

**Методика ранжирования космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с целью оперативного мониторинга чрезвычайных ситуаций**

**Проценко П.А.\*, Хуббиев Р.В.**

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,*

*ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия*

*\*e-mail: vka@mil.ru*

***Статья поступила 05.07.2021***

**Аннотация**

В статье рассмотрены вопросы ранжирования космических аппаратов оперативного мониторинга лесных пожаров с целью определения вклада каждого космического аппарата (КА) в решение задачи мониторинга для сосредоточения ресурсов комплекса управления на наиболее важных КА. Введен новый показатель вклада космических аппаратов в мониторинг наблюдаемого района, который показывает, о какой части района имеется актуальная информация. Разработана методика ранжирования КА дистанционного зондирования Земли, в которой ранжирование КА производится с учетом факта устаревания информации и нелинейности мониторинга района некоторой совокупностью космических аппаратов. Учет данных факторов позволяет выделить совокупность космических аппаратов, применение которых в значительной степени повышает эффективность мониторинга районов возникновения чрезвычайных ситуаций.

**Ключевые слова:** космический аппарат, космический мониторинг, эффективность, ранжирование космических аппаратов.

## Введение

Наиболее востребованным оперативным методом для защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера является космический мониторинг, осуществляемый орбитальной группировкой (ОГ) космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1-3]. Под космическим мониторингом природных и техногенных чрезвычайных ситуаций понимается система регламентированных периодических дистанционных наблюдений за состоянием природных и природно-технических систем и их пространственно-временными изменениями под влиянием природных и техногенных факторов, а также закономерностями развития чрезвычайных ситуаций с целью обнаружения критических ситуаций, прогноза и предотвращения или уменьшения негативных последствий их развития [4]. На сегодняшний день обнаружение ЧС, в частности лесных пожаров, происходит при помощи КА ДЗЗ, расположенных на круговых солнечно-синхронных орбитах со средними высотами 475-830 км («Ресурс-П», «Канопус-В», «Метеор-М») [5].

Для повышения качества и полноты геопро пространственной информации, получаемой при осуществлении космического мониторинга, в рамках Федеральной космической программы России на 2016-2025 годы предусмотрены мероприятия по дальнейшему развитию орбитальных и наземных средств ДЗЗ. При этом предусматривается к 2022-2023 годам доведение количества КА ДЗЗ в составе

орбитальной группировки до 20 [6]. Увеличение количества КА ДЗЗ и улучшение качества данных космического мониторинга приводит к значительному росту объемов информации, требующей обработки в ограниченное время [7]. Кроме этого, приходится затрачивать много времени на проведение процедуры атмосферной коррекции и выявление спектральных характеристик объектов по данным с КА [4]. При возникновении перегруженности центров приема, обработки и хранения геопространственной информации (ЦПОХ ГПИ) необходимо проводить ранжирование КА ДЗЗ с целью выделения на них большего ресурса для оперативной передачи наиболее полной информации.

Ранжирование КА ДЗЗ следует производить с целью выявления наиболее пригодных КА для решения поставленной задачи в данном временном диапазоне, что позволит сосредоточить усилия наземного комплекса управления для повышения качества получаемой информации.

В настоящее время ранжирование КА ДЗЗ осуществляется с использованием следующих показателей [8-14]:

– периодичность наблюдения объектов (время, затрачиваемое на получение, подготовку и доведение геопространственной информации заданного качества, объема и детальности (разрешения на местности));

– производительность съемки объектов (площадь отснятой КА ДЗЗ территории с учетом сброса космических снимков на ЦПОХ ГПИ).

– надежность КА ДЗЗ;

– детальность оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) (линейное разрешение ОЭА на местности);

- количество спектров (количество рабочих участков спектра);
- квантование (способ яркостных преобразований одиночного снимка);
- координатная привязка (точность координатной привязки снимка).

При ранжировании КА ДЗЗ авторами работ [8] были даны показатели, определяемые тактико-техническими характеристиками (ТТХ) КА ДЗЗ. Тактико-технические характеристики КА ДЗЗ являются постоянными величинами, заложенными при разработке КА ДЗЗ, при этом показателем качества удовлетворения ТТХ требованиям по обнаружению ЧС может служить вероятность обнаружения ЧС при условии попадания его в зону обзора КА ДЗЗ.

В работе [9-10] ранжирование КА осуществляется по показателям периодичности наблюдения и производительности съемки объектов. Предложенные показатели не учитывают вероятность обнаружения ЧС в заданных районах, а учитывают только периодичность обновления информации по какой-то части района.

Для оперативного реагирования на ЧС необходимо владеть обстановкой, которая развивается в наблюдаемом районе. Одним пролетом КА над районом невозможно полностью получить информацию о всех ЧС в районе из-за его большого размера, в связи с этим предлагается ввести показатель – доля наблюдаемого района, который будет показывать, о какой части района имеется актуальная информация. В данной статье предлагается рассмотреть подход к расчету нового показателя – доля наблюдаемого района, и выработать алгоритм ранжирования КА ДЗЗ по данному показателю.

## Методический подход к расчету вклада КА ДЗЗ в решение задачи наблюдения заданного района

Пусть известна  $p_{обнi}$  вероятность обнаружения ЧС при условии попадания его в зону обзора  $i$ -го КА ДЗЗ. В зависимости от ТТХ КА ДЗЗ вероятность обнаружения ЧС  $p_{обн}$  для каждого КА различна.

Одна и та же часть района в течение некоторого не продолжительного промежутка времени может наблюдаться  $k$  раз, при этом вероятность обнаружения ЧС следует рассчитывать по формуле [15-18]:

$$p_{обн}^k = 1 - \prod_{i \in \Omega_k} (1 - p_{обнi}),$$

где  $p_{обнj}$  – вероятность обнаружения ЧС при условии попадания его в зону обзора  $j$ -го КА;

$\Omega_k$  – множество КА ДЗЗ, наблюдаемых данную часть района. Мощность множества равно  $k$ .

Доля наблюдаемого района, зависит от наблюдаемой площади и вероятности обнаружения ЧС [15]:

$$D = \sum_{k=1}^K p_{обн}^k \frac{S_{nk}}{S},$$

где  $K$  – максимальное число наблюдений КА ДЗЗ некоторой части района;

$S_{nk}$  – площадь района, наблюдаемая  $k$  раз;

$S$  – общая площадь района.

За некоторый интервал времени реализуется картина покрытие заданного района. Пример картины покрытия представлен на рисунке 1, на которой 3 КА ДЗЗ

за некоторый интервал времени наблюдают часть заданного района, при этом в двух местах район наблюдается дважды.

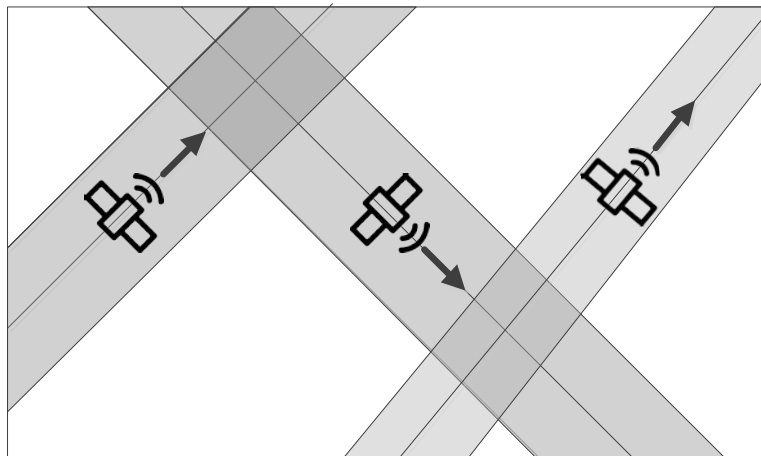


Рисунок 1. Пример наблюдение района космическими аппаратами ДЗЗ

Площади наблюдаемых частей района с высокой точностью вычислить достаточно сложно. В качестве района для наблюдения предлагается рассматривать сферический прямоугольник, задаваемый двумя широтами и двумя долготами в диапазоне которых он находится. Для оценивания доли наблюдаемого района необходимо представить район как некоторую совокупность его подрайонов. Примем допущение, что вся площадь подрайона наблюдается если центр подрайона находится в зоне радиовидимости КА, в противном случае подрайон не наблюдается. Точность результатов моделирования повышается при уменьшении размеров подрайонов, но увеличивается длительность расчетов.

Информация о состоянии дел в районе является актуальной только некоторый промежуток времени, так как чрезвычайная ситуация может возникнуть в районе в любой случайный момент времени. Примем допущение, что информация о районе

является актуальной в течение детерминированного промежутка времени  $\Delta\tau$ , т.е. для оценивания ситуации в районе на момент времени  $t$  учитываются только зоны радиовидимости КА ДЗЗ, расположенные во временном диапазоне  $[t-\Delta\tau; t]$ . Таким образом, доля наблюдаемого района является функцией времени и рассчитывается для каждого момента времени:

$$D = f(t) = \sum_{k=1}^K p_{обн}^k(t) \frac{S_{nk}(t)}{S}$$

Данная функция показывает в какой мере ситуация в районе наблюдаема в момент времени  $t$ .

Для оценивания вклада каждого КА ДЗЗ предлагается рассчитать среднюю арифметическую  $\bar{D}$  для доли  $D$  на всем интервале моделирования  $[0; T]$ :

$$\bar{D} = \frac{1}{T} \int_0^T D(t) dt.$$

Величина  $\bar{D}$  характеризует возможности ОГ КА ДЗЗ по наблюдению за чрезвычайной ситуацией в заданном районе. Для ранжирования КА необходимо оценить вклад каждого КА ДЗЗ в показатель  $\bar{D}$ .

Наблюдаемый район состоит из подрайонов. Пусть  $i$ -й подрайон наблюдается  $k$  раз, доля наблюдаемого подрайона рассчитывается по формуле:

$$D_i = p_{обн}^k \frac{S_{nk}}{S}$$

В наблюдении  $i$ -го подрайона участвует  $k$  КА ДЗЗ. Каждый из этих КА ДЗЗ вносит свой вклад в наблюдении  $i$ -го подрайона, рассчитываемый по формуле:

$$G_{ij} = \frac{D_i}{k}, i \in [1; I], j \in \Omega_i,$$

где  $G_{ij}$  – вклад  $j$ -го КА ДЗЗ в наблюдение  $i$ -го подрайона;

$D_i$  – доля  $i$ -го подрайона, распознанная КА ДЗЗ;

$\Omega_i$  – множество КА ДЗЗ, наблюдаемых  $i$ -й подрайон.

$I$  – число подрайонов в районе;

$j$  – номер КА ДЗЗ.

Так как доля наблюдаемого  $i$ -го района  $D_i$  является функцией времени, то и вклад  $j$ -го КА ДЗЗ в наблюдение  $i$ -го подрайона  $G_{ij}$  является функцией времени.

Рассчитаем среднее арифметическое  $\bar{G}_{ij}$  вклада  $G_{ij}$  по формуле:

$$\bar{G}_{ij} = \frac{1}{T} \int_0^T G_{ij}(t) dt$$

Вклад  $j$ -го КА ДЗЗ при наблюдении всего района рассчитывается как сумма всех весовых коэффициентов по следующей формуле:

$$\bar{G}_j = \sum_{i=1}^I \bar{G}_{ij},$$

где  $\bar{G}_j$  – средний вклад  $j$ -го КА ДЗЗ в наблюдение заданного района;

$\bar{G}_{ij}$  – средний вклад  $j$ -го КА ДЗЗ в наблюдение  $i$ -го подрайона;

$I$  – число подрайонов в районе.

В связи с тем, что средний вклад КА ДЗЗ рассчитывался по принципу участия каждого КА в решение задачи наблюдения, то сумма средних арифметических вкладов всех КА ДЗЗ равна средней арифметической доли наблюдения  $\bar{D}$ :

$$\bar{D} = \sum_{j=1}^J \bar{G}_j,$$



где  $J$  – общее число КА, участвующих в наблюдении за районом.

### Методика ранжирования КА ДЗЗ

Разработана методика ранжирования орбитальных систем КА ДЗЗ, в которой подход к расчету вклада КА ДЗЗ в решение задачи наблюдения заданного района расширен для оценивания вклада КА ДЗЗ в решение задачи наблюдения некоторой совокупности районов. Структурно-логическая схема данной методики представлена на рисунке 2.

Условно, предлагаемую методику можно разбить на 8 этапов.

На первом этапе осуществляется инициализация исходных данных, состоящих из:

– задание каждого района в виде сферического прямоугольника,

ограниченного параметрами:

$$(\psi_{\min l}; \psi_{\max l}; \lambda_{\min l}; \lambda_{\max l}), l = 1, \dots, L,$$

где  $\psi_{\min l}; \psi_{\max l}$  – минимальная и максимальная широта  $l$ -го района;

$\lambda_{\min l}; \lambda_{\max l}$  – минимальная и максимальная долгота  $l$ -го района.



Рисунок 2. Структурно-логическая схема методики ранжирования КА ДЗЗ

- задание шага дискретизации  $\Delta s$ , определяющего на какое число подрайонов будет разбит каждый район;
- задание времени устаревания информации  $\Delta \tau$  – времени в течение которого знание о ситуации в районе является актуальным;
- задание орбитальной группировки КА ДЗЗ как совокупности начальных условий движения  $X$  по каждому КА, параметров бортовой аппаратуры  $\gamma$  и вероятности обнаружения  $p_{\text{обн}}$  ЧС при условии попадания его в зону обзора КА ДЗЗ;
- задание временного интервала моделирования  $[0; T]$ .

На втором этапе производится разбиение каждого района на совокупность подрайонов с шагом дискретизации  $\Delta s$ . Предлагается равномерное разбиение районов на подрайоны с шагом по долготе и широте  $\Delta s$ .

На третьем этапе производится расчет зон радиовидимости подрайонов. В зависимости от технических характеристик аппаратуры ДЗЗ могут учитываться особенности построения зон радиовидимости и освещенность подрайонов. Подрайоны достаточно малы, чтобы считать, что если наблюдается центр подрайона, то виден и весь подрайон в целом.

В результате расчетов зон радиовидимости  $j$ -го КА  $l$ -го района  $i$ -го подрайона для каждого момента времени  $t$  формируется дискретная функция  $Z_{ji}(t)$ , такая что:

$$Z_{ji}(t) = \begin{cases} 0, & j\text{-й КА в не зоны радиовидимости } i\text{-го подрайона } l\text{-го района;} \\ 1, & j\text{-й КА в зоне радиовидимости } i\text{-го подрайона } l\text{-го района,} \end{cases}$$

$$t \in [0; T]; \quad j = 1, \dots, J; \quad i = 1, \dots, I_l; \quad l = 1, \dots, L.$$

На четвертом этапе рассчитывается дискретная функция  $F_{ji}(t)$ , которая учитывает наличие актуальной информации о  $l$ -м районе  $i$ -м подрайоне полученной от  $j$ -го КА ДЗЗ:

$$F_{ji}(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } Z_{ji}(\tau) = 0, \forall \tau \in [t - \Delta\tau; t]; \\ 1, & \text{если } Z_{ji}(\tau) = 1, \forall \tau \in [t - \Delta\tau; t]. \end{cases}$$

$$t \in [0; T]; \quad j = 1, \dots, J; \quad i = 1, \dots, I_l; \quad l = 1, \dots, L.$$

Предложенная функция использует время устаревания информации  $\Delta\tau$ , изменение которого позволяет учитывать скорость изменения ситуации в наблюдаемых районах.

На пятом этапе осуществляется расчет доли площади, распознанная КА ДЗЗ,  $D_{li}(t)$   $i$ -го подрайона  $l$ -го района на момент времени  $t$ :

$$D_{li}(t) = 1 - \prod_{j=1}^J (1 - p_{обн j} \cdot F_{jli}(t)),$$

$$t \in [0; T]; j = 1, \dots, J; i = 1, \dots, I_l; l = 1, \dots, L.$$

На шестом этапе осуществляется расчет вклада  $G_{jli}(t)$   $j$ -го КА ДЗЗ в наблюдение  $i$ -го подрайона  $l$ -го района на момент времени  $t$ :

$$G_{jli}(t) = \frac{D_{li}(t)}{\sum_{j=1}^J F_{jli}(t)} F_{jli}(t),$$

$$t \in [0; T]; j = 1, \dots, J; i = 1, \dots, I_l; l = 1, \dots, L.$$

На седьмом этапе осуществляется расчет вклада  $j$ -го КА ДЗЗ в наблюдение районов:

$$\bar{G}_j = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \sum_{i=0}^I \frac{1}{T} \int_0^T G_{jli}(t) dt,$$

$$t \in [0; T]; j = 1, \dots, J; i = 1, \dots, I_l; l = 1, \dots, L.$$

Данный показатель обладает свойством – сумма всех вкладов КА ДЗЗ равна средней доли всех районов, распознанной КА ДЗЗ,  $\bar{D}$ :

$$\bar{D} = \sum_{j=1}^J \bar{G}_j.$$

На восьмом этапе методики с использованием рассчитанных вкладов КА ДЗЗ в наблюдение районов производится ранжирование КА в порядке убывания вкладов  $\bar{G}_j$ . Таким образом методика позволяет оценить значимость каждого КА ДЗЗ в решение задачи наблюдения заданной совокупности районов.

### Пример реализации методики ранжирования КА ДЗЗ

На основе разработанной методики создан программный комплекс, позволяющий производить ранжирование КА ДЗЗ при наблюдении заданной совокупности районов. Для отработки методики проведено моделирование на интервале 10 суток с 1 по 11 мая 2021 года при следующих исходных данных:

1) ОГ КА ДЗЗ для оперативного мониторинга лесных пожаров, параметры которой представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры ОГ КА ДЗЗ

№	Название КА	Высота перигея	Высота апогея	Наклонение	Международный номер	Полоса обзора, км
1.	Канопус-В	501	505	97,50	2012-039А	880
2.	Канопус -V-ИК-2	505	508	97,40	2017-042А	880
3.	Канопус -V-ИК-3	505	509	97,40	2018-014А	880
4.	Канопус -V-ИК-4	500	509	97,40	2018-014В	880
5.	Канопус -V-ИК-5	503	511	97,50	2018-111А	880
6.	Канопус -V-ИК-6	498	511	97,50	2018-111В	880
7.	Метеор-М 2.2	812	815	98,50	2019-038А	900
8.	Метеор-М N-2	819	828	98,81	2014-037А	900
9.	Ресурс - P1	459	472	97,20	2013-030А	950
10.	Ресурс - P2	461	472	97,29	2014-087А	950
11.	Ресурс - P3	469	472	97,28	2016-016А	950

Параметры определяющие орбитальное расположение приведенной ОГ КА ДЗЗ использованы из каталога NORAD в формате tle [19-20]. Примем, что вероятность обнаружения ЧС, при попадании её в зону обзора составляет 0,7. КА ДЗЗ имеют оптико-электронную аппаратуру, способную вести наблюдение только в светлое время суток [21-23].

2) пожароопасные районы наблюдения заданы тремя районами: забайкальским лесостепным районом, дальневосточным лесостепным районом и карельским таежным районом в соответствии с Перечнем лесорастительных зон Российской Федерации и Перечнем лесных районов Российской Федерации. Каждый район определяется координатами, приведенными в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры пожароопасных районов

№	Название района	$\psi_{\min}$ , град	$\psi_{\max}$ , град	$\lambda_{\min}$ , град	$\lambda_{\max}$ , град
1.	Забайкальский лесостепной район	50	55	110	120
2.	Дальневосточный лесостепной район	50	53.5	126	138.5
3.	Карельский таежный район	61.7	64.5	30.6	34.5

3) время устаревание информации принято равным 12 часам.

По предложенным исходным данным произведены расчеты изменения доли наблюдаемых районов  $D$  от времени (рисунок 3) и ранжирования КА ДЗЗ (рисунок 4).

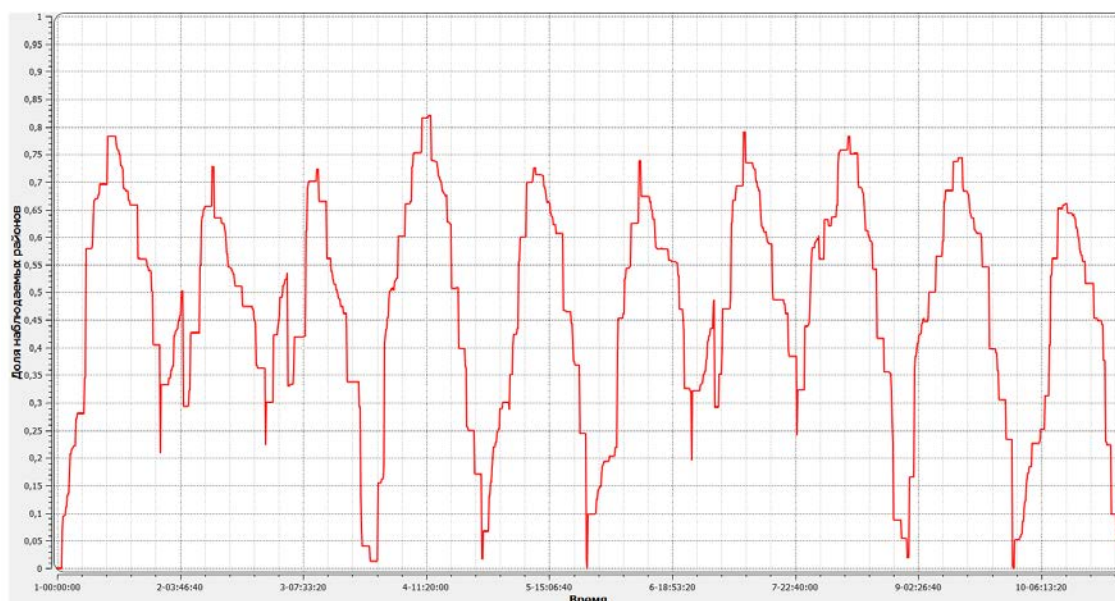


Рисунок 3. Изменение доли наблюдаемых районов  $D$  от времени

Результаты ранжирования КА ДЗЗ представлены на рисунке 4.

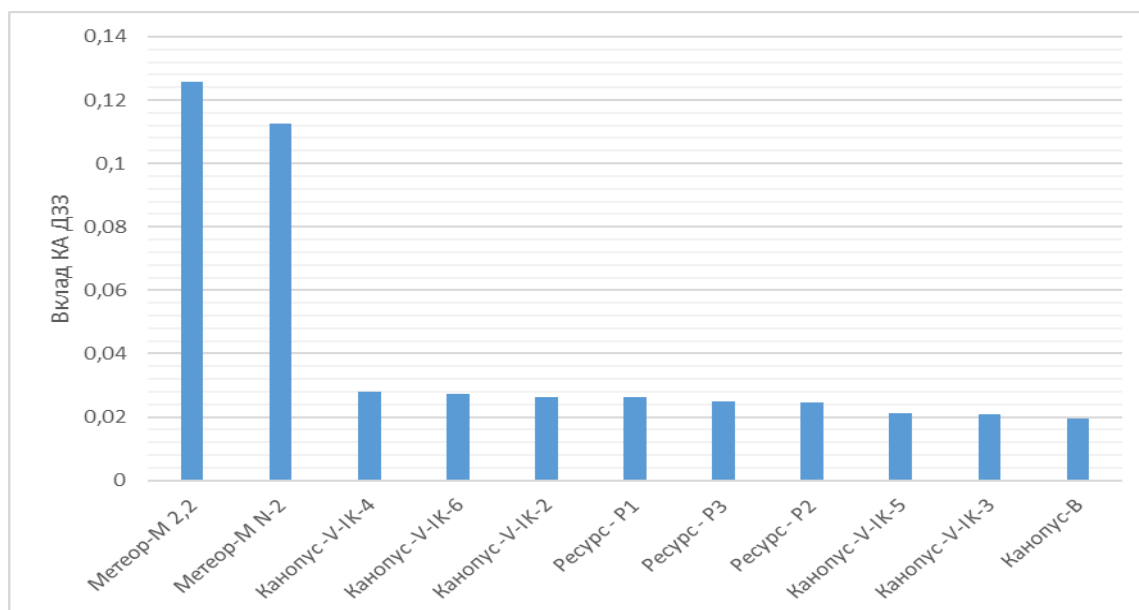


Рисунок 4. Ранжирование КА ДЗЗ

Средняя наблюдаемая доля всех районов составляет 0,4725. Более 55 % всей уникальной информации о районе получается с КА Метеор-М 2.2 и Метеор-М N-2.

Орбитальные системы Канопус и Ресурс в значительной степени получают информацию об обстановке в одних и тех же районах в близкие временные интервалы, что снижает её уникальность.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что КА Метеор-М 2.2 и Метеор-М N-2 лучше подходят для решения задачи наблюдения заданных районов, информация, получаемая от них своевременная и уникальная. Полученные выводы справедливы только на прогнозном интервале и могут быть использованы при распределении ресурсов наземного автоматизированного комплекса управления и планирования задействования целевой аппаратуры КА ДЗЗ.

Произведены расчеты числа наблюдений заданных районов на всем интервале моделирования. На основе полученных результатов КА проранжированы, результаты ранжирования представлены на рисунке 4.

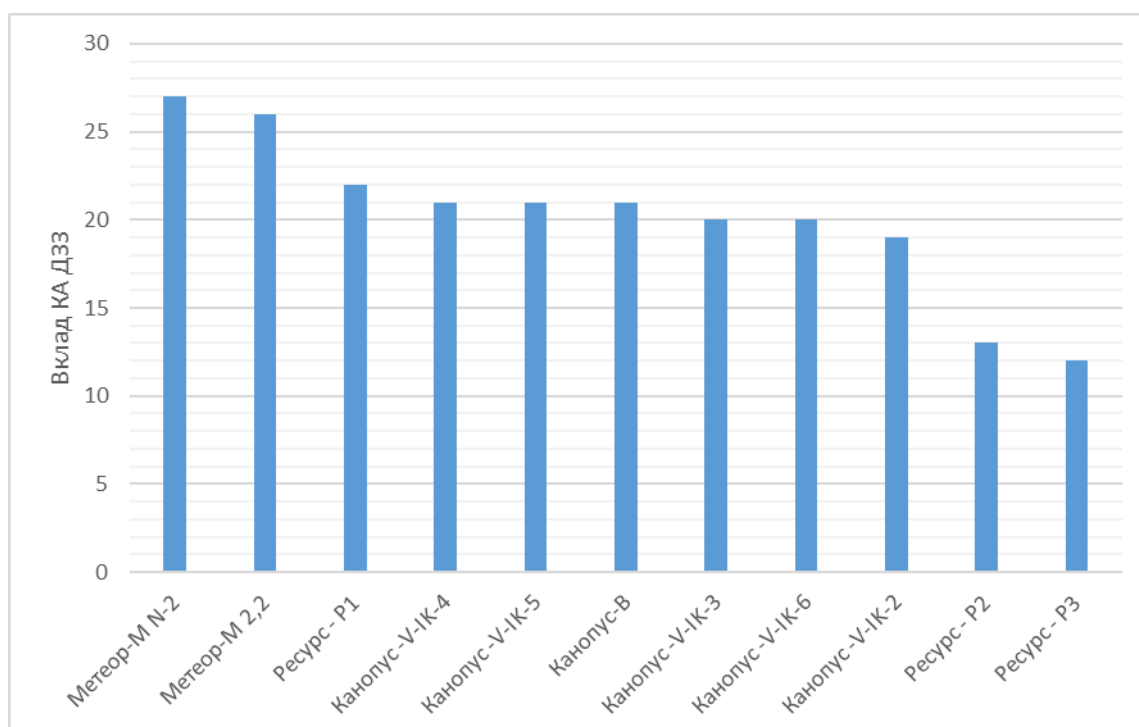


Рисунок 5 – Ранжирование КА ДЗЗ по числу наблюдений



Ранжирование, полученное с помощью разработанной методики, не полностью совпадает с ранжированием по частоте наблюдения. Разработанная методика позволила выявить два наиболее значимых КА (Метеор-М 2.2 и Метеор-М N-2) для проведения выбранной совокупности пожароопасных районов. Информация от этих КА не дублирует уже имеющуюся и поступает своевременно, т.е. в те интервалы времени, когда оперативной информации о районе нет.

### **Заключение**

Разработанный методический аппарат позволяет ранжировать КА с учетом их вклада в решение задачи наблюдения заданной совокупности районов. Отличительной особенностью данного подхода является одновременным учетом факта устаревания информации и нелинейности мониторинга района при его последовательном пролете некоторой совокупности КА ДЗЗ. Учет данных факторов позволяет выделить ту совокупность КА, применение которых в значительной степени повышает эффективности мониторинга районов возникновения чрезвычайных ситуаций. Представленная методика может быть использована для исследования возможностей и ранжирования как орбитальных группировок, состоящих из однотипных КА ДЗЗ, так и разнотипных.

**Библиографический список**

1. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2019 году». - М.: МЧС России. ФГБУ ВНИИ ГОЧС(ФЦ), 2020. - 259 с.
2. Железняков А.Б. За Арктикой из космоса (проект многоцелевой космической системы «Арктика») // Труды Второй международной научной конференции «Арктика: история и современность» (Санкт-Петербург, 19–20 апреля 2017). – СПб: Медиапаяир, 2017. С. 234 - 242.
3. Фалеев М.И., Горбунов С.В., Петелин С.А. Актуальные проблемы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций в рамках реализации государственной политики в области защиты населения и территорий // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2019. Т. 9. № 1 (16). С. 14 - 24.
4. Зверев А.Т., Фисенко Е.В. Теоретическая база и технологические решения космического мониторинга природных и техногенных чрезвычайных ситуаций // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 6. С. 50 - 53.
5. Ваганов А.А., Неелова О.Н., Онуфрей А.Ю. Модель орбитальной группировки сверхмалых космических аппаратов для мониторинга чрезвычайных ситуаций // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2019. № 666. С. 7 - 17.
6. Хайлов М.Н., Заичко В.А. Научно-технические проблемы сбора, хранения, обработки, распространения и применения космической геопространственной

информации в интересах российских потребителей // Дистанционное зондирование Земли из космоса в России. 2020. № 1. С. 6 - 15.

7. Бахтин А.А., Омелянчук Е.В., Семенова А.Ю. Анализ современных возможностей организации сверхвысокоскоростных спутниковых радиолиний // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85828>

8. Стратилатова Н.Н., Куренков В.И., Кучеров А.С., Егоров А.С. Методика сравнительной оценки эффективности космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с различными оптико-электронными телескопическими комплексами // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2016. Т. 15. № 2. С. 80 - 89. DOI: [10.18287/2412-7329-2016-15-2-80-89](https://doi.org/10.18287/2412-7329-2016-15-2-80-89)

9. Вышинский А.П., Зоц М.Н., Колесник А.В., Ортиков М.Ю. Методика расчета периодичности наблюдения районов с учетом детальности космической съемки // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2019. № 668. С. 137 - 144.

10. Емельянов А.А., Малышев В.В., Смольянинов Ю.А., Старков А.В. Формализация задачи оперативного планирования целевого функционирования разнотипных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85921>

11. Лохматкин В.В. Модели для оценки показателей интегральной производительности съемки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с учетом надежности на этапе электрических испытаний // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93348>

12. Усовик И.В., Дарнопых В.В. Автоматизированный программный комплекс для параметрического анализа и оптимизации планирования целевого функционирования космических систем дистанционного зондирования Земли // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35957>
13. Минаков Е.П., Воложинский А.О., Александров М.А. Карты оценивания прогнозной вероятности применения по областям на поверхности Земли и ранжирование космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2020. № 9. С. 168 - 177.
14. Ханцеверов Ф.Р., Остроухов В.В. Моделирование космических систем изучения природных ресурсов. - М: Машиностроение, 1989. – 264 с.
15. Вентцель Е.С. Введение в исследование операций. - М.: Советское радио, 1964. – 388 с.
16. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. - М.: Наука, 1988. - 480 с.
17. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. - М.: Наука, 1969. - 576 с.
18. Таха Х.А. Введение в исследование операций. - М.: Издательский дом "Вильямс", 2005. - 912 с.
19. Набор TLE для спутников. URL: <https://r4uab.ru/tle/>
20. NORAD Two-Line Element Sets Current Data Today from The Center for Space Standards & Innovation. URL: <https://www.celestrak.com/NORAD/elements/>
21. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. - М.: Логос, 2001. - 134 с.

22. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Методы и модели и методы обработки изображений. - М.: Техносфера, 2013. - 582 с.

23. Симакина Т.Е. Получение и обработка спутниковых снимков. - СПб: РГГМУ, 2010. - 127 с.

## **The methods of ranking the Earth remote sensing spacecraft to ensure the operational monitoring of emergencies**

**Protsenko P.A.\*, Khubbiyev R.V.**

*Mozhaisky Military Space Academy,*

*13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, 197198, Russia*

*\*e-mail: [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)*

### **Abstract**

The article discusses the issues of ranking operational monitoring spacecraft of forest fires in order to determine the contribution of each spacecraft to solving the problem of monitoring for focusing the resources of the control complex on the most important spacecraft.

For rapid response to emergencies is necessary to know the situation in the observed area. Since the area is large, it is impossible to fully reconnoiter it with one spacecraft flyby. In this regard, it is proposed to introduce a new criterion - the proportion of the observed area, showing which part of the area there is up-to-date information. Intelligent information about the area is relevant only for a certain period of time, since an emergency situation can arise in the area at any random moment in time. Let us assume that the information about the area is relevant for a deterministic period of time  $\Delta\tau$ , those to assess the situation in the area at time  $t$ , only the radio visibility zones of the Earth remote sensing spacecraft located in the time range  $[t - \Delta\tau; t]$  are taken into account.

Based on the proposed approach to assessing the observability of a given fire-dangerous area, the methods of ranking the Earth remote sensing spacecraft has been developed. The ranking of spacecraft is made taking into account the fact of information

obsolescence and the nonlinearity of the area monitoring by a variety of spacecraft. As result of a comparative analysis of existing ranking methods based on the frequency of observation of a given area, and the proposed methodology, the fact of consistency of the results was established. At the same time, the proposed methodology makes it possible to single out that set of spacecraft, the use of which significantly increases the efficiency of monitoring areas of emergencies.

The presented methods can be used to study the capabilities and ranking of both orbital constellations, consisting of the same type of Earth remote sensing spacecraft, and different types.

**Keywords:** spacecraft, space monitoring, efficiency, spacecraft ranking.

### References

1. *Gosudarstvennyi doklad «O sostoyanii zashchity naseleniya i territorii Rossiiskoi Federatsii ot chrezvychainykh situatsii prirodnogo i tekhnogenogo kharaktera v 2019 godu»* (State report "On the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2019"), Moscow, MChS Rossii, FGBU VNII GOChS(FTs), 2020, 259 p.
2. Zheleznyakov A.B. *Trudy Vtoroi mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Arktika: istoriya i sovremennost'»* (Proceedings of the Second International Scientific Conference «Arctic: history and modernity»), Saint Petersburg, Mediapapir, 2017, pp. 234 - 242.
3. Faleev M.I., Gorbunov S.V., Petelin S.A. *Strategiya grazhdanskoi zashchity: problemy i issledovaniya*, 2019, vol. 9, no. 1 (16), pp. 14 - 24.

4. Zverev A.T., Fisenko E.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos"emka*, 2013, no. 6, pp. 50 - 53.
5. Vaganov A.A., Neelova O.N., Onufrei A.Yu. *Trudy Voенно-kosmicheskoi akademii imeni A.F.Mozhaiskogo*, 2019, no. 666, pp. 7 - 17.
6. Khailov M.N., Zaichko V.A. *Distantcionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa v Rossii*, 2020, no. 1, pp. 6 - 15.
7. Bakhtin A.A., Omel'yanchuk E.V., Semenova A.Yu. *Trudy MAI*, 2017, no. 96. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=85828>
8. Stratilatova N.N., Kurenkov V.I., Kucherov A.S., Egorov A.S. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2016, vol. 15, no. 2, pp. 80 - 89. DOI: [10.18287/2412-7329-2016-15-2-80-89](https://doi.org/10.18287/2412-7329-2016-15-2-80-89)
9. Vyshinskii A.P., Zots M.N., Kolesnik A.V., Ortikov M.Yu. *Trudy Voенно-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo*, 2019, no. 668, pp. 137 - 144.
10. Emel'yanov A.A., Malyshev V.V., Smol'yaninov Yu.A., Starkov A.V. *Trudy MAI*, 2017, no. 96. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=85921>
11. Lokhmatkin V.V. *Trudy MAI*, 2018, no. 100. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=93348>
12. Usovik I.V., Darnopykh V.V. *Trudy MAI*, 2013, no. 65. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35957>
13. Minakov E.P., Volozhinskii A.O., Aleksandrov M.A. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2020, no. 9, pp. 168 - 177.



14. Khantseverov F.R., Ostroukhov V.V. *Modelirovanie kosmicheskikh sistem izucheniya prirodnikh resursov* (Simulation of space systems for the study of natural resources), Moscow, Mashinostroenie, 1989. 264 p.
15. Venttsel' E.S. *Vvedenie v issledovanie operatsii* (Introduction to Operations Research), Moscow, Sovetskoe radio, 1964, 388 p.
16. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya veroyatnosteni i ee inzhenernye prilozheniya* (Probability theory and its engineering applications), Moscow, Nauka, 1988, 480 p.
17. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnosteni* (Probability theory), Moscow, Nauka, 1969, 576 p.
18. Takha X.A. *Vvedenie v issledovanie operatsii* (Introduction to Operations Research), Moscow, Izdatel'skii dom "Vil'yams", 2005, 912 p.
19. *Nabor TLE dlya sputnikov*. URL: <https://r4uab.ru/tle/>
20. *NORAD Two-Line Element Sets Current Data Today from The Center for Space Standards & Innovation*. URL: <https://www.celestrak.com/NORAD/elements/>
21. Kashkin V.B., Sukhinin A.I. *Distantcionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa. Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii* (Remote sensing of the Earth from space. Digital imaging), Moscow, Logos, 2001, 134 p.
22. Shovengerdt R.A. *Distantcionnoe zondirovanie. Metody i modeli i metody obrabotki izobrazhenii* (Remote sensing. Image processing methods and models), Moscow, Tekhnosfera, 2013, 582 p.
23. Simakina T.E. *Poluchenie i obrabotka sputnikovykh snimkov* (Receiving and processing satellite images), Saint Petersburg, RGGMU, 2010, 127 p.

## **The methods of ranking the Earth remote sensing spacecraft to ensure the operational monitoring of emergencies**

**Protsenko P.A.\*, Khubbiyev R.V.**

*Mozhaisky Military Space Academy,*

*13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, 197198, Russia*

*\*e-mail: [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)*

### **Abstract**

The article discusses the issues of ranking operational monitoring spacecraft of forest fires in order to determine the contribution of each spacecraft to solving the problem of monitoring for focusing the resources of the control complex on the most important spacecraft.

For rapid response to emergencies is necessary to know the situation in the observed area. Since the area is large, it is impossible to fully reconnoiter it with one spacecraft flyby. In this regard, it is proposed to introduce a new criterion - the proportion of the observed area, showing which part of the area there is up-to-date information. Intelligent information about the area is relevant only for a certain period of time, since an emergency situation can arise in the area at any random moment in time. Let us assume that the information about the area is relevant for a deterministic period of time  $\Delta\tau$ , those to assess the situation in the area at time  $t$ , only the radio visibility zones of the Earth remote sensing spacecraft located in the time range  $[t - \Delta\tau; t]$  are taken into account.

Based on the proposed approach to assessing the observability of a given fire-dangerous area, the methods of ranking the Earth remote sensing spacecraft has been developed. The ranking of spacecraft is made taking into account the fact of information

obsolescence and the nonlinearity of the area monitoring by a variety of spacecraft. As result of a comparative analysis of existing ranking methods based on the frequency of observation of a given area, and the proposed methodology, the fact of consistency of the results was established. At the same time, the proposed methodology makes it possible to single out that set of spacecraft, the use of which significantly increases the efficiency of monitoring areas of emergencies.

The presented methods can be used to study the capabilities and ranking of both orbital constellations, consisting of the same type of Earth remote sensing spacecraft, and different types.

**Keywords:** spacecraft, space monitoring, efficiency, spacecraft ranking.

### References

1. *Gosudarstvennyi doklad «O sostoyanii zashchity naseleniya i territorii Rossiiskoi Federatsii ot chrezvychainykh situatsii prirodnogo i tekhnogenogo kharaktera v 2019 godu»* (State report "On the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2019"), Moscow, MChS Rossii, FGBU VNII GOChS(FTs), 2020, 259 p.
2. Zheleznyakov A.B. *Trudy Vtoroi mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Arktika: istoriya i sovremennost'»* (Proceedings of the Second International Scientific Conference «Arctic: history and modernity»), Saint Petersburg, Mediapapir, 2017, pp. 234 - 242.
3. Faleev M.I., Gorbunov S.V., Petelin S.A. *Strategiya grazhdanskoi zashchity: problemy i issledovaniya*, 2019, vol. 9, no. 1 (16), pp. 14 - 24.

4. Zverev A.T., Fisenko E.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos"emka*, 2013, no. 6, pp. 50 - 53.
5. Vaganov A.A., Neelova O.N., Onufrei A.Yu. *Trudy Voенно-kosmicheskoi akademii imeni A.F.Mozhaiskogo*, 2019, no. 666, pp. 7 - 17.
6. Khailov M.N., Zaichko V.A. *Distantcionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa v Rossii*, 2020, no. 1, pp. 6 - 15.
7. Bakhtin A.A., Omel'yanchuk E.V., Semenova A.Yu. *Trudy MAI*, 2017, no. 96. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=85828>
8. Stratilatova N.N., Kurenkov V.I., Kucherov A.S., Egorov A.S. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2016, vol. 15, no. 2, pp. 80 - 89. DOI: [10.18287/2412-7329-2016-15-2-80-89](https://doi.org/10.18287/2412-7329-2016-15-2-80-89)
9. Vyshinskii A.P., Zots M.N., Kolesnik A.V., Ortikov M.Yu. *Trudy Voенно-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo*, 2019, no. 668, pp. 137 - 144.
10. Emel'yanov A.A., Malyshev V.V., Smol'yaninov Yu.A., Starkov A.V. *Trudy MAI*, 2017, no. 96. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=85921>
11. Lokhmatkin V.V. *Trudy MAI*, 2018, no. 100. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=93348>
12. Usovik I.V., Darnopykh V.V. *Trudy MAI*, 2013, no. 65. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35957>
13. Minakov E.P., Volozhinskii A.O., Aleksandrov M.A. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2020, no. 9, pp. 168 - 177.

14. Khantseverov F.R., Ostroukhov V.V. *Modelirovanie kosmicheskikh sistem izucheniya prirodnikh resursov* (Simulation of space systems for the study of natural resources), Moscow, Mashinostroenie, 1989. 264 p.
15. Venttsel' E.S. *Vvedenie v issledovanie operatsii* (Introduction to Operations Research), Moscow, Sovetskoe radio, 1964, 388 p.
16. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya veroyatnostoni i ee inzhenernye prilozheniya* (Probability theory and its engineering applications), Moscow, Nauka, 1988, 480 p.
17. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostoni* (Probability theory), Moscow, Nauka, 1969, 576 p.
18. Takha X.A. *Vvedenie v issledovanie operatsii* (Introduction to Operations Research), Moscow, Izdatel'skii dom "Vil'yams", 2005, 912 p.
19. *Nabor TLE dlya sputnikov*. URL: <https://r4uab.ru/tle/>
20. *NORAD Two-Line Element Sets Current Data Today from The Center for Space Standards & Innovation*. URL: <https://www.celestrak.com/NORAD/elements/>
21. Kashkin V.B., Sukhinin A.I. *Distantstionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa. Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii* (Remote sensing of the Earth from space. Digital imaging), Moscow, Logos, 2001, 134 p.
22. Shovengerdt R.A. *Distantstionnoe zondirovanie. Metody i modeli i metody obrabotki izobrazhenii* (Remote sensing. Image processing methods and models), Moscow, Tekhnosfera, 2013, 582 p.
23. Simakina T.E. *Poluchenie i obrabotka sputnikovykh snimkov* (Receiving and processing satellite images), Saint Petersburg, RGGMU, 2010, 127 p.