зону спектра: $\Delta\lambda = 620\text{--}690$ мкм [3].

Наиболее информативным представляется использование космической тепловой съемки в комплексе с другими спутниковыми методами. Среди таких методов могут быть названы радиолокационная интерферометрия, наблюдения за вариациями параметров ионосферы. Так, в [4] приведены результаты обработки измерений бортовым прибором ISL KA DEMETER, где обнаружено значительное увеличение плотности электронов за ~ 4 дня до сейсмического события в Самоа 29.09.2009 г.

Увеличение шумов в частотном диапазоне 100–500 Гц регистрировалось за 14 часов до землетрясения на низкоорбитальных космических аппаратах над эпицентром землетрясения при $M > 5,4$. Эффект аномального увеличения интенсивности низкочастотных радиоволн (0,1–15 кГц) в моменты землетрясений фиксировался как магнитной, так и электрической антенной. Также фиксировались изменения фазы низкочастотных сигналов, трассы распространения которых проходили через сейсмоактивный район [5; 6]. В [7] обнаружена пространственно-временная

корреляция сильных литосферных землетрясений и вариаций потока энергичных частиц внутреннего радиационного пояса.

К составу комплексов бортовой научной аппаратуры, предназначенной для обнаружения предвестников землетрясений, выдвигается ряд основных требований:

- максимальная эффективность;
- габаритно-весовые характеристики и электромагнитная совместимость;
- учет требований по механическим, тепловым, электрическим и другим характеристикам, предъявляемых к научной аппаратуре малых космических аппаратов.

Рассмотрим возможности комплекса приборов МКА геофизического назначения.

1. Ионозонды. Одним из эффективных средств научной аппаратуры для решения задачи обнаружения предвестников сейсмической активности является ионозонд. Он проводит импульсное зондирование ионосферы, предоставляя оперативную информацию о ее состоянии, включая значение критической частоты f_0 слоя $F2$ ионосферы и электронной концентрации. Опыт применения таких приборов показывает возможность оперирования более чем 300 фиксированными частотами в диапазоне 0,3–15,95 МГц для высот от 400 до 1000 км [8].

2. Детекторы заряженных частиц. Основное назначение – регистрация протонов и электронов с энергиями в диапазонах 20 кэВ – 2 МэВ. Такие приборы широко использовались на низкоорбитальных и высокоапогейных космических аппаратах. На борту «Метеор-3М» прошел успешную проверку детектор МСГИ-5ЕИ для измерения дифференциальных спектров как электронной, так и ионной (протонной) компонент геоактивных корпускулярных излучений. В настоящее время подобные комплексы установлены на борту космических аппаратов «Метеор-М» № 1, № 2.

3. Радиомаяки. Такие приборы необходимы для радиотомографии ионосферы. Приемники могут работать, например, на частотах 150 и 400 МГц или 1,575 и 1,227 ГГц (частоты навигационных космических аппаратов). Метод радиотомографии дает возможность получать разрез плотности ионосферы по горизонтали и вертикали в масштабах на тысячи километров.

4. Волновые комплексы низкочастотного диапазона. Для регистрации аномалий в низкочастотном диапазоне необходимы приборы, которые позволят проводить изучение непрерывных шумовых сигналов, появляющихся в ионосфере перед землетрясением.

Для оценки изменений, происходящих в свойствах сигналов, оптимально использовать прибор, работающий в диапазоне от 10 Гц до 20 кГц, поскольку большинство экспериментальных данных соответствует этому частотному диапазону.

5. Радиометры. Обработка изображений, получаемых как в видимом, так и в ИК-диапазонах, позволяет выделить ряд предвестниковых факторов, таких как температурные аномалии, линейные облачные покровы и другие метеорологические предвестники. Примером может быть радиометр AVHRR, установленный на борту космических аппаратов семейства NOAA, и приборы типа МСУ космических аппаратов «Метеор-М» № 1, № 2 [2]. Также указанные явления фиксируются пассивными СВЧ-радиометрами типа МТВЗА, осуществляющими прием СВЧ-излучения с вертикальной и горизонтальной поляризацией с пространственным разрешением 20–100 км и полосой обзора 1100 м.

6. Масс-спектрометры. Масс-спектрометры позволяют проводить измерения ионизированной и нейтральной составляющих ионосферной плазмы. Необходима регистрация относительного содержания концентраций ионов основных компонент ионосферной плазмы в диапазоне масс 1–65 а.е.м. с разрешением 10–15 (на уровне 10 % высоты пика).

Выбор рационального состава целевой аппаратуры малых космических аппаратов. Для оценивания возможностей применения БНА МКА в интересах краткосрочного прогнозирования землетрясений прежде всего необходим выбор наиболее приоритетных источников спутниковой информации, для чего и предлагается следующий методический аппарат. Методика базируется на экспертном методе и методе парных сравнений с учетом «порогового принципа». В табл. 1 представлены основные источники предвестниковой информации [5].

Предлагаемая методика основывается на обработке данных по основным источникам предвестниковой информации, заполнении экспертами таблиц, исходя из трех критериев: актуальность предвестника, экономическая обоснованность и приборная реализуемость.

Для экспертного оценивания привлекались сотрудники ИКИ РАН, МИРЭА, АО «Российские космические системы», ИРЭ РАН с учетом их одинаковой компетентности ($M = 7$).

При получении парных сравнений объектов $A_i (i = \overline{1, n})$ используется метод анкетирования, предусматривающий заполнение каждым экспертом матриц с одинаковым числом строк и столбцов (табл. 2).

Таблица 1

Источники спутниковой информации

№ п/п	Предвестниковая информация
A_1	Вариации температуры поверхности Земли
A_2	Вертикальные профили температуры и влажности воздуха
A_3	Облачные аномалии
A_4	Аномальные потоки скрытой теплоты испарения
A_5	Ветры на высоте 9–12 км
A_6	Аномалии потока уходящего длинноволнового излучения OLR
A_7	Температура приповерхностного слоя воздуха

№ п/п	Предвестниковая информация
A_8	Концентрации, температуры ионов и электронов. Вертикальные профили электронной концентрации
A_9	Массовый состав и концентрация основных ионов
A_{10}	КНЧ- и ОНЧ-излучения, измеряемые бортовой научной аппаратурой
A_{11}	Квазипостоянные магнитные и электрические поля
A_{12}	Потоки высыпающихся частиц

Таблица 2

Обобщенный вид матрицы экспертного оценивания

Источники	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}
A_1	$a_{1,1}$	$a_{1,2}$	$a_{1,3}$	$a_{1,4}$	$a_{1,5}$	$a_{1,6}$	$a_{1,7}$	$a_{1,8}$	$a_{1,9}$	$a_{1,10}$	$a_{1,11}$	$a_{1,12}$
A_2	$a_{2,1}$	$a_{2,2}$	$a_{2,3}$	$a_{2,4}$	$a_{2,5}$	$a_{2,6}$	$a_{2,7}$	$a_{2,8}$	$a_{2,9}$	$a_{2,10}$	$a_{2,11}$	$a_{2,12}$
A_3	$a_{3,1}$	$a_{3,2}$	$a_{3,3}$	$a_{3,4}$	$a_{3,5}$	$a_{3,6}$	$a_{3,7}$	$a_{3,8}$	$a_{3,9}$	$a_{3,10}$	$a_{3,11}$	$a_{3,12}$
A_4	$a_{4,1}$	$a_{4,2}$	$a_{4,3}$	$a_{4,4}$	$a_{4,5}$	$a_{4,6}$	$a_{4,7}$	$a_{4,8}$	$a_{4,9}$	$a_{4,10}$	$a_{4,11}$	$a_{4,12}$
A_5	$a_{5,1}$	$a_{5,2}$	$a_{5,3}$	$a_{5,4}$	$a_{5,5}$	$a_{5,6}$	$a_{5,7}$	$a_{5,8}$	$a_{5,9}$	$a_{5,10}$	$a_{5,11}$	$a_{5,12}$
A_6	$a_{6,1}$	$a_{6,2}$	$a_{6,3}$	$a_{6,4}$	$a_{6,5}$	$a_{6,6}$	$a_{6,7}$	$a_{6,8}$	$a_{6,9}$	$a_{6,10}$	$a_{6,11}$	$a_{6,12}$
A_7	$a_{7,1}$	$a_{7,2}$	$a_{7,3}$	$a_{7,4}$	$a_{7,5}$	$a_{7,6}$	$a_{7,7}$	$a_{7,8}$	$a_{7,9}$	$a_{7,10}$	$a_{7,11}$	$a_{7,12}$
A_8	$a_{8,1}$	$a_{8,2}$	$a_{8,3}$	$a_{8,4}$	$a_{8,5}$	$a_{8,6}$	$a_{8,7}$	$a_{8,8}$	$a_{8,9}$	$a_{8,10}$	$a_{8,11}$	$a_{8,12}$
A_9	$a_{9,1}$	$a_{9,2}$	$a_{9,3}$	$a_{9,4}$	$a_{9,5}$	$a_{9,6}$	$a_{9,7}$	$a_{9,8}$	$a_{9,9}$	$a_{9,10}$	$a_{9,11}$	$a_{9,12}$
A_{10}	$a_{10,1}$	$a_{10,2}$	$a_{10,3}$	$a_{10,4}$	$a_{10,5}$	$a_{10,6}$	$a_{10,7}$	$a_{10,8}$	$a_{10,9}$	$a_{10,10}$	$a_{10,11}$	$a_{10,12}$
A_{11}	$a_{11,1}$	$a_{11,2}$	$a_{11,3}$	$a_{11,4}$	$a_{11,5}$	$a_{11,6}$	$a_{11,7}$	$a_{11,8}$	$a_{11,9}$	$a_{11,10}$	$a_{11,11}$	$a_{11,12}$
A_{12}	$a_{12,1}$	$a_{12,2}$	$a_{12,3}$	$a_{12,4}$	$a_{12,5}$	$a_{12,6}$	$a_{12,7}$	$a_{12,8}$	$a_{12,9}$	$a_{12,10}$	$a_{12,11}$	$a_{12,12}$

Значение элемента, стоящего на пересечении i -й строки и j -го столбца, определяется согласно правилу [9]

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, A_i < A_j \\ 1, A_i \sim A_j \\ 2, A_i > A_j \end{cases}$$

Метод вычисления весовых коэффициентов, в соответствии со значениями которых ранжируются объекты, представляет собой итерационную процедуру:

$$p^t = Ap^{t-1},$$

где $p^0 = (1, 1, \dots, 1)'$.

В процессе итерирования возможно получение больших весовых значений. Чтобы этого не произошло, компоненты вектора p^t на каждом шаге нормируются путем деления на сумму:

$$\lambda^t = \sum_i p_i^t = \sum_i \sum_j a_{ij} p_j^{t-1}.$$

С учетом нормирующего множителя процедура вычисления весовых коэффициентов записывается как

$$p^t = \frac{1}{\lambda^t} Ap^{t-1}.$$

Вычислительный процесс продолжается до момента, когда весовые коэффициенты, полученные на соседних итерациях, будут незначительно отличаться друг от друга, т. е.

$$\max |p_i^t - p_i^{t-1}| < \varepsilon,$$

где ε – достаточно малое положительное число, задающее точность расчетов.

Оценка приоритетности предвестниковой информации по каждому критерию проводилась отдельно.

Итоговая групповая оценка была получена усреднением значений индивидуальных оценок экспертов.

Для оценки значимости результатов экспертного оценивания использовалось ранжирование. Каждому значению параметров A_1, \dots, A_{12} присваивался ранг – порядковый номер, расположенный в порядке возрастания этих параметров.

Для определения тесноты связи между рангами параметров A_1, \dots, A_{12} определялся коэффициент конкордации. Поскольку ранги являются несвязными, то коэффициент конкордации будет определяться как [10]

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)},$$

где $m = 3$ – количество критериев; $n = 12$ – количество параметров A_1, \dots, A_{12} ; S – разность между суммой квадратов рангов и средним квадратом рангов, определяемая по формуле

$$S = \sum_m \left(\sum_j R_{ij} \right)^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{ij} \right)^2}{n},$$

где R_{ij} – ранг, присвоенный i -му значению j -го признака.

В результате расчетов $S = 823, W = 0,639$.

Значимость коэффициента конкордации оценивается по χ^2 -критерию Пирсона. Расчетное значение $\chi^2_{\text{расч}}$ при отсутствии связанных рангов определяется по формуле:

$$\chi^2_{\text{расч}} = \frac{12S}{mn(n+1)}.$$

Расчетное значение $\chi^2_{\text{расч}} = 21,1$ превышает табличное значение $\chi^2_{\text{табл}} = 19,675$ при заданном уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $\nu = n - 1 = 11$,

поэтому коэффициент конкордации признается значимым, что свидетельствует о сильной связи между оценками экспертов.

Применив относительное нормирование по максимальному значению, были получены показатели, которые характеризуют степень соответствия предвестниковой информации заданным критериям (табл. 3).

Выявление наиболее значимой предвестниковой информации проводилось по «пороговому принципу». Пороговое значение для A_i определялось с помощью средневзвешенного значения:

$$L = \frac{\sum_{i=1}^N C_i W_i V_i}{\sum_{i=1}^N W_i V_i},$$

где L – средневзвешенное значение («порог»); N – количество признаков; C_i – средняя арифметическая мнений экспертов по i -му признаку; V_i – «литературный вес» по каждому i -му признаку.

Для расчета «литературного веса» параметров A_1, \dots, A_{12} были проанализированы имеющиеся литературные источники (табл. 4):

$$W_i = \frac{C_i}{\max_i - \min_i},$$

где W_i – «практический вес», который отражает значимость A_i по мнению экспертов; \max_i, \min_i – значения мнений экспертов по A_i .

Нормированные параметры A_1, \dots, A_{12} и полученное пороговое значение $L = 0,92$ показаны на рисунке.

Как видно на рисунке, наибольшей значимостью при геофизическом мониторинге обладают параметры A_3, A_7, A_8, A_{10} . По результатам проведенного экспертного оценивания для обнаружения краткосрочных предвестников землетрясений целесообразно диагностировать выявленные параметры и иметь в составе БНА МКА приборы, фиксирующие:

- концентрацию, температуру ионов и электронов, вертикальные профили электронной концентрации;
- температуру приповерхностного слоя воздуха;
- КНЧ- и ОНЧ-излучения, измеряемые бортовой научной аппаратурой;
- облачные аномалии.

Таблица 3

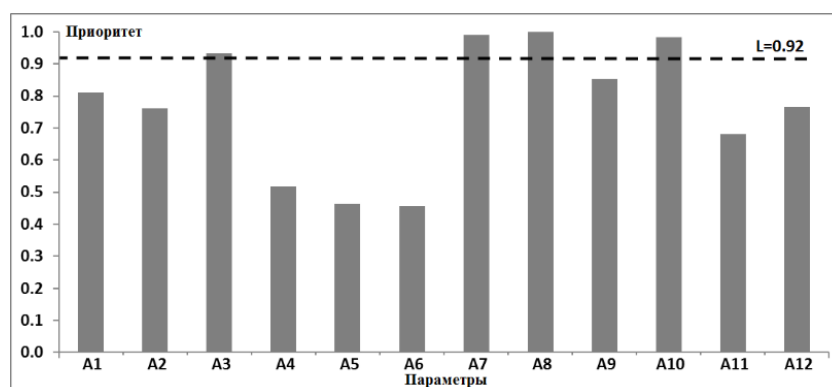
Результаты расчета показателей приоритета предвестниковой информации

A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}
0,81	0,76	0,93	0,52	0,46	0,46	0,99	1,00	0,85	0,98	0,68	0,77

Таблица 4

Результаты анализа литературных источников

№ п/п	Литературные источники, содержащие предвестниковую информацию	V
A_1	[5; 2; 11–14]	0,24
A_2	[3; 5; 11–13; 15–17]	0,32
A_3	[3; 5; 13]	0,12
A_4	[3; 5; 11; 12; 16]	0,20
A_5	[5]	0,04
A_6	[2; 3; 5; 8; 11; 14–16]	0,32
A_7	[5; 11–13; 15–17]	0,28
A_8	[3–5; 8; 11; 12; 16; 18–26]	0,64
A_9	[4; 5; 8; 11; 12; 18–20; 26]	0,36
A_{10}	[5; 8; 11; 17; 18; 22; 27; 28]	0,32
A_{11}	[3; 5; 8; 12; 16; 19; 22]	0,32
A_{12}	[5; 11; 18; 22; 29; 30]	0,24



Визуализация результатов селекции предвестниковой информации

Visualization of the results of selection of predictive information

Отметим, что в работе [31] предложенная методика использовалась с меньшим числом критериев, где наряду с параметрами A_3, A_7, A_8, A_{10} были выявлены A_9, A_{12} : массовый состав и концентрация основных ионов, а также потоки высыпавшихся частиц соответственно. Таким образом, приборы, регистрирующие параметры A_9, A_{12} , могут быть дополнительно установлены на МКА.

Заключение. Предложена методика выбора наиболее информативных спутниковых данных, получаемых бортовыми приборами, комплектация которых должна определяться исходя из технических характеристик МКА, состава орбитальной группировки и вышеприведенных требований. Основными приборами могут быть:

- приемник сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (двухчастотный, с темпом измерений не ниже 20 Гц, имеющий не менее 2-х антенн, ортогональных по оси X) для радиозатменного зондирования или Легмюровский зонд;

- камера ИК-диапазона с разрешением 15–250 м в полосе обзора до 700 км и разрешающей способностью не хуже 5 К;

- низкочастотный волновой комплекс для исследования непрерывных шумовых сигналов в ионосфере в частотном диапазоне от 20 Гц до 20 кГц.

Полученные результаты позволяют оценить оптимальный состав и технические характеристики бортовой научной аппаратуры МКА геофизического назначения и определить перспективы развития космической системы мониторинга сейсмической активности.

Дальнейшее повышение достоверности определения места, времени и интенсивности сейсмического события может быть достигнуто путем сочетания спутниковых данных с результатами наземных измерений [32; 33].

Библиографические ссылки

1. Комплексное определение рационального состава информационно-технических систем / В. О. Скрипачев [и др.] // *International Journal of Open Information Technologies*. 2017. Vol. 5, no.4. P. 7–11.
2. Tronin A. A. Satellite remote sensing in seismology. A review // *Remote Sens*. 2010. Vol. 2, No. 1. P. 124–150.
3. The First Results of the Pilot Project on Complex Diagnosing Earthquake Precursors on Sakhalin / S. A. Pulinets [et al.] // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2009. Vol. 49, No. 1. P. 115–123.
4. Akhoondzadeh M., Parrot M., Saradjian M. R. Electron and ion density variations before strong earthquakes ($M > 6.0$) using DEMETER and GPS data // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*. 2010. Vol. 10. P. 7–18.
5. Pulinets S., Boyarchuk K. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*. Springer, 2005. P. 285.
6. Hayakawa M., Molchanov O. A. Effect of Earthquakes on lower ionosphere as found by subionospheric VLF propagation // *Adv. Space Res*. 2000. Vol. 26, No. 8. P. 1273–1276.
7. Sidiropoulos N. F., Anagnostopoulos G., Rigas V. Comparative study on earthquake and ground based transmitter induced radiation belt electron precipitation at middle latitudes // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*. 2011. Vol. 11. P. 1901–1913.
8. Pulinets S. A. Strong Earthquakes Prediction Possibility With the Help of Topside Sounding From Satellites // *Adv. Space Res*. 1998. Vol. 21, No. 3. P. 455.
9. Давнис В. И., Тинякова В. В. Прогнозные модели экспертных предпочтений. Воронеж : Изд-во Воронежского гос. ун-та, 2005. 244 с.
10. Улитина Е. В., Леднева О. В., Жирнова О. Л. Статистика : учеб. пособие. 3-е изд. стереотип. М. : Московская финансово-промышленная академия, 2011. 312 с.
11. Pulinets S. A. Space technologies for short-term earthquake warning // *Advances in Space Research*. 2006. Vol. 37, No. 4. P. 643–652.
12. Thermal, atmospheric and ionospheric anomalies around the time of the Colima M7.8 earthquake of 21 January 2003 / S. A. Pulinets [et al.] // *Annales Geophysicae*. 2006. Vol. 24. P. 835–849.
13. Pulinets S. A., Morozova L. I., Yudin I. A. Synchronization of atmospheric indicators at the last stage of earthquake preparation cycle // *Research in Geophysics*. 2014. Vol. 4, No. 1. P. 45–50.
14. Thermal infrared anomalies associated with multi-year earthquakes in the Tibet region based on China's FY-2E satellite data / X. Lu [et al.] // *Advances in Space Research*. 2016. Vol. 58, No. 6. P. 989–1001.
15. Multiparameter monitoring of short-term earthquake precursors and its physical basis. Implementation in the Kamchatka region / S. A. Pulinets [et al.] // *E3S Web of Conferences*. 2016. Vol. 11, No. 00019.
16. Atmospheric and ionospheric coupling phenomena related to large earthquakes / M. Parrot [et al.] // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*. 2016. Discuss.
17. Earthquake precursor research: ground-satellite observations, laboratory experiments, and theoretical models. Preface / P. F. Biagi [et al.] // *Annals of geophysics*. 2012. Vol. 55. P. 1.
18. Parrot M. Use of satellites to detect seismo-electromagnetic effects // *Adv. Space Res*. 1995. Vol. 15. P. 11.
19. Ionospheric electromagnetic perturbations observed on DEMETER satellite before Chile M7.9 earthquake / X. Zhang [et al.] // *Earthquake Science*. 2009. Vol. 22, No. 3. P. 251–255.
20. Akhoondzadeh M., Saradjian M. K. Fusion of multi precursors earthquake parameters to estimate the date, magnitude and affected area of the forthcoming powerful earthquakes // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci*. 2012. Vol. XXXIX-B8. P. 1–6.
21. Seismo-Ionospheric Coupling Appearing as Equatorial Electron Density Enhancements Observed via DEMETER Electron Density Measurements / K. Ryu [et al.] // *J. Geophys. Res*. 2014. Vol. 119. P. 8524–8542.
22. Physical models of coupling in the lithosphere-atmosphere-ionosphere system before earthquakes / V. A. Liperovsky [et al.] // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2008. Vol. 48, No. 6. P. 795–806.
23. Seismo-ionospheric anomalies in total electron content of the GIM and electron density of DEMETER before the 27 February 2010 M8.8 Chile earthquake / Y. Y. Hoa [et al.] // *Advances in Space Research*. 2013. Vol. 51, No. 12. P. 2309–2315.

24. Seismo-ionospheric precursor of the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake observed by FORMOSAT-3/COSMIC / C. C. Hsiao [et al.] // *GPS Solutions*, 2010. Vol. 14, No. 1. P. 83–89.
25. Ionosphere anomaly before the Wenchuan MS8.0 earthquake detected by COSMIC occultation data / X. Ma [et al.] // *Acta Seismologica Sinica*. 2013. Vol. 35, No. 6. P. 848–855.
26. Variations of ionospheric plasma at different altitudes before the 2005 Sumatra Indonesia Ms 7.2 earthquake / J. Liu [et al.] // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2016. Vol. 121. P. 9179–9187.
27. Detection of ionospheric perturbations associated with Japanese earthquakes on the basis of reception of LF transmitter signals on the satellite DEMETER / F. Muto [et al.] // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2008. Vol. 8. P. 135–141.
28. VLF/LF signal studies of the ionospheric response to strong seismic activity in the Far Eastern region combining the DEMETER and ground-based observations / A. Rozhnoi [et al.] // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2015. Vol. 85–86. P. 141–149.
29. Fidani C., Battiston R., Burger W. J. A Study of the Correlation between Earthquakes and NOAA Satellite Energetic Particle Bursts // *Remote Sensing*. 2010. Vol. 2. P. 2170–2184.
30. A new method to study the time correlation between Van Allen Belt electrons and earthquakes / D. Tao [et al.] // *International Journal of Remote Sensing*. 2016. Vol. 37, No. 22. P. 5304–5319.
31. Capabilities evaluation of spaceborne scientific equipment for geophysical applications / I. Kaloshin [et al.] // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 102, No. 01024.
32. Blaunstein N. and Plohotniuc E. Ionosphere and Applied Aspects of Radio Communication and Radar. CRC Press, 2008. P. 600.
33. Peter W. B., Chevalier M. W., Inan U. S. Perturbations of midlatitude subionospheric VLF signals associated with lower ionospheric disturbances during major geomagnetic storms // *Journal of geophysical research*. 2006. Vol. 111, No. A03301.
5. Pulinets S., Boyarchuk K. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*. Berlin, Springer, 2005. 285 p.
6. Hayakawa M., Molchanov O. A. Effect of earthquakes on lower ionosphere as found by subionospheric VLF propagation. *Adv. Space Res.* 2000, Vol. 26, No. 8, P. 1273–1276.
7. Sidiropoulos N. F., Anagnostopoulos G., Rigas V. Comparative study on earthquake and ground based transmitter induced radiation belt electron precipitation at middle latitudes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011, Vol. 11, P. 1901–1913.
8. Pulinets S. A. Strong Earthquakes Prediction Possibility With the Help of Topside Sounding From Satellites. *Adv. Space Res.* 1998, Vol. 21, No. 3, P. 455.
9. Davnis V. I., Tinyakova V. V. *Prognoznyye modeli ekspertnykh predpochtenii* [Forecast models of expert preferences]. Voronezh, Publishing house of Voronezh State University, 2005, 244 p.
10. Ulitina E. V., Ledneva O. V., Zhirnova O. L. *Statistika: ucheb. posobie* [Statistics: tutorial]. Ed. E. V. Ulitina, 3rd ed. stereotype. Moscow, Moscow Financial and Industrial Academy Publ., 2011, 312 p.
11. Pulinets S. A. Space technologies for short-term earthquake warning. *Advances in Space Research*. 2006, Vol. 37, No. 4, P. 643–652.
12. Pulinets S. A., Ouzounov D., Ciraolo L., Singh R., Cervone G., Leyva A., Dunajacka M., Karelin A. V., Boyarchuk K. A., Kotsarenko A. Thermal, atmospheric and ionospheric anomalies around the time of the Colima M7.8 earthquake of 21 January 2003. *Annales Geophysicae*. 2006. Vol. 24, P. 835–849.
13. Pulinets S. A., Morozova L. I., Yudin I. A. Synchronization of atmospheric indicators at the last stage of earthquake preparation cycle. *Research in Geophysics*. 2014, Vol. 4, No. 1, P. 45–50.
14. Lu X., Meng Q. Y., Gu X. F., Zhang X. D., Xie T. and Geng F. Thermal infrared anomalies associated with multi-year earthquakes in the Tibet region based on China's FY-2E satellite data. *Advances in Space Research*. 2016, Vol. 58, No. 6, P. 989–1001.
15. Pulinets S. A., Ouzounov D., Davydenko D. and Petrukhin A. Multiparameter monitoring of short-term earthquake precursors and its physical basis. Implementation in the Kamchatka region. *E3S Web of Conferences*. 2016, Vol. 11, No. 00019.
16. Parrot M., Tramutoli V., Tiger J. Y., Liu S., Pulinets A., Ouzounov D., Genzano N., Lisi M., Hattori K., Namgaladze A. Atmospheric and ionospheric coupling phenomena related to large earthquakes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2016. Discuss.
17. Biagi P. F., Contadakis M. E., Hayakawa M. and Maggipinto T. Earthquake precursor research: ground-satellite observations, laboratory experiments, and theoretical models. Preface. *Annals of geophysics*. 2012, Vol. 55, P. 1.
18. Parrot M. Use of satellites to detect seismo-electromagnetic effects. *Adv. Space Res.* 1995, Vol. 15, P. 11.
19. Zhang X., Qian J., Ouyang X., Shen X., Cai J., Zhao S. Ionospheric electromagnetic perturbations observed on DEMETER satellite before Chile M7.9 earthquake. *Earthquake Science*. 2009, Vol. 22, No. 3, P. 251–255.

References

1. Skripachev V. O., Surovtseva I. V., Umnov V. O., Kaloshin I.B., Kharlamov A. G. [Complex determining the rational composition of design of information technical systems]. *International Journal of Open Information Technologies*. 2017, Vol. 5, No. 4, P. 7–11 (In Russ.).
2. Tronin A. A. Satellite remote sensing in seismology. A review. *Remote Sens.* 2010, Vol. 2, No. 1, P. 124–150.
3. Pulinets S. A., Romanov A. A., Urlichich Yu. M., Romanov A. A., Doda L. N., Ouzounov D. The First Results of the Pilot Project on Complex Diagnosing Earthquake Precursors on Sakhalin *Geomagnetism and Aeronomy*. 2009, Vol. 49, No. 1, P. 115–123.
4. Akhoondzadeh M., Parrot M. and Saradjian M. R. Electron and ion density variations before strong earthquakes ($M > 6.0$) using DEMETER and GPS data *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2010, Vol. 10, P. 7–18.

20. Akhoondzadeh M., Saradjian M. K. Fusion of multi precursors earthquake parameters to estimate the date, magnitude and affected area of the forthcoming powerful earthquakes. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2012, Vol. XXXIX-B8, P. 1–6.
21. Ryu K., Lee E., Chae J. S., Parrot M., Pulinets S. A. Seismo-Ionospheric Coupling Appearing as Equatorial Electron Density Enhancements Observed via DEMETER Electron Density Measurements. *J. Geophys. Res.* 2014, Vol. 119, P. 8524–8542.
22. Liperovsky V. A., Pokhotelov O. A., Meister C. V., Liperovskaya E. V. Physical models of coupling in the lithosphere-atmosphere-ionosphere system before earthquakes. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2008, Vol. 48, No. 6, P. 795–806.
23. Hoa Y. Y., Jhuanga H. K., Sua Y. C. and Liua J. Y. Seismo-ionospheric anomalies in total electron content of the GIM and electron density of DEMETER before the 27 February 2010 M8.8 Chile earthquake. *Advances in Space Research.* 2013, Vol. 51, No. 12, P. 2309–2315.
24. Hsiao C. C., Liu J. Y., Oyama K. Y., Yen N. L., Liou Y. A., Chen S. S., Miao J. J. Seismo-ionospheric precursor of the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake observed by FORMOSAT-3/COSMIC. *GPS Solutions.* 2010, Vol. 14, No. 1. P. 83–89.
25. Ma X., Lin Z., Chen H., Jin H., Li D., Jiao L. and Liu X. Ionosphere anomaly before the Wenchuan MS8.0 earthquake detected by COSMIC occultation data. *Acta Seismologica Sinica.* 2013, Vol. 35, No. 6, P. 848–855.
26. Liu J., Zhang X., Novikov V. and Shen X. Variations of ionospheric plasma at different altitudes before the 2005 Sumatra Indonesia Ms 7.2 earthquake. *J. Geophys. Res. Space Physics,* 2016, Vol. 121, P. 9179–9187.
27. Muto F., Yoshida M., Horie T., Hayakawa M., Parrot M. and Molchanov O. A. Detection of ionospheric perturbations associated with Japanese earthquakes on the basis of reception of LF transmitter signals on the satellite DEMETER. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2008, Vol. 8, P. 135–141.
28. Rozhnoi A., Solovieva M., Parrot M., Hayakawa M., Biagi P. F., Schwingenschuh K. and Fedun V. VLF/LF signal studies of the ionospheric response to strong seismic activity in the Far Eastern region combining the DEMETER and ground-based observations. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C.* 2015, Vol. 85–86, P. 141–149.
29. Fidani C., Battiston R., Burger W. J. A Study of the Correlation between Earthquakes and NOAA Satellite Energetic Particle Bursts. *Remote Sensing.* 2010, Vol. 2, P. 2170–2184.
30. Tao D., Battiston R., Vitale V., Burger W. J., Lazzizzera I., Cao O. and Shen X. A new method to study the time correlation between Van Allen Belt electrons and earthquakes. *International Journal of Remote Sensing.* 2016, Vol. 37, No. 22, P. 5304–5319.
31. Kaloshin I., Kuznetsov V., Skripachev V. and Surovceva I. Capabilities evaluation of spaceborne scientific equipment for geophysical applications. *MATEC Web of Conferences.* 2017, Vol. 102, No. 01024.
32. Blaunstein N., Plohotniuc E. Ionosphere and Applied Aspects of Radio Communication and Radar, *CRC Press.* 2008, 600 p.
33. Peter W. B., Chevalier M. W., Inan U. S. Perturbations of midlatitude subionospheric VLF signals associated with lower ionospheric disturbances during major geomagnetic storms. *Journal of geophysical research.* 2006, Vol. 111, No. A03301.