

УДК 629.783:551.5

## МЕТОД РАСЧЕТА СОСТАВА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И ВЫСОТ ИХ ОРБИТ ДЛЯ РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

И. Ю. Ильина

Описывается метод расчета и выбора состава космических аппаратов, высот их орбит с целью создания космической системы раннего обнаружения лесных пожаров. Раннее обнаружение пожаров, пока их размеры относительно невелики, позволяет организовать пожаротушение с помощью мобильных малочисленных команд с минимумом технических средств. Для обеспечения оперативного детектирования возникающих лесных пожаров предлагается использовать космические аппараты с широкозахватным инфракрасным радиометром типа МСУ-ИК-СРМ, летные испытания которого были проведены на борту космического аппарата «Канопус-В-ИК». Учитывая необходимость выявления новых лесных пожаров в исключительно короткие сроки, не превышающие нескольких часов, перспективная космическая система раннего обнаружения лесных пожаров должна состоять из достаточно большого количества космических аппаратов. Возникает задача выбора и обоснования общего числа спутников в системе, их количества и распределения в отдельных плоскостях орбит, а также высот орбит. В данной работе дана постановка задачи, включающая формулировку целей, условий, требований, исходных данных и показателей эффективности для сравнения различных вариантов космической системы. Приведены принципы построения метода оптимизации состава и орбит космической системы раннего обнаружения лесных пожаров, включая все необходимые модели и схемы. Подробно описана вычислительная процедура для определения всех показателей эффективности. На ее основе выполнена большая программа расчетов вариантов космической системы раннего обнаружения лесных пожаров, включающих от 1-го до 20-ти спутников, функционирующих на солнечно-синхронных орбитах с высотами от 250 до 1000 км. Рассматривались группировки, в которых в каждой плоскости орбиты находилось от 1-го до 6-ти космических аппаратов. Результаты расчетов представлены в виде ряда графиков, удобных для использования на этапе проектирования перспективной космической системы раннего обнаружения лесных пожаров с целью выбора варианта, наиболее отвечающего требованиям организации-заказчика.

**Ключевые слова:** лесной пожар, раннее обнаружение, полоса захвата, пиксель, эквидистантная структура, средняя вероятность, среднее время, средняя площадь, векторная модель, угол визирования, репрезентативное подмножество.

В последние годы в нашей стране ежегодно возникает очень большое количество лесных пожаров (ЛП) на огромном пространстве лесов Сибири, а также на Урале и даже на севере Европейской территории России.

### 1. Цели, условия их достижения, исходные данные и требования

Целями настоящей статьи являются:

1. Разработка метода расчета состава спутников и высот круговых солнечно-синхронных орбит (ССО) для перспективной космической системы (КС), спутники которой оснащаются широкозахватными инфракрасными (ИК) радиометрами для раннего (оперативного) обнаружения лесных пожаров (РОЛП) на больших территориях;

2. Проведение расчетов различных вариантов КС РОЛП для отбора лучших из них и выработки рекомендаций по построению будущей космической системы.

Будут соблюдаться следующие условия, общие для всех вариантов КС РОЛП:

– все спутники конкретного варианта КС РОЛП функционируют на круговых ССО с одинаковыми высотой  $h$  и наклоном  $i$ ;

– на каждом КА находится один широкозахватный ИК-радиометр типа МСУ-ИК-СРМ, прошедший

летные испытания на космическом аппарате (КА) «Канопус-В-ИК» [1, 2];

– в соответствии с [2] ширина полосы захвата широкозахватного ИК-радиометра определяется максимальными углами визирования:

$$W_{\max} = \pm 59^\circ; \quad (1)$$

– полосу захвата образуют  $2N_{\text{pixel}}$  пикселей ( $N_{\text{pixel}}$  в каждую сторону от надир):

$$N_{\text{pixel}} \approx 2500; \quad (2)$$

– минимальная площадь  $\sigma(h)$  лесного пожара (ЛП), обнаружимого в надире с высоты  $h$ , задается следующим соотношением:

$$\sigma(h) = \sigma(510)h^2/510^2 = 25h^2/510^2, \quad (3)$$

где  $\sigma(510) = 25 \text{ м}^2$  – минимальная обнаружимая площадь ЛП в надире для радиометра МСУ-ИК-СРМ на высоте орбиты КА «Канопус-В-ИК», равной  $\sim 510 \text{ км}$  [1, 2];

– орбитальная структура космической системы, т. е. распределение ее спутников по плоскостям орбит является «эквидистантной» [4].

Рациональность применения «эквидистантных» структур для космических систем, состоящих из спутни-

ков с широкими полосами захвата и предназначенных для регулярного обзора больших территорий на поверхности Земли, обоснована в [4] и подтверждена в [3, 5].

«Эквидистантная» структура задается следующим образом [3]:

– спутники находятся в  $L$  плоскостях орбит по  $M_{ip}$  спутников в каждой, поэтому общее количество  $N_{sat}$  спутников в космической системе и параметры  $L$  и  $M_{ip}$  связаны между собой следующими равенствами:

$$N_{sat} = LM_{ip}, L = N_{sat}/M_{ip}; \quad (4)$$

– позиция  $j$ -го по очереди спутника при  $j = 1, 2, \dots, N_{sat}$  определяется по формулам:

$$\Delta\lambda_j = d\lambda((j-1) \operatorname{div} M_{ip}), \quad (5)$$

$$\Delta\tau_j = d\tau((j-1) \operatorname{div} M_{ip}) + ((j-1) \operatorname{mod} M_{ip}) 360/M_{ip}, \quad (6)$$

$\Delta\lambda_j$  – разность долгот восходящих узлов орбит от 1-го до  $j$ -го КА, град.;  $\Delta\tau_j$  – разность фаз (аргументов широты) от 1-го до  $j$ -го КА, град.;  $d\lambda$  – долготный сдвиг (для восходящих узлов соседних орбит), град.;  $d\tau$  – фазовый сдвиг (для первых спутников в соседних плоскостях орбит), град.;  $A \operatorname{div} B$  – операция получения целого частного при делении целого  $A$  на целое  $B$ ;  $A \operatorname{mod} B$  – операция получения целого остатка при делении целого  $A$  на целое  $B$ .

**Исходными данными**, задающими варианты КС РОЛП, служат:

- 1) число спутников  $N_{sat}$  в космической системе;
- 2) высота  $h$  солнечно-синхронной орбиты;
- 3) число  $M_{ip}$  спутников в каждой плоскости орбиты;
- 4) долготный сдвиг  $d\lambda$ ;
- 5) фазовый сдвиг  $d\tau$ .

**Требуется** выбрать и обосновать количество КА и высоту их солнечно-синхронных орбит для КС раннего обнаружения лесных пожаров, возникающих на лесной территории нашей страны в пределах от  $42^\circ$  до  $70^\circ$  северной широты.

Необходимо рассмотреть диапазон высот орбит  $250 \div 1000$  км.

Должны выявляться лесные пожары с площадью не менее  $S_{beg}$ , которая вычисляется по формуле (3) для минимальной высоты орбиты 250 км и равна

$$S_{beg} \approx 6 \text{ м}^2. \quad (7)$$

## 2. Показатели эффективности

Для сравнения и отбора лучших вариантов КС РОЛП будут применяться следующие показатели эффективности:

–  $V(T_{lim})$  – вероятность обнаружения ЛП за лимитируемый промежуток времени  $T_{lim}$ , прошедший с момента достижения начальной площади  $S_{beg}$ ; должны рассматриваться  $T_{lim} = 1 \div 5$  ч, перечисляемые с шагом 0,5 ч;

–  $V_{mid}$  – «средняя вероятность» обнаружения ЛП, вычисляемая по формуле

$$V_{mid} = \sum_{T_{lim}=1}^{T_{lim}=5} V(T_{lim}) / 9; \quad (8)$$

–  $T_{mid}$  – «среднее время» обнаружения ЛП, истекшее с момента достижения начальной площади  $S_{beg}$ , ч;

–  $S_{mid}$  – «средняя площадь» лесного пожара в момент его обнаружения,  $\text{м}^2$ .

Показатели  $V_{mid}$ ,  $T_{mid}$  и  $S_{mid}$  будут одновременно использоваться в процессе анализа различных вариантов построения КС РОЛП.

## 3. Площадь лесного пожара, обнаружимая с космического аппарата

Для синтеза метода расчета КС РОЛП нужно найти зависимость минимально обнаружимой площади ЛП от его положения на полосе захвата КА; исследовать вероятностный процесс детектирования возникшего лесного пожара на последовательности его случайных попаданий в разные места на полосах захвата спутников космической системы и с учетом роста площади лесного пожара во времени; разработать процедуру вычисления показателей эффективности.

В данном разделе выводятся формулы для расчета минимально обнаружимой площади лесного пожара, учитывая его позицию на полосе захвата КА.

На рис. 1 иллюстрируется, как изменяется под разными углами визирования  $w$  со спутника размер участка земной поверхности, соответствующего проекции пикселя на полосе захвата бортового ИК-радиометра.

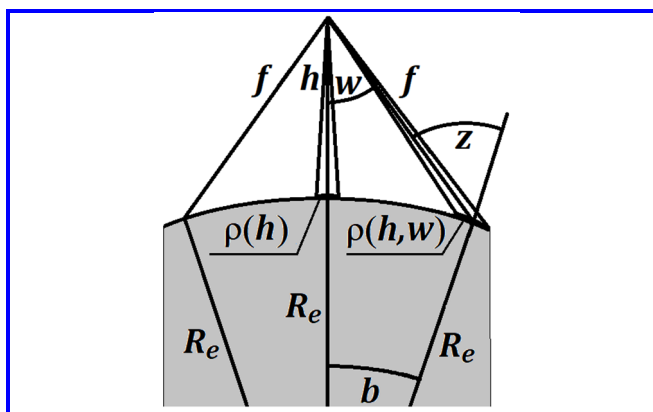


Рис. 1. Изменение проекции пикселя  $\rho(h, w)$  бортового ИК-радиометра в зависимости от угла визирования  $w$

Рис. 1 показывает, как площадь  $\rho(h)$  проекции пикселя в надире растет вместе с увеличением угла визирования  $w$ , достигая площади  $\rho(h, w)$ . Очевидно, такое увеличение пропорционально квадрату отношения «дальности»  $f$  к высоте орбиты  $h$  и обратно пропорционально косинусу зенитного угла  $z$ . Следовательно, коэффициент  $K(h, w)$  увеличения площади пикселя можно вычислить следующим образом:

$$K(h, w) = \rho(h, w) / \rho(h) = f^2 / (h^2 \cos z). \quad (9)$$

Начинаем вывод формул для определения  $z, f$  и  $b$ . Ввиду теоремы синусов,  $\sin w / R_e = \sin z / (R_e + h)$ .

Используя полученное равенство, находим

$$z = \sin^{-1}(\sin w (R_e + h) / R_e); \quad (10)$$

$$f = R_e \sin b / \sin w, \quad (11)$$

здесь  $R_e = 6371$  км – средний радиус Земли, а угол  $b$  равен:

$$b = z - w. \quad (12)$$

Подставляя в равенство (7) значения  $z, f$  и  $b$  из (10), (11) и (12), находим:

$$K(h, w) = R_e^2 \sin^2(z - w) / (\sin^2 w h^2 \cos z). \quad (13)$$

Естественно предположить, что излучение ЛП и фоновое излучение земной поверхности в месте его возникновения подчиняются закону Ламберта [6]. Это означает, что они не меняются в зависимости от направления. Следовательно, отношение минимально обнаружимой площади  $\sigma(h, w)$  лесного пожара под углом визирования  $w$  к его минимально обнаружимой площади  $\sigma(h)$  в надире равно отношению площади  $\rho(h, w)$  проекции пикселя на Земле к площади  $\rho(h)$  проекции пикселя в надире, т. е. коэффициенту  $K(h, w)$ , вычисленному по формуле (13):

$$\sigma(h, w) / \sigma(h) = K(h, w). \quad (14)$$

Учитывая равенства (14) и (13) и соотношение (3), окончательно получаем:

$$\sigma(h, w) = 25 R_e^2 \sin^2(z - w) / (510^2 \sin^2 w \cos z) \text{ м}^2. \quad (15)$$

Таким образом, минимально обнаружимая площадь  $\sigma(h, w)$  лесного пожара на высоте орбиты  $h$  при угле визирования  $w$  определяется по формулам (15) и (10). В частности, максимальная минимально

обнаружимая площадь  $\sigma_{\max}(h)$  на краю полосы захвата ИК-радиометра под максимальным углом визирования, заданным в условии (1), равна:

$$\sigma_{\max}(h) = 25 R_e^2 \sin^2(z_{\max} - w_{\max}) / (510^2 \sin^2 w_{\max} \cos z_{\max}) \text{ м}^2, \quad (16)$$

где

$$z_{\max} = \sin^{-1}(\sin w_{\max} (R_e + h) / R_e). \quad (17)$$

Необходимо отметить, что лесной пожар, достигший площади равной или большей  $\sigma_{\max}(h)$ , обнаруживается при попадании в любое место на полосе захвата бортового ИК-радиометра.

#### 4. Детектирование лесного пожара на последовательности наблюдений с космической системы раннего обнаружения лесных пожаров

Возникший лесной пожар (ЛП) динамично развивается и в некоторый момент достигает начальной обнаружимой площади  $S_{\text{beg}}$ , величина которой зафиксирована в (7). Далее этот ЛП может быть детектирован в какой-либо очередной момент на последовательности наблюдений с КС РОЛП, т. е. когда он попадает в полосы захвата спутников этой системы. Промежутки времени между моментами наблюдений являются перерывами обзора, имеющими разные длительности и вероятности (частоты) повторения. Состав перерывов обзора и их вероятности зависят от высоты орбит и структуры конкретного варианта КС РОЛП.

Учитывая сказанное, процесс детектирования ЛП с КС РОЛП носит вероятностный характер, проиллюстрированный на рис. 2.

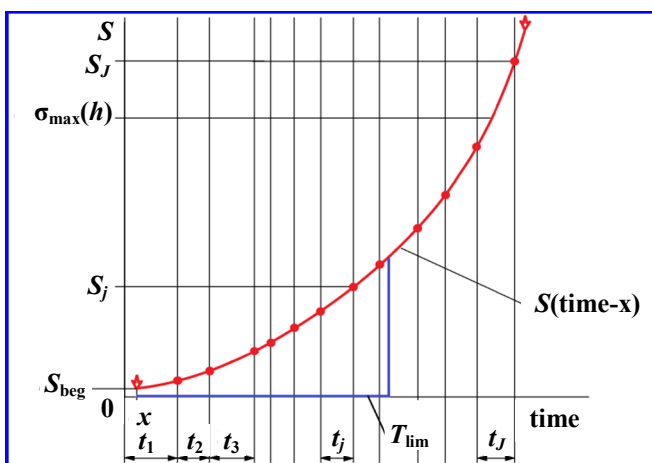


Рис. 2. Процесс детектирования лесного пожара на последовательности его попаданий в полосы захвата спутников космической системы раннего обнаружения лесных пожаров

По оси абсцисс на рис. 2 отсчитывается время  $t$  в ч, а по оси ординат – площадь  $S$  лесного пожара в  $m^2$ . Отмечены перерывы обзора  $t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_J$ . В некоторый момент  $x$  на 1-ом перерыве  $t_1$  площадь ЛП становится равной начальной обнаружимой площади  $S_{beg}$ . После этого ЛП может быть детектирован, например, в конце очередного перерыва  $t_j$ . Его площадь в этот момент обозначена через  $S_j$ . Завершение перерыва  $t_j$  может состояться или до истечения заданного лимитируемого времени  $T_{lim}$ , или после него.

«Красная» кривая линия  $S(\text{time}-x)$  изображает, как увеличивается площадь лесного пожара после достижения им площади  $S_{beg}$ . Маленькими кругами на этой линии выделены значения его площади в моменты окончания перерывов обзора. Например, видно, что в конце перерыва  $t_j$  она равна  $S_j$ .

### 5. Расчет показателей эффективности

Используя наглядную картину детектирования ЛП на рис. 2, можно вывести перечень формул, позволяющих, в конечном итоге, вычислить все показатели эффективности обнаружения ЛП для некоторой последовательности перерывов обзора.

С этой целью введем обозначение  $T_j$  для промежутка времени на рис. 2 от момента  $x$  на 1-м перерыве обзора  $t_1$ , в который растущая площадь развивающегося ЛП возросла до начального обнаружимого уровня  $S_{beg}$ , и до окончания  $j$ -го перерыва обзора  $t_j$ :

$$T_j = \left( \sum_{m=1}^{m=j} t_m \right) - x. \quad (18)$$

Для упрощения вводятся также краткое обозначение для процедуры расчета минимальной обнаружимой площади  $\sigma(h, w)$  по формулам (15) и (10):

$$\sigma(h, w) = \text{func}(h, w); \quad (19)$$

и краткое обозначение для зависимости роста площади  $S$  лесного пожара от времени  $T$ :

$$S = \text{square}(T). \quad (20)$$

Эту зависимость заимствуем из статьи [3]:

$$S = \text{square}(T) = S_{beg} + 1,32\sqrt{S_{beg}} V_{fr} T + 0,4356V_{fr}^2 T^2, \quad (21)$$

где  $V_{fr}$  – скорость перемещения фронта лесного пожара, принимающая следующие значения:

$$V_{fr} = 5 \div 100 \text{ м/ч с шагом перебора } 1 \text{ м/ч.} \quad (22)$$

Следовательно,

$$S_j = \text{square}(T_j) = S_{beg} + 1,32\sqrt{S_{beg}} V_{fr} T_j + 0,4356V_{fr}^2 T_j^2. \quad (23)$$

Лесной пожар с площадью  $S_j$  детектируется при выполнении следующего условия:

$$\sigma(h, w) \leq S_j, \quad (24)$$

выполняемого для всех углов визирования  $w$ , задаваемых неравенствами

$$0 \leq w \leq \text{func}^{-1}(h, S_j) \text{ при } S_j \leq \sigma_{\max}(h); \quad (25)$$

$$0 \leq w \leq w_{\max} \text{ при } S_j \geq \sigma_{\max}(h), \quad (26)$$

где  $\text{func}^{-1}$  – функция, обратная к функции  $\text{func}$  из (19).

По формулам (10) и (12) вычисляем угол  $b(h, w)$ , соответствующий на рис. 1 текущему углу визирования  $w$ , и максимальный угол  $b_{\max}(h)$  для максимального угла визирования  $w_{\max}$  на краю полосы захвата. Так как вероятность попадания лесного пожара (ЛП) в какой-либо пиксель под углом визирования  $w$  одна и та же для всех пикселей на этой полосе, то вероятность  $P_j$  обнаружения ЛП с площадью  $S_j$  в конце перерыва  $t_j$  равна:

$$P_j = b(h, w)/b_{\max}(h) \text{ при выполнении условия (25),} \quad (27)$$

$$P_j = 1 \text{ при выполнении условия (26).} \quad (28)$$

Используя (27) и (28), вычисляем вероятность  $F_j$  обнаружения ЛП именно в конце перерыва обзора  $t_j$ , т. е. если он не был обнаружен еще до  $j$ -го перерыва:

$$F_j = P_j \prod_{m=1}^{m=j-1} (1 - P_m). \quad (29)$$

По рис. 2 видно, что ЛП обязательно будет детектирован не позже конца  $J$ -го перерыва обзора  $t_J$ , который наступает после или непосредственно в момент достижения лесным пожаром максимальной обнаружимой площади  $\sigma_{\max}(h)$  на краю полосы захвата.

Теперь можно определить каждую из 9-ти вероятностей  $V(T_{lim})$  обнаружения ЛП за лимитируемое время  $T_{lim}$  из интервала  $1 \div 5$  ч, перебираемые с интервалом в 0,5 ч:

$$V(T_{lim}) = \sum_{m=1}^{m=j} F_m \text{ при } T_j \leq T_{lim} \leq T_{j+1}. \quad (30)$$

Используя полученные значения  $V(T_{lim})$ , по формуле (8) вычисляется «средняя вероятность»  $V_{mid}$  обнаружения лесного пожара.

Одновременно (и независимо от всех  $V(T_{lim})$ ) рассчитываются два остальных показателя эффективности:

«среднее время» обнаружения ЛП

$$T_{mid} = \sum_{j=1}^{j=J} T_j F_j \quad (31)$$

и «средняя площадь» ЛП в момент его обнаружения

$$S_{mid} = \sum_{j=1}^{j=J} S_j F_j = \sum_{j=1}^{j=J} \text{square}(T_j) F_j. \quad (32)$$

### 6. Упрощенная процедура расчета показателей эффективности

Обнаружение ЛП носит дискретный характер, так как, согласно условию (2), он детектируется, попадая в какой-нибудь один из пикселей с номерами  $n = 1, 2, 3, \dots, N_{pixel}$ , перечисляемых вправо и влево от надира. Учитывая эту дискретность, можно существенно упростить и ускорить процедуру расчета показателей эффективности по формулам из предыдущего раздела.

Введем угол  $\delta$ , под которым виден один пиксель. Он определяется следующим образом:

$$\delta = w_{max}/N_{pixel}, \quad (33)$$

а центры пикселей соответствуют следующим углам визирования:

$$0,5 \delta; 1,5 \delta; \dots; (n - 0,5)\delta; (n + 0,5)\delta; \dots; (N_{pixel} - 0,5)\delta. \quad (34)$$

Для вычисления минимально обнаружимой площади лесного пожара в центре пикселя с номером  $n$  нужно формулу (19) конкретизировать следующим образом:

$$\sigma(h, n) = \sigma(h, (n - 0,5)\delta) = \text{func}(h, (n - 0,5)\delta), \quad (35)$$

где функция  $\text{func}$  эквивалентна паре формул (15) и (10), а минимально обнаружимая площадь  $\sigma_{max}(h)$  лесного пожара на пикселе с наибольшим номером  $N_{pixel}$  теперь равна:

$$\sigma_{max}(h) = \sigma(h, N_{pixel}) = \text{func}(h, (N_{pixel} - 0,5)\delta). \quad (36)$$

Функция  $\sigma(h, n)$ , рассчитываемая по формуле (35), принимает конечное число растущих значений, перечисляемых по номерам пикселей:

$$\sigma(h, 1), \sigma(h, 2), \dots, \sigma(h, n), \dots, \sigma(h, N_{pixel} - 1), \sigma(h, N_{pixel}) = \sigma_{max}(h). \quad (37)$$

Параллельно по формулам (10) и (12) вычисляется ряд центральных углов  $b(h, n)$ :

$$b(h, 1), b(h, 2), \dots, b(h, n), \dots, b(h, N_{pixel} - 1), b(h, N_{pixel}) = b_{max}(h). \quad (38)$$

По набору значений (37) удобно находить пиксель с наибольшим номером  $n$ , при котором еще обнаруживается лесной пожар с площадью  $S_j$  в конце перерыва обзора  $t_j$ . Эта площадь вычисляется по формуле (23), подставляя в нее  $T_j$  из (18). Наибольший номер  $n$  должен удовлетворять следующему условию:

$$\sigma(h, n) \leq S_j < \sigma(h, n + 1), \text{ если } S_j < \sigma_{max}(h), \\ \text{и } n = N_{pixel}, \text{ если } S_j \geq \sigma_{max}(h). \quad (39)$$

По найденному наибольшему номеру  $n$  пикселя определяется соответствующий ему угол  $b(h, n)$  в наборе (38), а затем по формулам (27) и (28) вычисляется вероятность  $P_j$  обнаружения лесного пожара в момент окончания перерыва обзора  $t_j$ :

$$P_j = b(h, n)/b_{max}(h). \quad (40)$$

Вслед за этим, проводя расчеты по формулам (29) – (32) и (8), определяются все показатели эффективности, используя которые будут сравниваться варианты КС РОЛП.

Итак, упрощенная процедура расчета показателей эффективности сводится к следующим операциям:

А. Перед началом расчетов по очередному варианту КС РОЛП вычисляются, используя формулы (35), (19), (10) и (15), минимально обнаружимые площади  $\sigma(h, n)$  лесных пожаров на пикселях с номерами  $n = 1, 2, 3, \dots, N_{pixel}$ , включая  $\sigma_{max}(h)$ , которые образуют ряд (37); параллельно по формулам (10) и (12) вычисляются все значения  $b(h, n)$ , включая  $b_{max}(h)$ , образующие ряд (38).

Б. В момент окончания очередного перерыва обзора  $t_j$  (из последовательности перерывов обзора  $t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_j$  на рис. 2 определяются:

- по формуле (18) вычисляется промежуток времени  $T_j$  (на рис. 2) от момента  $x$  на 1-м перерыве обзора  $t_1$  до окончания  $j$ -го перерыва обзора  $t_j$ ;
- по формуле (23) вычисляется площадь лесного пожара  $S_j$  в момент времени  $T_j$ ;
- по условию (39) из ряда (37) выбирается номер  $n$ ;
- по найденному номеру  $n$  находится соответствующий ему угол  $b(h, n)$  в ряду (38);

– по формуле (40) вычисляется вероятность  $P_j$  обнаружения ЛП в момент окончания перерыва обзора  $t_j$ ;

– по формуле (29) вычисляется вероятность  $F_j$  обнаружения ЛП именно в конце перерыва обзора  $t_j$ , если он не был обнаружен еще до  $j$ -го перерыва.

В. Завершив вычисления для всех перерывов обзора из последовательности  $t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_j$ , определяются все показатели эффективности (для данной последовательности):

– по формуле (30) вычисляются все вероятности  $V(T_{\text{lim}})$  обнаружения ЛП за лимитируемые времена  $T_{\text{lim}}$ ;

– по формуле (8) вычисляется «средняя вероятность»  $V_{\text{mid}}$  обнаружения ЛП;

– по формуле (31) вычисляется «среднее время»  $T_{\text{mid}}$  обнаружения ЛП;

– по формуле (32) вычисляется «средняя площадь»  $S_{\text{mid}}$  лесного пожара в момент его определения.

**Резюме:** в данном разделе используется дискретный характер обнаружения лесного пожара, выявляемого при его попадании в какой-либо один пиксель из их ограниченного количества (на полосе захвата бортового ИК-радиометра). В результате отпадает необходимость многократного и трудоемкого итерационного расчета обратной функции  $\text{func}^{-1}$ . Выбор наибольшего номера пикселя, на котором детектируется лесной пожар, реализуется, учитывая дискретность, просто по конечному набору (37) минимально обнаружимых площадей лесного пожара, используя условие (39). Это существенно упрощает и ускоряет процедуру расчета показателей эффективности, изложенную в предыдущем разделе, так как для фиксированной высоты орбиты  $h$  наборы (37) и (38) вычисляются всего лишь один раз.

## 7. Расчет полного состава последовательностей перерывов обзора

Процесс детектирования лесного пожара (ЛП) на рис. 2 изображен только для одной из возможных последовательностей моментов наблюдения возникшего ЛП со спутников КС РОЛП. В реальности на пространстве лесов нашей страны возникает, как правило, очень большой набор таких последовательностей, в которых чередуются с разными вероятностями (частотами) различные по длительности перерывы обзора.

Следовательно, во-первых, нужен алгоритм для определения полного набора перерывов обзора вместе с частотами их повторения и, во-вторых, требуется повторять процедуру расчета показателей эффективности КС РОЛП, изложенную в предыдущем разделе, для всех найденных с помощью этого алго-

ритма последовательностей, причем с учетом и длительностей, и частот их перерывов обзора. Затем нужно вычислить средние значения показателей эффективности, полученных по всему составу последовательностей. Далее на основе найденных средних значений можно проводить анализ, сравнение и выбор лучших вариантов КС РОЛП.

Поскольку процедура расчета показателей эффективности КС РОЛП уже описана в предыдущем разделе, в данном разделе решается задача определения последовательностей перерывов обзора на заданной области Земли. До недавнего времени в нашей стране и за рубежом не было алгоритмов для решения подобных задач. Однако сейчас для этой цели можно использовать «векторную модель обзора Земли» (ВМОЗ) [4, 7].

На базе ВМОЗ разработан алгоритм, реализованный на практике в виде компьютерной ВМОЗ-программы. Она обеспечивает определение всех перерывов обзора с частотами их повторения на любой широте Земли для космической системы из любого количества спутников и с любой структурой. Однако, обязательным условием является то, что все КА должны находиться на круговых орбитах с одинаковыми высотой и наклоном. На этапе проектирования новых спутниковых систем ДЗЗ это условие всегда соблюдается, поэтому оно не ограничивает применение ВМОЗ-программы при разработке КС РОЛП. Разбивая область Земли с малым шагом на ряд широт, можно найти весь состав перерывов обзора с их частотами на этой области. Используя найденный состав, формируется искомое множество последовательностей перерывов обзора.

Скорость вычислений по ВМОЗ-программе можно проиллюстрировать следующими примерами расчетов (на компьютере Acer, Aspire 23820) различных вариантов системы КА типа «Метеор-М» с полосами захвата 2900 км на поясе широт  $0^\circ \div 90^\circ$ :

А) при шаге по широтам  $\Delta\varphi = 1^\circ$  время расчета всех перерывов обзора с частотами их повторения составляло для одного варианта системы:

~ 0,05 с для системы из 4-х КА, ~ 1 с для 100 КА, ~ 70 с для 1000 КА, причем число перерывов обзора изменялось для разных вариантов системы из 4-х КА от 3200 до 4100, а с ростом числа спутников становилось еще гораздо больше;

Б) при сокращенном в 10 раз шаге  $\Delta\varphi = 0,1^\circ$  требовалось:

~ 0,3 с для системы из 4-х КА, ~ 9 с для 100 КА, ~ 14 мин для 1000 КА.

Результаты вычислений для обоих шагов по широтам мало различались, поэтому для настоящей статьи использовался больший – из двух шагов, равный  $\Delta\varphi = 1^\circ$ .

Приведенные примеры подтверждают, что число перерывов обзора очень велико: оно измеряется тысячами. Состав формируемых из них последовательностей еще многократно больше. В связи с этим совершенно нереально проводить расчеты многочисленных вариантов КС РОЛП на полном множестве последовательностей перерывов обзора. Желательно выделить из него репрезентативное подмножество, достаточное для высокой точности расчетов. В следующем разделе, используя широко известный метод статистических испытаний Монте-Карло [8, 9], будет показано, как можно добиться этого.

### 8. Выбор репрезентативного подмножества последовательностей перерывов обзора

Задача данного раздела заключается в изложении способа выбора (из полного множества последовательностей обзора, определенных с помощью компьютерной ВМОЗ-программы) репрезентативного подмножества в виде  $K_{\text{set}}$  наборов. В каждом из них должны присутствовать последовательности перерывов обзора для каждой скорости  $V_{fr}$  фронта ЛП из диапазона (22) на всех широтах  $\varphi$  заданной для наблюдения территории лесов нашей страны. Репрезентативность подмножества состоит в том, что оно должно быть достаточно для того, чтобы вычисляемые показатели эффективности практически совпадали с их точными значениями на полном множестве последовательностей перерывов обзора. Излагаемый способ построен на систематическом применении датчика случайных чисел по методу Монте-Карло [8, 9].

Общее число  $N_{el}$  элементов (один элемент – это последовательность перерывов обзора) в подмножестве равно его объему  $K_{\text{set}}$ , умноженному на число  $K_v$  скоростей фронта ЛП и на количество  $K_\varphi$  широт, на которые разбивается заданная область Земли:

$$N_{el} = K_{\text{set}} K_v K_\varphi. \quad (41)$$

При росте объема подмножества  $K_{\text{set}}$ , а потому и количества его элементов  $N_{el}$ , ошибки расчетов будут уменьшаться на основе закона больших чисел [9]. В работе [8] показано, что, благодаря этому закону, ошибки при реализации метода Монте-Карло сокращаются пропорционально увеличению  $\sqrt{N_{el}}$ .

Для каждого варианта КС РОЛП будет применяться изложенная дальше процедура, в рамках которой формируется растущее (по объему, т. е. по количеству элементов) подмножество последовательностей перерывов обзора и одновременно про-

изводится уточнение (по мере увеличения этого объема) показателей эффективности. Процедура заканчивается после достижения двух условий (они будут приведены в конце раздела), определяющих точность проводимых вычислений.

Итак, применяя ВМОЗ-программу, сначала определяются составы перерывов обзора с их частотами для каждой широты  $\varphi$  (в отдельности) на заданной области Земли. Результаты записываются в специальный массив  $A$  и используются в процессе всех расчетов по очередному варианту КС РОЛП.

Вслед за заполнением массива  $A$  выполняется растущее количество одинаковых блоков операций, описанных ниже. Реализованным блокам присваиваются порядковые номера  $K = 1, 2, 3, \dots$ .

В каждом блоке для каждой скорости  $V_{fr}$  фронта лесного пожара из диапазона (22) на каждой из перечисляемых (с заданным шагом) широт  $\varphi$  заданной области Земли с помощью датчика случайных чисел формируется своя последовательность перерывов обзора, отбираемых из массива  $A$ , в котором они сохраняются. Очередной перерыв для такой последовательности выбирается, используя выпавшее значение датчика случайных чисел с учетом частоты (т. е. вероятности) повторения этого перерыва.

Сразу после выбора начального, т. е. 1-го перерыва обзора  $t_1$  на широте  $\varphi$ , датчик случайных чисел срабатывает еще раз, чтобы задать промежуток времени  $x$  на рис. 2, когда площадь ЛП достигает начального минимально обнаружимого уровня  $S_{\text{beg}}$ . При этом естественно считается, что любые значения  $x$  на протяжении перерыва  $t_1$  равновероятны.

Используя очередную выпавшую (в результате ряда срабатываний датчика случайных чисел) последовательность перерывов обзора  $t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_J$ , выполняется процедура расчета показателей эффективности для широты  $\varphi$  при очередном значении  $V_{fr}$  скорости фронта ЛП, изложенная в разделе 6.

Завершив расчеты в рамках очередного блока операций для последовательностей перерывов обзора, полученных на всех широтах  $\varphi$  заданной области Земли при всех значениях  $V_{fr}$  скоростей фронта лесного пожара, вычисляются средние значения среди всех значений каждого показателя эффективности, полученных на всех последовательностях блока (т. е. на всех широтах  $\varphi$  заданной области Земли при всех значениях  $V_{fr}$  скоростей фронта лесного пожара).

Закончив очередной блок операций с номером  $K$ , вычисляются (а правильнее сказать уточняются) все показатели эффективности, определяемые как средние значения для этих показателей, найденных на всех блоках к данному моменту.

Уже говорилось, что с ростом числа блоков операций, а потому и объема  $K_{\text{set}}$  подмножества, понижаются ошибки определяемых показателей эффективности. Значит, можно закончить выделение новых блоков, т. е. прекратить дальнейшие расчеты (по рассматриваемому варианту КС РОЛП), после достижения заданной точности вычислений. Предлагается следующий способ завершения процесса выделения новых блоков.

Весь ряд реализуемых блоков операций с номерами  $K = 1, 2, 3, \dots$  подразделяется на два параллельных ряда: ряд блоков с нечетными номерами  $K = 2M + 1$ , т. е. нечетный ряд, и ряд блоков с четными номерами  $K = 2M + 2$ , т. е. четный ряд;  $M = 0, 1, 2, \dots$

Для обоих рядов независимо вычисляются все показатели эффективности:

1) нечетный ряд: 9 значений  $V(T_{\text{lim}}, 2M + 1)$  при  $T_{\text{lim}} = 1; 1,5; 2; \dots; 5$  ч,  $V_{\text{mid}}(2M + 1)$ ,  $T_{\text{mid}}(2M + 1)$ ,  $S_{\text{mid}}(2M + 1)$ ;

2) четный ряд: 9 значений  $V(T_{\text{lim}}, 2M + 2)$  при  $T_{\text{lim}} = 1; 1,5; \dots; 5$  ч,  $V_{\text{mid}}(2M + 2)$ ,  $T_{\text{mid}}(2M + 2)$ ,  $S_{\text{mid}}(2M + 2)$ .

Обозначим через  $\delta(M)$  максимум абсолютных величин разностей 9-ти вероятностей  $V(T_{\text{lim}})$ , найденных для нечетного и четного рядов (для очередного значения  $M$ ). Очевидно,

$$\delta(M) = \max_{T_{\text{lim}}} (|V(T_{\text{lim}}, 2M + 1) - V(T_{\text{lim}}, 2M + 2)|),$$

$$T_{\text{lim}} = 1; 1,5; 2; \dots; 5 \text{ ч.} \quad (42)$$

Введем следующее неравенство, которое будет играть роль условия, при выполнении которого дальнейшие расчеты прекращаются:

$$\delta(M) < \delta_{\text{max}}, \quad (43)$$

где  $\delta_{\text{max}}$  – задаваемая максимально допустимая ошибка, определяющая точность расчетов.

Кроме того, во избежание того, что величина  $\delta(M)$  в (42) может случайно оказаться удовлетворяющей условию (43) даже при небольшом количестве выполненных блоков, введем еще одно условие, требующее прекращения расчетов только тогда, когда  $M$  становится не меньше задаваемого минимального значения  $M_{\text{min}}$ :

$$M \geq M_{\text{min}}. \quad (44)$$

Для определенности при наступлении обоих условий (43) и (44) будем заканчивать расчеты всегда на четном значении  $K$  числа блоков, т. е. после вычисления показателей эффективности для четного ряда. В этом случае общее количество рассчитанных блоков

$$K = 2M + 2,$$

причем минимально возможное значение числа реализованных блоков  $K_{\text{min}}$ , очевидно, равно

$$K_{\text{min}} = 2M_{\text{min}} + 2. \quad (45)$$

После остановки процесса расчетов производится вычисление итоговых значений для всех показателей эффективности. Они определяются как половины сумм конечных значений этих показателей, полученных на последних блоках с номерами  $K = 2M + 1$  для нечетного ряда и  $K = 2M + 2$  для четного ряда:

$V(T_{\text{lim}}) = (V(T_{\text{lim}}, 2M + 1) + V(T_{\text{lim}}, 2M + 2))/2$   
при  $T_{\text{lim}} = 1; 1,5; 2; \dots; 5$  часов;

$$V_{\text{mid}} = (V_{\text{mid}}(2M + 1) + V_{\text{mid}}(2M + 2))/2;$$

$$T_{\text{mid}} = (T_{\text{mid}}(2M + 1) + T_{\text{mid}}(2M + 2))/2;$$

$$S_{\text{mid}} = (S_{\text{mid}}(2M + 1) + S_{\text{mid}}(2M + 2))/2.$$

Предельная ошибка  $\delta_{\text{max}}$  для условия (43) при расчетах в настоящей статье задавалась на уровне

$$\delta_{\text{max}} = 0,01. \quad (46)$$

Минимально допустимое число  $M_{\text{min}}$  для условия (44) принималось равным

$$M_{\text{min}} = 50. \quad (47)$$

Общее количество  $K$  выполненных блоков операций – это объем выборки  $K_{\text{set}}$ .

В ходе программы расчетов, результаты которых даны в следующем разделе, реальные объемы выборок  $K_{\text{set}}$  были, как правило, в несколько раз больше  $K_{\text{min}}$  в равенстве (45).

Оценим общее количество  $N_{\text{el}}$  последовательностей перерывов обзора, встречавшиеся при расчетах. Число скоростей фронта МЛП на интервале (22) с шагом в 1 м/ч, равнялось  $K_v = 96$ . Число широт для заданного пояса  $42^\circ \div 70^\circ$  при шаге в  $1^\circ$  составляло  $K_\phi = 29$ . Минимально возможное количество реализованных блоков на основе (45) и (47) составляло 102. Подставляя значения  $K_v$ ,  $K_\phi$  и  $K_{\text{set}} = K_{\text{min}} K_{\text{set}} = K_{\text{min}} = 102$  в формулу (41), находим наименьшее возможное значение  $N_{\text{el}} = 283968$  для одного варианта КС РОЛП. Однако, в реальности  $N_{\text{el}}$  было намного больше, достигая 1 000 000 и выше, поэтому суммарное число срабатываний датчика случайных чисел исчислялось многими миллионами.

Перед тем, как начинать практические расчеты вариантов КС РОЛП, была выполнена программа пробных вычислений, задавая различные пары значений параметров  $\delta_{\text{max}}$  и  $M_{\text{min}}$  в условиях (43) и (44).



Она показала, что, фиксируя эти значения в виде (46) и (47), обеспечивается вполне достаточная точность итоговых величин всех показателей эффективности, которые оставались стабильными до 2-й значащей цифры, допуская небольшие отклонения (при повторении одних и тех же вычислений) не ранее 3-й значащей цифры.

### 9. Результаты расчетов

На основе изложенного в данной статье метода был выполнен большой объем расчетов, в рамках которого рассматривались следующие исходные данные, фиксирующие состав и параметры КС, предназначенной для РОЛП:

- количество КА в космической системе  $N_{\text{sat}} = 1 \div 20$ , шаг перебора  $\Delta N_{\text{sat}} = 1$ ;
- орбитальная структура – «эквилидистантная», определяемая по формулам (4) – (6);
- количество КА в каждой плоскости орбиты  $M_{\text{ip}} = 1 \div 6$ , шаг перебора 1;
- разность долгот восходящих узлов орбит  $\Delta\lambda = 0^\circ \div 90^\circ$ , шаг перебора  $5^\circ$ ;
- разность фаз (разность аргументов широты)  $\Delta\tau = 0^\circ \div 360^\circ$ , шаг перебора  $5^\circ$ ;
- все КА функционируют на ССО с высотами  $h = 250 \div 1000$  км, шаг перебора  $\Delta h = 50$  км.

Космическая система должна обнаруживать все ЛП с площадью не менее начального значения  $S_{\text{beg}} = 6 \text{ м}^2$ , определенного в (7), на территории лесов России в диапазоне широт  $42^\circ \div 70^\circ$ , перебираемых с шагом  $1^\circ$ .

Скорость перемещения фронта лесного пожара, используемая при определении роста площади ЛП во времени по формуле (23), равна, на основании условия (22),  $V_{\text{fr}} = 5 \div 100 \text{ м/ч}$ , шаг перебора 1 м/ч.

На борту каждого КА находится широкозахватный ИК-радиометр с полосой захвата, задаваемой, в соответствии с условием (1), максимальными углами визирования  $w_{\text{max}} = \pm 59^\circ$  от надира. Количество пикселей  $2N_{\text{pixel}}$  на полосе захвата равнялось 5000, учитывая условие (2).

Для сравнения и выбора лучших вариантов КС РОЛП использовались следующие показатели эффективности, введенные в разделе 1:

- «средняя вероятность»  $V_{\text{mid}}$  обнаружения лесного пожара на интервале 1  $\div$  5 ч, вычисляемая по формуле (8);
- «среднее время»  $T_{\text{mid}}$  обнаружения лесного пожара, истекшее после момента достижения им минимальной площади  $S_{\text{beg}}$ ;
- «средняя площадь»  $S_{\text{mid}}$  обнаруженного лесного пожара (т. е. в момент обнаружения).

Процедура, применявшаяся для определения всех показателей эффективности, изложена в разделе 6 с добавлениями в разделах 7 и 8.

Наиболее важные результаты расчетов представлены на графиках на рис. 3 – 9.

На рис. 1, 2 и 3 изображены графики наилучших значений «средней вероятности»  $V_{\text{mid}}$ , «среднего времени»  $T_{\text{mid}}$  и «средней площади»  $S_{\text{mid}}$  в моменты обнаружения лесного пожара для всех чисел спутников  $N_{\text{sat}}$  в космической системе, изменяющихся от 1 до 20, при количествах спутников  $M_{\text{ip}}$  в одной плоскости орбиты, равных 1, 2, 3, 4 и 6.

Напомним, что в эквидистантной группировке  $M_{\text{ip}}$  спутников равномерно размещаются в каждой плоскости орбиты на угловых расстояниях, равных  $180^\circ/L$ , где  $L$  – количество плоскостей орбит, определяемое из формулы (4).

Каждая точка графиков на рис. 3 – 5, изображенная в виде небольшого круга, соответствует оптимальному варианту «эквилидистантной» структуры, при котором обеспечивается наилучшее значение конкретного показателя эффективности для очередного сочетания общего количества спутников  $N_{\text{sat}}$  в КС РОЛП и их числа  $M_{\text{ip}}$  в одной плоскости орбиты. Оптимальными, т. е. лучшими величинами этих показателей, являются максимально достижимые значения  $V_{\text{mid}}$  и минимально достижимые значения  $T_{\text{mid}}$  и  $S_{\text{mid}}$ . Будем считать практически приемлемыми следующие значения указанных показателей:  $V_{\text{mid}} \geq 0,9$ ;  $T_{\text{mid}} \leq 1$  ч;  $S_{\text{mid}} \leq 1000 \text{ м}^2$ .

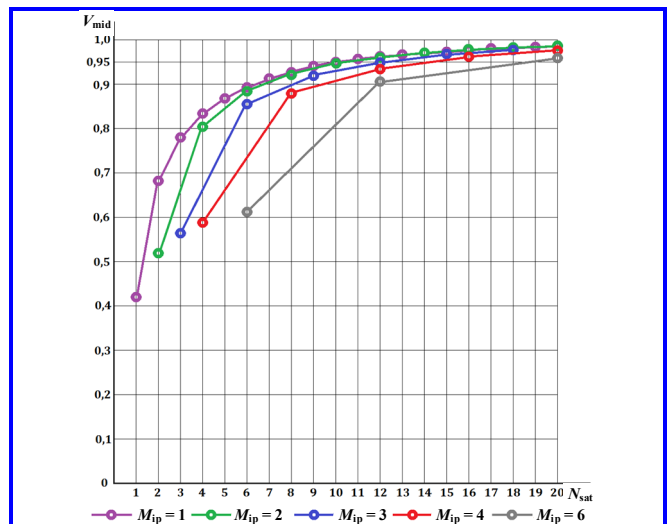


Рис. 3. Максимально возможные значения средней вероятности  $V_{\text{mid}}$  обнаружения лесного пожара в зависимости от общего количества спутников  $N_{\text{sat}}$  в космической системе при разном числе спутников  $M_{\text{ip}}$  в одной плоскости орбиты

Анализируя графики на рис. 3, несложно установить, что группировки, состоящие менее, чем из 6-ти спутников, при всех  $M_{ip}$  обеспечивают неприемлемо малые оптимальные значения средних вероятностей обнаружения лесных пожаров, далеко не достигающие уровня 0,9. Поэтому для оперативного обнаружения лесных пожаров следует выбирать космические системы, состоящие из 6-ти и более КА.

Продолжая исследовать графики на рис. 3, можно убедиться, что при количестве КА в КС РОЛП, равном или большем, чем  $N_{sat} = 6$ , графики для  $M_{ip} = 1$  и  $M_{ip} = 2$ , т. е. для космических систем, в которых КА выводятся в космос по одному или по два в каждую плоскость орбиты, практически совпадают. Остальные графики на рис. 3, соответствующие  $M_{ip} = 3 \div 6$ , дают меньшие, т. е. в данном случае худшие, величины средней вероятности  $V_{mid}$ , чем при  $M_{ip} = 1$  и  $M_{ip} = 2$ , для всех чисел КА в космической системе.

При анализе графиков на рис. 4 и 5 можно сделать выводы, почти аналогичные полученным при исследовании графиков на рис. 3.

На рис. 4 графики, построенные для минимально достижимых значений «среднего времени»  $T_{mid}$  обнаружения лесного пожара, вновь почти полностью совпадают для  $N_{sat} \geq 6$ , как это наблюдалось на рис. 1. Графики для  $M_{ip} \geq 3$  точно так же, как и на рис. 1, дают при всех числах спутников  $N_{sat}$  худшие, т. е. в данном случае более высокие значения показателя  $T_{mid}$ . Приемлемые величины среднего времени  $T_{mid}$ , понижающиеся до уровня 1 ч и менее, возможны лишь для  $N_{sat} \geq 8$ .

По рис. 5 видно, что графики «средней площади»  $S_{mid}$  для  $M_{ip} = 1$  и  $M_{ip} = 2$  совпадают, начиная с  $N_{sat} = 6$ , как это было установлено и по рис. 3 и 4. Остальные графики, представленные на рис. 5, проходят выше предыдущих, значит, величины показателя  $S_{mid}$  на этих графиках хуже. При этом только при возрастании количества КА в системе до 8-ми, на обоих графиках при  $M_{ip} = 1$  и  $M_{ip} = 2$  реализуется уровень, близкий к  $1000 \text{ м}^2$ , что можно считать практически приемлемым результатом. Затем по мере дальнейшего возрастания числа КА в космической системе средняя площадь  $S_{mid}$  постепенно уменьшается вплоть до  $\sim 500 \text{ м}^2$ .

Итак, по результатам анализа графиков на рис. 3, 4 и 5 можно сделать следующие общие выводы:

- оптимальные значения средней вероятности  $V_{mid}$  при количестве КА в системе менее 6-ти, а также оптимальные значения среднего времени  $T_{mid}$  и средней площади  $S_{mid}$  при количестве КА менее 8-ми оказались практически неприемлемыми, поэтому создание космических систем, состоящих менее, чем из 8-ми спутников нецелесообразно;

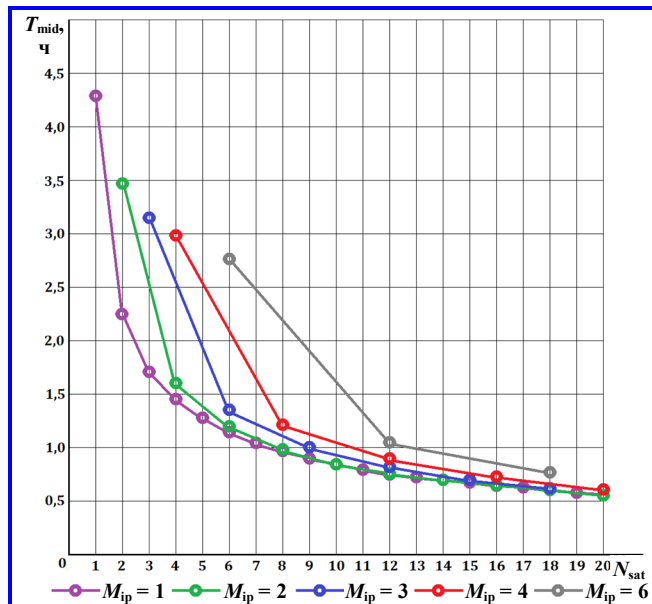


Рис. 4. Минимально возможные значения среднего времени  $T_{mid}$  обнаружения лесного пожара в зависимости от общего количества спутников  $N_{sat}$  в космической системе при разном числе спутников  $M_{ip}$  в одной плоскости орбиты

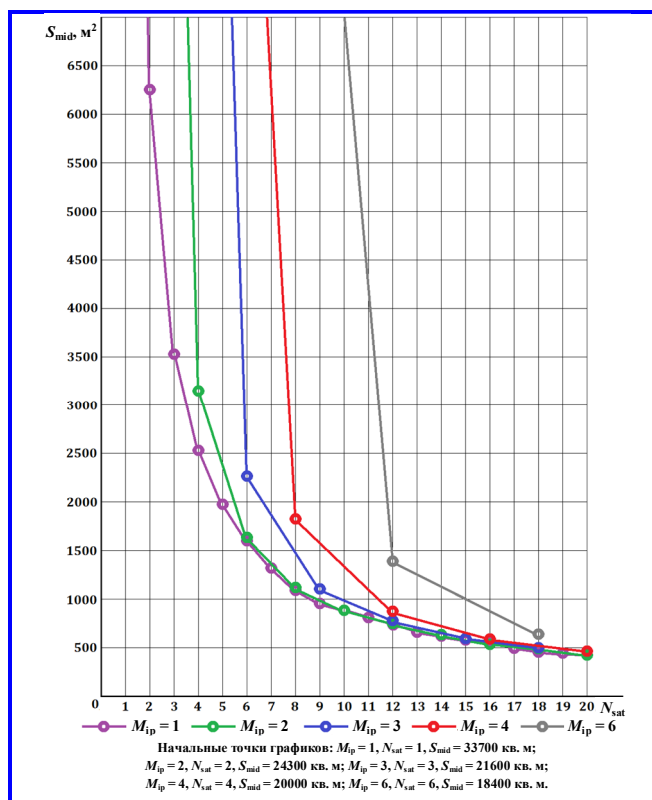


Рис. 5. Минимально возможные значения средней площади  $S_{mid}$  обнаруженного лесного пожара в зависимости от общего количества спутников  $N_{sat}$  в космической системе при разном числе спутников  $M_{ip}$  в одной плоскости орбиты

– для чисел спутников в космической системе, равных или превышающих 6, при количестве спутников  $M_{ip}$  в одной плоскости орбиты, составляющем 1 или 2, оптимальные значения показателей эффективности  $V_{mid}$ ,  $T_{mid}$  и  $S_{mid}$  почти совпадают;

– графики, построенные при числе спутников в каждой плоскости орбиты, равном 3, 4 и 6, дают значения показателей эффективности худшие, чем при  $M_{ip} = 1$  и  $M_{ip} = 2$ .

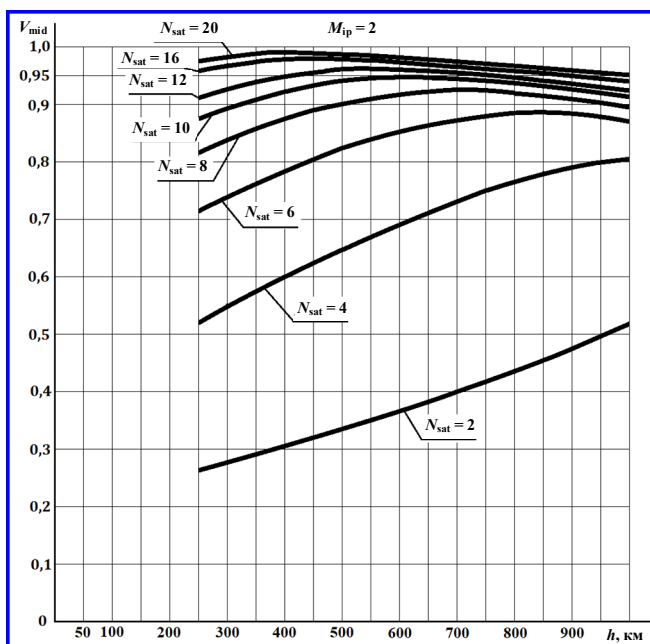
Следовательно, во-первых, нет смысла далее анализировать космические системы, в которых в одной плоскости орбиты размещается по 3 и больше спутников. Во-вторых, нужно выбрать лучший для практического применения вариант из двух оставшихся, т. е.  $M_{ip} = 1$  и  $M_{ip} = 2$ . Учитывая, что парный запуск спутников в каждую плоскость орбиты более выгоден, как о том свидетельствует положительный опыт АО «Корпорация «ВНИИЭМ», много лет выводящего малые КА типа «Канопус-В» по два спутника в одну плоскость орбиты, целесообразно оставить для дальнейшего рассмотрения  $M_{ip} = 2$ .

На рис. 6 – 8 представлены графики, изображающие зависимости значений показателей эффективности  $V_{mid}$ ,  $T_{mid}$  и  $S_{mid}$  от высоты орбиты  $h$  при количестве спутников  $N_{sat}$  в космической системе, варьируемом в пределах от 2-х до 20-ти КА через 2 КА. Для всех графиков структура системы состоит из  $N_{sat}/2$  плоскостей орбит, в каждой из которых находится по 2 спутника. Графики позволяют определить оптимальные высоты орбит  $h_{opt}$ , на которых реализуются наилучшие величины показателей эффективности. Кроме того, они помогают оценить, насколько быстро ухудшается значение соответствующего показателя эффективности при постепенном удалении от оптимальной высоты.

На рис. 6 показаны графики «средней вероятности»  $V_{mid}$  обнаружения лесного пожара при разных числах спутников  $N_{sat}$  в диапазоне высот орбит от 250 до 1000 км. Для количества спутников в КС РОЛП  $N_{sat}$ , изменяющегося в пределах  $6 \div 20$ , оптимальные высоты орбит  $h_{opt}$ , соответствующие максимально достижимым величинам показателя  $V_{mid}$ , фиксируются в интервале от 350 до 900 км. По мере роста числа КА оптимальная высота орбит уменьшается, что отчетливо можно проследить по рис. 4. Для систем из 2-х и 4-х спутников оптимальные высоты орбит оказались выше 1000 км. Полный состав значений оптимальных высот орбит дан в таблице.

По графикам на рис. 6 несложно установить, что при изменении высоты орбиты в окрестности каждого ее оптимального значения  $h_{opt}$  величина показателя эффективности  $V_{mid}$  постепенно ухудшается, т. е. уменьшается, хотя и очень медленно.

Это означает, что на практике вполне допустимы большие отклонения от наилучших высот орбит. Подтвердим это на следующем примере: для космической системы из 8-ми КА при возрастании или, наоборот, уменьшении высоты орбиты на ~100 км по сравнению с ее оптимальной величиной, равной ~720 км, «средняя вероятность»  $V_{mid}$  уменьшается от ~0,925 до ~0,915. Такое снижение можно считать допустимым, поскольку оно приблизительно соответствует ухудшению «средней вероятности» всего только на ~1%. Это обстоятельство будет учтено в дальнейшем при формулировании рекомендаций по выбору высот орбит, удобных для реализации лучших значений сразу для всех трех рассматриваемых показателей эффективности раннего, т. е. оперативного обнаружения лесных пожаров.



**Рис. 6. Значения средней вероятности  $V_{mid}$  обнаружения лесного пожара в зависимости от высоты орбиты  $h$  и общего количества спутников  $N_{sat}$  в космической системе при числе спутников  $M_{ip} = 2$  в каждой плоскости орбиты**

Таблица

**Значения оптимальных высот орбит для космических систем раннего обнаружения лесных пожаров с попарным расположением спутников в каждой плоскости орбиты**

$V_{mid}$	$N_{sat}$	2	4	6	8	10	12	16	20
	$h_{opt}$		1160	1015	850	720	620	540	450
$T_{mid}$	$N_{sat}$	2	4	6	8	10	12	16	20
	$h_{opt}$		1170	1010	825	700	600	525	450
$S_{mid}$	$N_{sat}$	2	4	6	8	10	12	16	20
	$h_{opt}$		1190	1060	900	790	715	660	590

На рис. 7 изображены графики «среднего времени»  $T_{mid}$  обнаружения лесного пожара. Как и на предыдущем рис. 6, здесь оптимальные величины высот орбит  $h_{opt}$  постепенно понижаются, когда число спутников возрастает. Для систем из 6-ти и более спутников оптимальные высоты, соответствующие минимумам показателя  $T_{mid}$  попадают в интервал от 400 до 850 км, что лишь немного уже, чем для «средней вероятности»  $V_{mid}$ . Для систем, состоящих из 2-х и 4-х спутников, оптимальные высоты орбит превышают 1000 км. Все наилучшие величины высот орбит для показателя эффективности  $T_{mid}$  можно увидеть в таблице.

Как и при анализе графиков на рис. 6, по рис. 7 можно убедиться в том, что значения «среднего времени»  $T_{mid}$  относительно медленно ухудшаются в окрестности каждой оптимальной высоты орбиты  $h_{opt}$ .

В частности, для космической системы из 8-ми спутников показатель  $T_{mid}$  возрастает, при изменении высоты орбиты в окрестности  $h_{opt}$  на  $\pm 100$  км, от 0,99 ч до 1,02 ч, т. е. лишь на 0,03 ч, или на  $\sim 3\%$ . Такое ухудшение «среднего времени»  $T_{mid}$  обнаружения лесного пожара практически незаметно.

На рис. 8 представлены графики «средней площади»  $S_{mid}$  лесного пожара в момент его обнаружения. По этим графикам, а также по таблице можно вновь, как и по ранее рассмотренным графикам на рис. 6 и 7, убедиться, что оптимальные высоты орбит  $h_{opt}$  постепенно понижаются с ростом числа КА в КС РОЛП. Для систем из 6 – 20-ти спутников все наилучшие высоты орбит укладываются в диапазон 500 ÷ 900 км. Оптимальные высоты орбит для космических группировок из 2-х и 4-х спутников, как и для показателей эффективности  $V_{mid}$  и  $T_{mid}$ , превышают уровень в 1000 км.

В окрестностях оптимальных значений высот орбит на рис. 8 «средние площади»  $S_{mid}$  так же, как и «средняя вероятность»  $V_{mid}$  на рис. 6 и «среднее время»  $T_{mid}$  на рис. 7, ухудшаются относительно незначительно, но все-таки быстрее, чем  $V_{mid}$  и  $T_{mid}$  на рис. 6 и 7. Например, для системы из 8-ми КА «средняя площадь»  $S_{mid}$  увеличивается на 60 – 80 м<sup>2</sup> при изменении высоты орбиты на  $\pm 100$  км. По сравнению с оптимальным значением  $S_{mid}$ , равным  $\sim 1140$  м<sup>2</sup>, подобное увеличение приблизительно составляет 6 – 7 %, что вдвое больше, чем для  $T_{mid}$  на рис. 7 и еще значительно превышает ухудшение  $V_{mid}$  на рис. 6.

Итак, в окрестностях оптимальных высот орбит  $h_{opt}$  для всех трех показателей эффективности:  $V_{mid}$ ,  $T_{mid}$  и  $S_{mid}$  значения этих показателей эффективности ухудшаются не более, чем на 7% даже при удалении от  $h_{opt}$  на  $\pm 100$  км. Это позволяет выбирать единые усредненные высоты орбит для совокупности рассматриваемых показателей  $V_{mid}$ ,  $T_{mid}$  и  $S_{mid}$  без существенного ухудшения по сравнению с их оптимальными величинами.

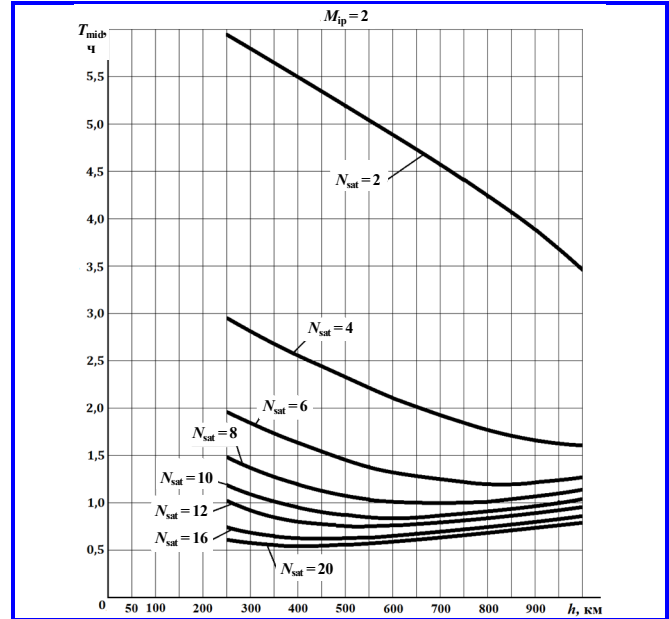


Рис. 7. Значения среднего времени  $T_{mid}$  обнаружения лесного пожара в зависимости от высоты орбиты  $h$  и общего количества спутников  $N_{sat}$  в космической системе при числе спутников  $M_{ip} = 2$  в каждой плоскости орбиты

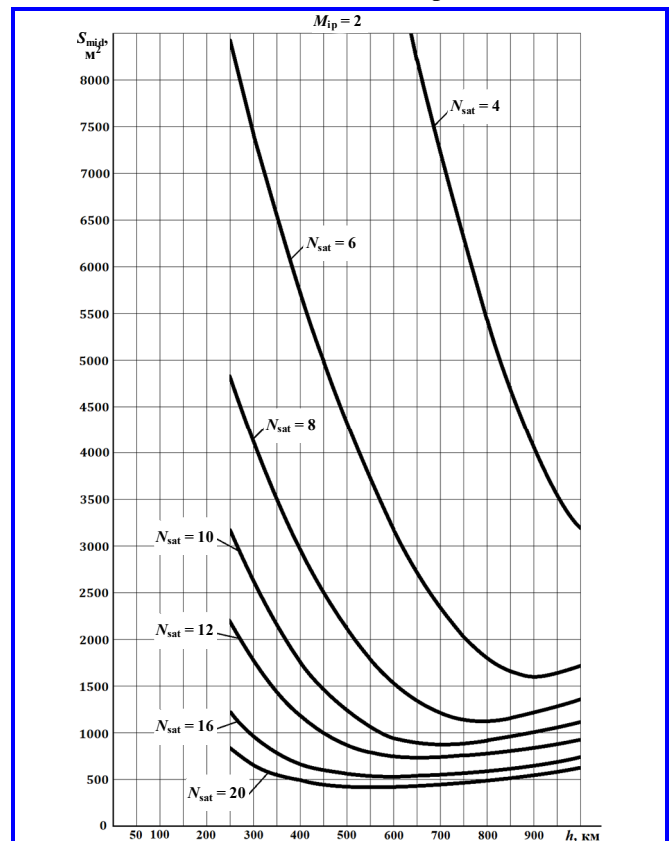
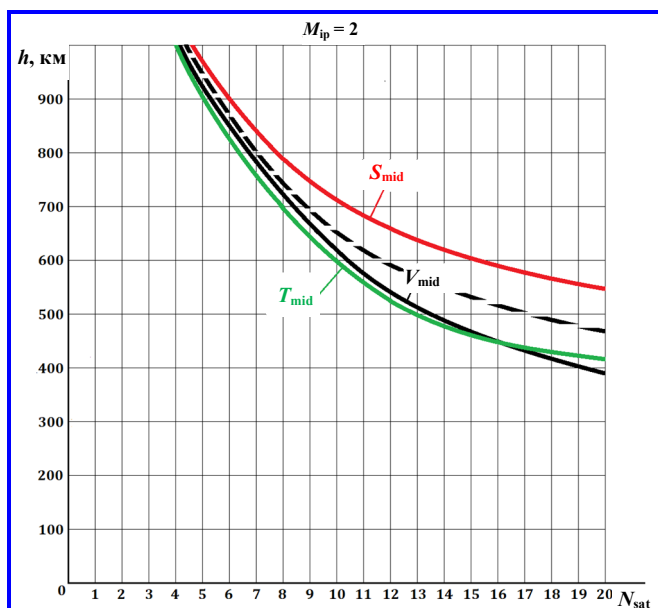


Рис. 8. Значения средней площади  $S_{mid}$  обнаруженного лесного пожара в зависимости от высоты орбиты  $h$  и общего количества спутников  $N_{sat}$  в космической системе при числе спутников  $M_{ip} = 2$  в каждой плоскости орбиты



**Рис. 9. Оптимальные значения высот орбит в зависимости от количества спутников в системе  $N_{sat}$  для следующих показателей эффективности: средней вероятности  $V_{mid}$  обнаружения лесного пожара, среднего времени  $T_{mid}$  обнаружения лесного пожара и средней площади  $S_{mid}$  обнаруженного лесного пожара. Штрихами показан график средней линии между крайними графиками**

С этой целью рассмотрим графики на рис. 9, где показано, как оптимальные высоты орбит изменяются, а точнее постепенно уменьшаются при увеличении количества КА в космической системе для каждого из трех показателей эффективности оперативного обнаружения лесных пожаров. Видно, что графики для пары показателей  $V_{mid}$  и  $T_{mid}$  очень близки друг к другу. Третий график для «средней площади»  $S_{mid}$  проходит выше двух предыдущих на 50 – 150 км. Следовательно, учитывая установленную выше допустимость отклонения высоты орбиты от ее оптимального значения даже на  $\pm 100$  км, можно всюду на рис. 7 выбирать в качестве высот орбит, одинаково применимых для всех трех показателей эффективности, средние значения между крайними графиками, которые будут отличаться от каждого из них не более, чем на  $\pm 75$  км. Такая средняя линия изображена штрихами на рис. 7.

Высоты орбит, расположенные на штрих-линии на рис. 9, можно рекомендовать в качестве наиболее целесообразных в процессе будущего проектирования перспективной космической системы для раннего (оперативного) обнаружения лесных пожаров.

Результаты расчетов, представленные на рис. 6 – 9 и в таблице, удобно использовать для выбора количества спутников в КС РОЛП и высот их ССО. При этом нужно исходить из задаваемых будущей

организацией-заказчиком значений «средних» показателей эффективности: «средней вероятности»  $V_{mid}$  обнаружения лесного пожара, «среднего времени»  $T_{mid}$  обнаружения этого пожара и (или) «средней площади»  $S_{mid}$  пожара в момент его обнаружения. Кроме того, необходимо учитывать степень современной и перспективной готовности средств тушения лесных пожаров.

В ближайшие годы российская система средств лесоохраны вряд ли будет достаточно хорошо готова к оперативной ликвидации малоразмерных лесных пожаров с помощью мобильных команд, прибывающих на вертолетах или использующих иные способы быстрой доставки к местам возникших ЛП и применяющих минимальный набор техники лесопожаротушения. По этой причине создание и развертывание КС РОЛП целесообразно обеспечить путем ее поэтапного наращивания.

На начальной стадии будет достаточно сформировать и в течение нескольких лет поддерживать функционирование группировки из 6-ти КА, в которой спутники находятся попарно в трех плоскостях орбит. По среднему графику на рис. 9 рекомендуемая высота солнечно-синхронных орбит этих КА равна  $\sim 850$  км. По графикам на рис. 6 – 8 можно установить, что данная КС сможет обеспечить следующие значения показателей эффективности:  $V_{mid} = \sim 0,88$ ;  $T_{mid} = \sim 1,4$  ч;  $S_{mid} = \sim 1700$  м<sup>2</sup>. Эти средние величины вряд ли можно считать приемлемыми в отдаленной перспективе, поскольку многие лесные пожары будут выявляться не за среднее значение  $\sim 1,4$  ч, а за 2 и более часов, а их площадные размеры (в моменты обнаружения) достигнут нескольких тысяч м<sup>2</sup>.

В темпе с наращиванием возможностей оперативного лесопожаротушения рационально постепенно расширять состав КА, доведя его сначала до 8-ми, а впоследствии до 10 – 12-ти постоянно функционирующих спутников.

Космическая система из 8-ми КА должна функционировать попарно на 4-х ССО с высотами около 750 км (на основании среднего графика на рис. 7). Такая система позволит улучшить величины показателей эффективности до следующих средних уровней, которые несложно оценить по графикам на рис. 4 – 6:  $V_{mid} = \sim 0,925$ ;  $T_{mid} = \sim 1$  ч;  $S_{mid} = \sim 1300$  м<sup>2</sup>. Хотя эти цифры существенно лучше, чем для КС из 6-ти КА, но в отдаленной перспективе они также нуждаются в улучшении.

Доведение в будущем космической группировки до 10 – 12-ти КА может оказаться достаточным для оперативного обнаружения и быстрой ликвидации подавляющего большинства новых лесных

пожаров с минимальными затратами сил и средств лесопожаротушения.

Система из 10-ти спутников, в которой должно находиться по 2 КА в 5-ти плоскостях солнечно-синхронных орбит с высотами  $\sim 650$  км, обеспечит следующие средние значения показателей эффективности:  $0,94$   $V_{\text{mid}} = \sim 0,94$ ;  $T_{\text{mid}} = \sim 0,85$  ч;  $S_{\text{mid}} = \sim 900$  м<sup>2</sup>. Космическая группировка из 12-ти спутников (по 2 КА в 6-ти плоскостях ССО на высотах  $\sim 600$  км) обеспечит еще большее улучшение показателей эффективности:  $V_{\text{mid}} = \sim 0,96$ ;  $T_{\text{mid}} = \sim 0,8$  ч;  $S_{\text{mid}} = \sim 800$  м<sup>2</sup>.

Дальнейшее наращивание количества спутников в КС РОЛП вплоть до 14-ти и более КА, как можно судить по графикам на рис. 6 – 9, не является оправданным. Дело в том, что оно повлечет за собой ощутимый рост затрат на изготовление, запуск и поддержание чрезмерно большой группировки КА, но не приведет к кардинальному улучшению показателей эффективности оперативного обнаружения лесных пожаров.

#### Заключение

В настоящей статье содержится полное и подробное изложение метода расчета количества спутников и высот ССО в КС РОЛП. Сформулированы цели, условия, исходные данные, требования и показатели эффективности детектирования лесных пожаров. Детально описана и обоснована процедура расчета показателей эффективности, используемая для сравнения и выбора вариантов КС РОЛП. Реализована большая программа расчетов вариантов КС РОЛП.

Построен ряд графиков для анализа зависимостей показателей эффективности от общего количества спутников в КС РОЛП и их числа в каждой плоскости орбиты и высот орбит ССО. Графики позволяют производить выбор состава спутников и высоты орбит в процессе проектирования перспек-

тивной КС РОЛП. Обосновано и рекомендовано поэтапное создание КС РОЛП с постепенным наращиванием числа КА от 6-ти до 8-ми и затем до 10 – 12-ти с учетом степени готовности средств лесоохраны к организации оперативного тушения лесных пожаров с помощью мобильных команд.

#### Литература

1. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В-ИК» / Под редакцией Макриденко Л. А., Волкова С. Н., Горбунова А. В., Салихова Р. С., Терехова С. И. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – 129 с.
2. Первые результаты работы ИК-радиометра МСУ-ИК-СРМ в составе КА «Канопус-В-ИК» / Н. П. Акимов, К. В. Бадаев, Ю. М. Гектин [и др.] // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2018. – Т. 5. – Вып. 4. – С. 34 – 45.
3. Исследование орбитального построения системы обнаружения лесных пожаров / И. Ю. Ильина, В. К. Саульский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2021 – Т. 184. – № 5. – С. 43 – 54.
4. Выбор структуры систем спутников для метеорологии и обнаружения очагов лесных пожаров на основе векторной модели обзора Земли / В. К. Саульский // Космические исследования. – 2020. – Т. 58. – № 4. – С. 331 – 343.
5. Анализ структуры многоспутниковых группировок для раннего обнаружения малоразмерных лесных пожаров / Л. А. Макриденко, А. В. Горбунов, И. Ю. Ильина [и др.] // Космонавтика и Ракетостроение. – 2020. – № 4 (115). – С. 5 – 20.
6. Ландсберг Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. – 6-е изд., стереотип. – Москва : ФИЗМАТГИЗ, 2003. – 848 с.
7. Анализ систем спутников для периодического обзора Земли / В. К. Саульский // Космические исследования. – 2017. – Т. 55. – № 4. – С. 290 – 304.
8. Соболев И. М. Метод Монте-Карло / И. М. Соболев. – Москва : Наука, 1968. – 64 с.
9. Вентцель Е. С. Исследование операций / Е. С. Вентцель. – Москва : Советское радио, 1972. – 552 с.

Поступила в редакцию 11.02.2022

*Ирина Юрьевна Ильина, заместитель начальника научно-производственного комплекса «Космические комплексы», т. (495) 623-57-74, e-mail: nprk@hq.vniiem.ru. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

## COMPOSITION CALCULATION METHOD OF SPACECRAFT AND HEIGHTS OF THEIR ORBITS FOR EARLY DETECTION OF FOREST FIRES

I. Iu. Iliina

*A method is described for calculating and selecting of spacecraft composition, heights of their orbits in order to create a space system for the early detection of forest fires. Early detection of fires, while their size is relatively small, makes it possible to organize fire extinguishment with*

the help of small mobile teams with a minimum of technical facilities. To ensure concurrent detection of emerging forest fires, it is proposed to use spacecraft with a wide coverage infrared radiometer of the MSU-IK-SRM type, flight tests of which were carried out on board the Canopus-V-IK spacecraft. Taking into account the detection of new forest fires in an extremely short time, not exceeding a few hours, a promising space system for the early detection of forest fires shall consist of a large number of spacecraft. The issue arises of choosing and substantiating the total number of satellites in the system, their number and distribution in individual orbital planes, as well as orbital heights. In this article, an issue statement is given, including the formulation of goals, conditions, requirements, initial data and performance indicators for comparing various options for the space system. The principles of constructing a method for optimizing the composition and orbits of the space system for the early detection of forest fires, including all the necessary models and diagrams, are presented. The computational procedure for determining all performance indicators is described in detail. On its basis, a large program of calculations for variants of the space system for the early detection of forest fires, including from 1 to 20 satellites operating in sun-synchronous orbits with altitudes from 250 to 1000 km, is carried out. Groupings were considered, where in each plane of the orbit there are from 1 to 6 spacecraft. The results of the calculations are presented in the form of a series of graphs that are convenient for use at the design stage of the promising space system for the early detection of forest fires in order to select the option that meets the requirements of the customer organization.

**Keywords:** forest fire, early detection, coverage width, pixel, equispaced structure, average probability, average time, average area, vector model, viewing angle, representative subset.

### References

1. Space system for real-time monitoring of industrial and natural disasters 'Canopus-V' with 'Canopus-V-IK' / Edited by Makridenko L. A., Volkov S. N., Gorbunov A. V., Salikhov R. S., Terekhov S. I. – Moscow : VNIEM Corporation JSC. – 2017. – 129 p.
2. First results of MSU-IK-SRM IR radiometer operation as part of 'Canopus-V-IK' / N. P. Akimov, K. V. Badaev, Iu. M. Gektin [et al.] // Rocket and space instrument engineering and information systems. – 2018. – Vol. 5. – Issue 4. – P. 34 – 45.
3. Research of orbital construction of forest fire detection system / I. Iu. Ilina, V. K. Saulskii // Matters of electromechanics. VNIEM proceedings – Moscow: VNIEM Corporation JSC, 2021 – Vol. 184. – No. 5. – P. 43 – 54.
4. Selection of satellite systems structure for meteorology and detection of forest fires based on the vector model of the Earth survey / V. K. Saulskii // Space research. – 2020. – Vol. 58. – No. 4. – P. 331 – 343.
5. Analysis of multi-satellite constellations structure for early detection of small forest fires / L. A. Makridenko, A. V. Gorbunov, I. Iu. Ilina [at al.] // Cosmonautics and Rocket Engineering. – 2020. – No. 4 (115). – P. 5 – 20.
6. Landsberg G. S. Optics / G. S. Landsberg. Sixth edition., – Moscow : FIZMATGIZ, 2003. – 848 p.
7. Analysis of satellite systems for periodic Earth survey / V. K. Saulskii // Space research. – 2017. – Vol. 55. – No. 4. – P. 290 – 304.
8. Sobol I. M. Monte Carlo method / I. M. Sobol. – Moscow : Nauka, 1968. – 64 p.
9. Venttsel E. S. Operations research / E. S. Venttsel. – Moscow : Sovetskoe radio, 1972. – 552 p.

*Irina Iurevna Ilina, Deputy Head of Space Systems Research and Production Center 'Space complexes',  
tel. +7 (495) 623-57-74, e-mail: npk@hq.vniem.ru.  
(JC «VNIEM Corporation»).*