

**АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ,  
ПЛАНЕТ И ДРУГИХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.  
ГЕОЭКОЛОГИЯ И КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПОИСКА И СПАСАНИЯ**

УДК 550.3

**Космическая группировка прогнозного мониторинга  
как основа создания интегрированных систем  
предупреждения об угрозах стихийных бедствий**

**О. А. Алексеев<sup>1</sup>, Н. В. Разумова<sup>2</sup>, Е. И. Цадиковский, А. Д. Линьков**

<sup>1</sup>д. т. н., проф., <sup>2</sup>к. г. н.,  
АО «Российские космические системы»  
e-mail: igmass@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрены научно-методические и технико-экономические аспекты создания космической группировки прогнозного мониторинга чрезвычайных ситуаций природного и техногенного происхождения, в которой интегрируются информационные ресурсы развивающихся средств наблюдений широкого спектра действий и специализированных средств.

**Ключевые слова:** космическая группировка прогнозного мониторинга, чрезвычайные ситуации природного и техногенного происхождения

**Space Forecast's Monitoring Constellation  
as a Basis for Integrated Natural  
Disasters Warning Systems Creation**

**O. A. Alexeev<sup>1</sup>, N. V. Razumova<sup>2</sup>, E. I. Tsadikovsky, A. D. Linkov**

<sup>1</sup>doctor of engineering science, professor, <sup>2</sup>candidate of geographical science  
Joint Stock Company "Russian Space Systems"  
e-mail: igmass@mail.ru

**Abstract.** In the paper presented both methodological and technical-economic aspects of creation space constellation for forecast's monitoring of natural and manmade emergencies, which integrates informational resources of developing wide range space observation facilities and specialized infrastructure.

**Key words:** space constellation for forecast's monitoring, natural and man-caused emergencies

## Введение

Важным фактором снижения отрицательного влияния чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера на здоровье людей и окружающую среду является своевременное и точное прогнозирование этих ситуаций.

Возникновению ЧС природного и техногенного характера предшествуют определенные процессы, происходящие в земной коре, на поверхности, в атмосфере (ионосфере) Земли, околоземном космическом пространстве, на критически важных технических объектах, — предвестники ЧС.

Параметры предвестников ЧС природного и техногенного характера доступны наблюдению различными средствами наземного, воздушного и космического базирования. Состав и характеристики средств определяют полноту, своевременность и точность наблюдения параметров предвестников ЧС.

Особая роль в наблюдении предвестников ЧС принадлежит космическим системам. Производительность отдельного космического средства при высоте круговой орбиты 400–900 км (отношение площади наблюдаемой поверхности Земли на заданном временном интервале к площади элемента разрешения) приблизительно в тридцать раз выше производительности воздушного средства с аналогичными характеристиками и режимами работы целевой аппаратуры. Для тех же условий наблюдаемая космическим средством площадь поверхности Земли на четыре–пять порядков превосходит площадь поверхности, наблюдаемую воздушным средством. Поэтому космическая группировка прогнозного мониторинга (КГПМ) является основным элементом при решении задач глобального и оперативного мониторинга ЧС.

Следует отметить, что разрешающая способность при наблюдении воздушного средства (без учета турбулентности атмосферы Земли) на один–два порядка выше, чем при наблюдении космического средства, при одинаковых характеристиках целевой аппаратуры. Наземные средства способны наблюдать предвестники ЧС, не доступные космическим и воздушным средствам.

Вместе с тем повышение эффективности предупреждения об угрозах стихийных бедствий

(сильные землетрясения, лесные пожары и наводнения) и техногенных катастроф возможно только на пути рационального интегрирования информационных ресурсов средств различного базирования для наблюдения предвестников ЧС при определяющей роли космической группировки прогнозного мониторинга (КГПМ).

В статье рассматриваются научно-методические и технико-экономические аспекты создания КГПМ.

## Научно-методические аспекты создания КГПМ

Методология разработки КГПМ представляется в виде системы подходов, принципов, методов, правил и норм, обеспечивающих определение внешних и внутренних характеристик КГПМ в соответствии с выбранными критериями.

К внешним характеристикам КГПМ относятся цели КГПМ —  $\mathcal{U} = (u_i)$ ,  $i \in \overline{1, m_u}$ , решаемые ею задачи —  $\mathcal{Z} = (z_i)$ ,  $i \in \overline{1, m_z}$ , и показатели эффективности решения задач КГПМ —  $\mathcal{E}_{\text{кг}} = (e_{\text{кг}i})$ ,  $i \in \overline{1, m_{\text{экг}}}$ .

К внутренним характеристикам КГПМ относятся ее состав и структура —  $\mathcal{S} = (s_i)$ ,  $i \in \overline{1, m_s}$ , параметры —  $\mathcal{P} = (p_i)$ ,  $i \in \overline{1, m_p}$ , и состояния —  $\mathcal{X} = (x_i)$ ,  $i \in \overline{1, m_x}$ .

Обозначим внешние и внутренние характеристики КГПМ кортежами  $D_{\text{внеш}} = \langle \mathcal{U}, \mathcal{Z}, \mathcal{E} \rangle$ ,  $D_{\text{внутр}} = \langle \mathcal{S}, \mathcal{P}, \mathcal{X} \rangle$ .

Выбор внутренних характеристик КГПМ для определенных границ значений показателей ее эффективности производится в соответствии с заданными правилами сравнения вариантов КГПМ — критериями эффективности решения задач КГПМ —  $K_d = (\kappa_{dj}(\mathcal{E}_{\text{кг}}))$ ,  $j \in \overline{1, n_{kd}}$ ,

$$K_d: D_{\text{внеш}} \rightarrow D_{\text{внутр}}. \quad (1)$$

Исходные данные для решения задачи (1) формируются, опираясь на требуемые значения показателей эффективности прогнозов ЧС —  $\mathcal{E}_{\text{птр}} = (d_{\text{птр}i})$ ,  $i \in \overline{1, m_{\text{эп}}}$ , в результате информационного преобразования

$$\mathcal{E}_{\text{птр}} \rightarrow D_{\text{внеш}}, \quad (2)$$

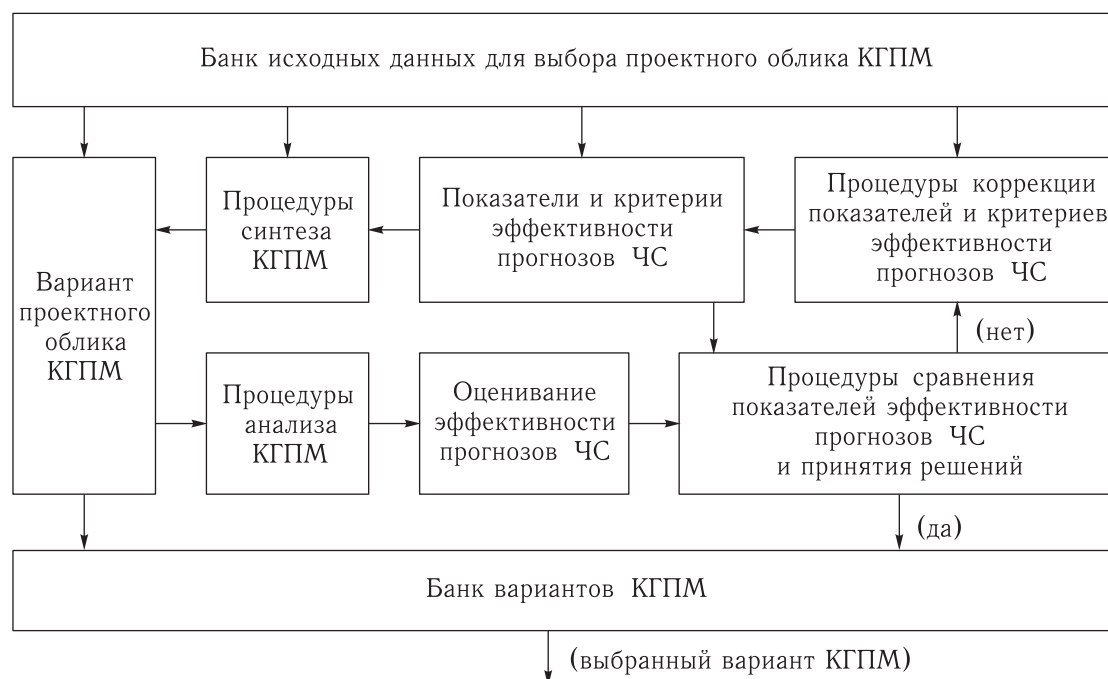


Рисунок. Методологическая схема разработки КГПМ

отражающего решение обратной по отношению к прямой задачи: оценку показателей эффективности прогнозов ЧС природного и техногенного происхождения  $\tilde{\mathcal{E}}_n = (\tilde{\mathcal{E}}_{ni})$ ,  $i \in \overline{1, m_{\text{эп}}}$ , при известных внутренних характеристиках КГПМ.

Решение прямой задачи отражает информационное преобразование

$$D_{\text{внутр}} \rightarrow \tilde{\mathcal{E}}_n. \quad (3)$$

Сущность методологии разработки КГПМ состоит в итерационном подходе, заключающемся (в рамках отдельной итерации) в синтезе структуры и оптимизации параметров КГПМ по заданным показателям эффективности прогнозов ЧС природного и техногенного происхождения, с последующим уточнением получаемых значений показателей эффективности прогнозов для выбранного варианта КГПМ в ходе его анализа. Условием окончания итерационного процесса является достижение заданной близости  $\|\tilde{\mathcal{E}}_n - \mathcal{E}_{\text{птр}}\|$  оценок показателей эффективности прогнозов для выбранного варианта КГПМ требуемым значениям при выполнении ограничений по времени, организационно-техническим и финансовым ресурсам решения задачи (рис. 1), где  $\|\cdot\|$  — определенная норма разности  $\tilde{\mathcal{E}}_n - \mathcal{E}_{\text{птр}}$ .

Решения обратной (2) и прямой (3) задач в рамках методологической схемы выбора проектного облика КГПМ сводятся к решению следующих частных (обратных и прямых) задач.

*Частные обратные задачи:*

а) выбор состава и определение граничных значений параметров ЧС —  $P = (n_i)$ ,  $i \in \overline{1, m_n}$ , выбор состава и определение требуемых значений показателей эффективности прогнозов ЧС —  $\mathcal{E}_{\text{птр}}(\tilde{P} - P)$ , где  $\tilde{P}$  — оценки параметров ЧС (прогнозы чрезвычайных ситуаций);

б) выбор состава и определение граничных значений параметров предвестников ЧС —  $B = (v_i)$ ,  $i \in \overline{1, m_b}$ , выбор состава и определение требуемых значений показателей эффективности наблюдения предвестников ЧС  $\mathcal{E}_{\text{втр}}(\tilde{B} - B)$ , ( $\tilde{B}$  — оценки параметров предвестников ЧС), обеспечивающих требуемые значения показателей эффективности прогнозов ЧС  $\mathcal{E}_{\text{птр}}$ ;

в) формирование целей  $\mathcal{C}$ , задач  $\mathcal{Z}$ , выбор состава и определение требований к показателям эффективности решения задач КГПМ  $\mathcal{E}_{\text{кгтр}}$ , обеспечивающих требуемые значения показателей эффективности наблюдения предвестников ЧС  $\mathcal{E}_{\text{втр}}$ , формирование критериев эффективности КГПМ  $K_d$ ;

г) синтез структуры  $S$  и оптимизация параметров  $P$  КГПМ, обеспечивающих требуемые значения показателей эффективности решения задач КГПМ  $\mathcal{E}_{\text{кгтр}}$ , с использованием критериев  $K_d$ .

*Частные прямые задачи:*

а) оценивание показателей эффективности решения задач КГПМ  $\tilde{\mathcal{E}}_{\text{кг}}^{(j)}$ ,  $j \in \overline{1, m_{\text{вар}}}$ , по выбранному варианту структуры  $S^{(j)}$  и рассчитанным значениям параметров  $P^{(j)}$  КГПМ в результате решения частной обратной задачи (г);

б) оценивание показателей эффективности наблюдения предвестников ЧС  $\tilde{\mathcal{E}}_{\text{в}}^{(j)}$ , соответствующих показателям эффективности  $\tilde{\mathcal{E}}_{\text{кг}}^{(j)}$  (для  $j$ -го варианта КГПМ), полученным в ходе решения частной обратной задачи (в);

в) оценивание показателей эффективности прогнозов ЧС  $\tilde{\mathcal{E}}_{\text{п}}^{(j)}$ , соответствующих показателям эффективности  $\tilde{\mathcal{E}}_{\text{в}}^{(j)}$  (для  $j$ -го варианта КГПМ), полученным в ходе решения частной обратной задачи (б);

г) сравнение оценок показателей эффективности прогнозов ЧС  $\tilde{\mathcal{E}}_{\text{п}}^{(j)}$  с требуемыми значениями  $\mathcal{E}_{\text{птр}}$  в соответствии с нормой  $\|\tilde{\mathcal{E}}_{\text{п}} - \mathcal{E}_{\text{птр}}\|$  и принятие решения о соответствии  $j$ -го варианта КГПМ требованиям по прогнозированию ЧС.

Исходя из перечисленных частных задач информационные преобразования (2) и (1), а также информационное преобразование (3) представим в следующем развернутом виде:

$$\mathcal{E}_{\text{птр}} \rightarrow \mathcal{E}_{\text{втр}} \rightarrow \mathcal{E}_{\text{кгтр}} \rightarrow \langle S, P \rangle; \quad (4)$$

$$\langle S, P \rangle \rightarrow \tilde{\mathcal{E}}_{\text{кг}} \rightarrow \tilde{\mathcal{E}}_{\text{в}} \rightarrow \tilde{\mathcal{E}}_{\text{п}}. \quad (5)$$

Основу информационных преобразований  $\langle S, P \rangle \rightarrow \mathcal{E}_{\text{кг}}$ ,  $\mathcal{E}_{\text{кгтр}} \rightarrow \langle S, P \rangle$  составляет *модель КГПМ*. В основе информационных преобразований  $\tilde{\mathcal{E}}_{\text{кг}} \rightarrow \tilde{\mathcal{E}}_{\text{в}}$ ,  $\mathcal{E}_{\text{втр}} \rightarrow \mathcal{E}_{\text{кгтр}}$  лежат *модели измерений и оценивания параметров предвестников ЧС средствами КГПМ*. Для получения информационных преобразований  $\tilde{\mathcal{E}}_{\text{в}} \rightarrow \tilde{\mathcal{E}}_{\text{п}}$ ,  $\mathcal{E}_{\text{птр}} \rightarrow \mathcal{E}_{\text{втр}}$  необходимы *модели процессов, описывающих возникновение ЧС*. В частности, для землетрясений весьма продуктивна имеющая междисциплинарный характер, развивающаяся и достигшая относительно недавно определенного

уровня полноты *комплексная модель взаимосвязей геоэффективных явлений в литосфере, атмосфере и ионосфере Земли* [1].

## Технико-экономические аспекты создания КГПМ

Задача выбора проектного облика КГПМ (информационные преобразования  $\langle S, P \rangle \rightarrow \tilde{\mathcal{E}}_{\text{кг}}$ ,  $\mathcal{E}_{\text{кгтр}} \rightarrow \langle S, P \rangle$ ) представляет собой совокупность четырех видов задач, обусловленных четырьмя видами прогнозируемых с использованием КГПМ чрезвычайных ситуаций: сильные землетрясения, наводнения, лесные пожары и ЧС техногенного происхождения.

Результаты решения задач выбора проектного облика КГПМ по каждому из четырех видов ЧС интегрируются для получения общего результата.

Решение частных задач определения и оценки внутренних характеристик КГПМ предполагает решение и интегрирование результатов решений таких составных частей этих задач, как определение и оценка орбитальной и наземной составляющих КГПМ, включая:

- распределение задач КГПМ между ее орбитальной и наземной составляющими;
- выбор состава КА группировки, распределение задач по каждому из четырех видов ЧС по КА;
- синтез орбитальной структуры КГПМ [2];
- выбор состава и определение характеристик бортовой целевой аппаратуры КА группировки (аппаратура мониторинга и передачи данных) и бортовой служебной аппаратуры с учетом характеристик платформ КА;
- распределение бортовой целевой аппаратуры по КА группировки;
- выбор состава и характеристик наземного комплекса приема, обработки и распространения (НКПОР) данных космического прогнозного мониторинга и наземного комплекса управления (НКУ) орбитальной группировкой КА;
- интеграцию информационных ресурсов орбитальных и наземных средств КГПМ при решении четырех видов задач прогнозного мониторинга.

Выбор проектного облика КГПМ должен учитывать следующее.

На КА орбитальной составляющей КГПМ предполагается размещать разнообразные типы целевой мониторинговой аппаратуры, предназначенной для сбора многочисленных информационных параметров. В частности, для решения только задачи краткосрочного сейсмопрогнозирования необходимо обеспечить комплексное использование целого ряда геофизических инструментов [1]:

- для измерения вертикального профиля концентрации электронного компонента ионосферы и его неоднородностей;

- для определения состава и измерения интенсивности потоков радиации различного происхождения;

- для измерения вариаций электрических и магнитных полей;

- для измерения параметров электромагнитных излучений (особенно в диапазонах УНЧ, ОНЧ и КНЧ).

Кроме того, целесообразно фиксировать сведения верхней атмосферы, аномальные повышения температуры подстилающей поверхности сейсмоопасных районов, концентрации радона и некоторых специфических металлизированных аэрозолей в нижней атмосфере, наблюдать выстраивание цепочек облаков вдоль известных разломов земной коры.

Для прогнозного мониторинга природных (лесных) пожаров и речных наводнений потребуются различные виды съемочной аппаратуры (оптико-электронной, радиометрической, микроволновой, радиолокационной, лидарной).

Контрольный мониторинг критически важных и потенциально опасных технических объектов для прогнозирования ЧС техногенного характера возможно обеспечить путем размещения на КА КГПМ радиотехнической аппаратуры, предназначенной для сбора (по радиоканалам) данных, поступающих с наземных датчиков, расположенных на этих объектах. Полученная таким образом контрольная информация оперативно передается на наземные информационно-аналитические центры заинтересованных ведомств.

Столь разнообразный и разнотипный состав бортовых целевых приборов затруднительно разместить на одном КА. Следовательно, в состав орбитальной составляющей КГПМ должен войти ряд КА, объединяемых в несколько отдельных ор-

битальных группировок (КА-кластеров). При этом каждая из таких группировок (хотя и в различной степени) может привлекаться к решению всех четырех прогнозно-контрольных задач КГПМ. Например, относительно маломассогабаритную аппаратуру сбора данных от сети измерительных средств критически важных технических объектов возможно разместить на большинстве КА КГПМ.

Ориентировочно число КА  $N$  в орбитальной группировке для заданных значений высот круговых орбит  $h$  с наклоном  $i$ , угла обзора  $\alpha$ , нижнего значения широты наблюдаемой области поверхности Земли  $\phi_n$  и периодичности обзора  $T_{обз}$  определим следующим образом:

$$N = \left\lceil (4\pi^2 R_3 \cos \phi_n \times \sin i \sqrt{(R_3 + h)^3 / \mu}) / 2h T_{обз} \operatorname{tg}(\alpha/2) \right\rceil, \quad (6)$$

где  $R_3$  и  $\mu$  — радиус сферической модели Земли и ее геоцентрическая гравитационная постоянная;

$\lceil \cdot \rceil$  — операция округления вверх до целого числа.

Определение параметров ряда предвестников ЧС, например, предвестников землетрясений в виде различных тепловых аномалий, приемлемо при периодичности обзора  $T_{обз} = 6$  ч. Тогда с учетом (6) наблюдение этих процессов на восходящей ветви орбиты начиная с широты  $\phi_n = 41^\circ$  при угле обзора  $\alpha = 60^\circ$  потребует от 17 до 9 КА на солнечно-синхронных орбитах с высотами 400–900 км. Уменьшение периодичности обзора до одного часа потребует для решения той же задачи от 100 до 50 КА. Наблюдения на восходящей и нисходящей ветвях орбиты позволяют уменьшить число КА в два раза.

Периодичность обзора  $T_{обз} = 1$  ч и меньше необходима для наблюдения предвестников землетрясений в виде вариаций полного электронного содержания ионосферы над эпицентрами землетрясений. Один из основных методов оперативного построения зависимости плотности электронной концентрации в ионосфере от пространственных координат и времени состоит в ее радиозондировании с использованием космических средств. Применение только низкоорбитальных КА для решения этой задачи может привести к не приемлемому по экономическим соображениям числу КА. В этом случае целесообразно комбинированное использование низкоорбитальных и наземных средств КГПМ, а также привлечение систем ГЛОНАСС и GPS.



Таким образом, орбитальный сегмент КГПМ должен состоять из КА следующих типов:

- перспективных специализированных КА для решения отдельных задач прогнозирования ЧС, например, мониторинга ионосферы с целью формирования краткосрочных прогнозов землетрясений;
- существующих и разрабатываемых КА гидрометеорологического и природно-ресурсного назначения, привлекаемых функционально для решения широкого круга задач прогнозирования ЧС.

Выбор видов космических платформ необходимо производить с учетом усиливающейся тенденции использования малых и сверхмалых КА для решения задач прогнозного мониторинга, а также нелинейного характера увеличения стоимости разработки КА при увеличении его массово-габаритных характеристик.

Наземный сегмент КГПМ в части НКПОР целесообразно разрабатывать на трех иерархических уровнях:

- верхний уровень — федеральный центр прогнозного мониторинга в структуре центрального аппарата Роскосмоса с функцией координации деятельности центров нижних уровней и ведения главного каталога продукции и услуг прогнозного мониторинга;
- средний уровень — региональные центры прогнозного мониторинга, категоризованные либо по территориально-административному критерию (с учетом степени риска ЧС природного и техногенного характера), либо исходя из отдельных задач прогнозного мониторинга;
- нижний уровень — пользовательские центры прогнозного мониторинга, обеспечивающие обслуживание ведомственных (МЧС, РАН, Минприроды и др.) и коммерческих категорий потребителей продуктов (сервисов) прогнозного мониторинга.

Окупаемость создания КГПМ с учетом дисконтирования может быть поэтапно обеспечена на основе гибкой инвестиционной политики, а также путем рационального использования технологического задела в области прогнозного мониторинга [3].

## Заключение

Создание перспективной космической группировки прогнозного мониторинга (КГПМ) чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного

происхождения как основы создания интегрированных систем предупреждения об угрозах стихийных бедствий состоит в комплексном решении широкого круга научно-методических, технико-экономических и других задач междисциплинарного характера. Конечной целью решения этих задач является выбор и реализация таких состава, структуры и параметров КГПМ, которые обеспечивают требуемые значения полноты, точности, достоверности и своевременности прогнозирования ЧС при фиксированных затратах на создание КГПМ.

Научно-методическая составляющая разработки КГПМ определяется установлением связей между характеристиками КГПМ и показателями эффективности прогнозирования ЧС.

Технико-экономическая составляющая разработки КГПМ основывается на установлении связей между ее внутренними и внешними характеристиками.

Перспективный орбитальный сегмент КГПМ представляется в виде кластеров специализированных КА для решения частных задач мониторинга отдельных предвестников ЧС и функционально привлекаемых группировок КА широкого назначения для решения большинства задач прогнозирования ЧС природного и техногенного характера.

Разработку наземного сегмента КГПМ в части НКПОР целесообразно вести на трех иерархических уровнях: федеральном, региональном и местном.

## Список литературы

1. Пулинец С.А., Узунов Д.П., Давиденко Д.В. и др. Прогноз землетрясений возможен?! Под ред. С. А. Пулинца. М.: Тривант, 2014. 144 с.
2. Меньшиков В.А., Перминов А.Н., Рембеза А.И., Урличич Ю.М. Основы анализа и проектирования космических систем мониторинга и прогнозирования природных и техногенных катастроф. М.: Машиностроение, 2014. 736 с.
3. Жодзишский А.И., Разумов В.В., Дудкин С.А. и др. Перспективы создания пилотной версии проекта «Международная аэрокосмическая система глобального мониторинга» в России. Под ред. О. А. Алексеева. М.: Тривант, 2014. 200 с.