

УДК 629.783:551.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОГО ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

И. Ю. Ильина, В. К. Саульский

*Исследуется орбитальное построение системы из малых космических аппаратов, снабжаемых широкозахватными инфракрасными радиометрами, способными обнаруживать малоразмерные лесные пожары на ранней стадии их развития. Используется метод, в котором при оценке эффективности функционирования космической системы учитываются следующие показатели малоразмерных лесных пожаров: вероятность пропуска (не обнаружения) при заданном лимите времени, среднее время обнаружения, средняя площадь обнаруженных пожаров. Метод базируется на моделях, описывающих динамику роста площади малоразмерного лесного пожара во времени и процедуру его обнаружения с малого космического аппарата с учетом заданных характеристик инфракрасных радиометров, количества малых космических аппаратов в системе, высоты и наклона орбит, а также орбитальной структуры. На основе метода разработана процедура сравнения и выбора вариантов орбитального построения системы малых космических аппаратов, принципиальной особенностью которой является то, что в ней учитываются все перерывы обзора, возникающие в процессе работы системы малых космических аппаратов на всей территории лесной зоны России. Состав перерывов и частот их повторения определяется, используя компьютерную программу на базе «векторной модели обзора Земли». Ввиду того, что количество разных по длительности и частотам повторения перерывов, как правило, очень велико, практически невозможно обеспечить учет всех возникающих последовательностей их чередования. Поэтому для обеспечения расчетов и исследования орбитального построения системы малых космических аппаратов применяется метод статистических испытаний Монте-Карло, позволяющий отобрать из полного объема последовательностей перерывов обзора репрезентативное подмножество, достаточное для заданной точности вычислений.*

*Ключевые слова: орбитальная структура, широкозахватный инфракрасный радиометр, малоразмерный лесной пожар, векторная модель обзора Земли, метод Монте-Карло, число малых космических аппаратов, высота орбиты, лимитирующее время, вероятность пропуска малоразмерного лесного пожара, среднее время обнаружения малоразмерного лесного пожара, средняя площадь обнаруженного малоразмерного лесного пожара.*

### Введение

В статье [1] рассматривалось начало исследования орбитального построения перспективной спутниковой системы из малых космических аппаратов (МКА), оснащаемых бортовыми широкозахватными инфракрасными (ИК) радиометрами, способными обнаруживать малоразмерные лесные пожары (МЛП). Там был изложен метод расчета и выбора числа МКА в системе и высоты солнечно-синхронных орбит (ССО), на которых целесообразно поддерживать их непрерывное функционирование при наблюдении на всей площади лесов России.

Однако, в публикации [1] не удалось полностью реализовать предложенный метод. Дело в том, что для этого требовалось учитывать все перерывы обзора, возникающие в процессе функционирования космической системы на различных участках обширной лесной территории России. Ввиду чрезвычайно большого состава таких перерывов, число которых может достигать до нескольких тысяч, в публикации [1] вместо полной модели обнаружения МЛП была применена упрощенная схема, в которой учитывался единственный средний перерыв обзора.

В настоящей работе будет обеспечен учет всего ансамбля перерывов обзора, причем вместе с частотами их возникновения (повторения) на любой широте земного шара, а потому и на всей задаваемой области Земли. С этой целью будет применена компьютерная программа на основе аппарата век-

торной модели обзора Земли (ВМОЗ) [2 – 6]. Однако, требуется преодолеть еще одно затруднение, связанное с тем, что практически невозможно обеспечить перебор и использование для последующих вычислений огромного множества различных вариантов чередования перерывов обзора, а точнее всех возникающих в разных местах заданной области последовательностей перерывов обзора.

По-видимому, наиболее удобным способом устранения этого препятствия является использование известного метода статистических испытаний Монте-Карло [7]. С его помощью среди полных наборов последовательностей перерывов обзора будут отбираться их репрезентативные подмножества, достаточные для корректного исследования и оптимизации орбитального построения систем МКА, решающих задачу раннего обнаружения МЛП.

В данной статье сначала в сокращенном виде, но с уточнениями, излагается постановка задачи, модели и основные формулы из публикации [1], необходимые для вычисления показателей эффективности обнаружения МЛП и параметров, фиксирующих орбитальное построение космической системы. Затем дается новая процедура расчета и выбора орбитальных группировок МКА с применением ВМОЗ-программы и метода Монте-Карло. В конце статьи приводятся и анализируются результаты расчетов на основе этой процедуры.

## 1. Постановка задачи расчета орбитального построения системы малых космических аппаратов для обнаружения малоразмерных лесных пожаров

Развернутая постановка задачи по расчету и оптимизации орбитального построения МЛП, в отличие от недостаточно полной формулировки в публикации [1], состоит в следующем:

Дано:

- система из  $N_{\text{sat}}$  спутников, а точнее система из  $N_{\text{sat}}$  МКА, снабженных широкозахватными ИК-радиометрами типа МСУ-ИК-СРМ [8] для обнаружения МЛП;

- область наблюдения включает территорию России между  $42^\circ$  и  $70^\circ$  северной широты;

- МКА находятся на одинаковых круговых ССО с высотой  $h$  (км);

- ширина полосы захвата ИК-радиометра на земной поверхности зависит от высоты орбиты и определяется наибольшими углами визирования (от надира)  $\pm 59^\circ$  [8, 9];

- минимальная площадь  $\sigma(h)$  ( $\text{м}^2$ ) обнаружимого с высоты  $h$  в надире лесного пожара рассчитывается по формуле:

$$\sigma(h) = \sigma(510)h^2/510^2 = 25h^2/510^2, \quad (1)$$

где  $\sigma(510) = 25 \text{ м}^2$  – обнаружимая площадь МЛП в надире для радиометра МСУ-ИК-СРМ на высоте орбиты КА «Канопус-В-ИК», равной  $\sim 510$  км [8, 9];

- в каждой плоскости орбиты находится по  $M_{\text{ip}}$  спутников;

- орбитальная структура системы фиксируется по следующим формулам:

$$\Delta\lambda_j = d\lambda((j-1)\text{div}M_{\text{ip}}); \quad (2)$$

$$\Delta\tau_j = d\tau((j-1)\text{div}M_{\text{ip}}) + ((j-1)\text{mod}M_{\text{ip}})360/M_{\text{ip}}, \quad (3)$$

где  $j$  – порядковый номер МКА в системе из  $N_{\text{sat}}$  спутников, то есть  $j = 1, 2, \dots, N_{\text{sat}}$ ;  $\Delta\lambda_j$  – сдвиг долготы восходящего узла орбиты  $j$ -го МКА относительно восходящего узла орбиты первого МКА системы, точнее это разность долгот восходящих узлов  $j$ -го и 1-го МКА, град.;  $\Delta\tau_j$  – сдвиг фазы (аргумента широты)  $j$ -го МКА относительно фазы первого МКА системы, точнее это разность аргументов широты  $j$ -го и 1-го МКА, град.;  $d\lambda$  – фиксированный (для варианта структуры системы МКА) долготный сдвиг, град.;  $d\tau$  – фиксированный (для варианта структуры системы МКА) фазовый сдвиг, град.;  $a \text{ div } b$  – операция получения частного при це-

лочисленном делении  $a$  на  $b$ ;  $a \text{ mod } b$  – операция получения остатка при целочисленном делении  $a$  на  $b$ .

В настоящей работе будут рассматриваться системы МКА, в которых в каждой плоскости орбиты будет находиться по два спутника; это объясняется тем, что в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» относительно небольшие спутники типа «Канопус-В» выводятся на орбиты парами.

Учитывая, что космическая система МКА предназначена для оперативного обнаружения лесных пожаров в самые короткие сроки с моментов их возгораний, для оценки эффективности ее работы будут использоваться следующие показатели:

$P_{T_{\text{lim}}}$  – вероятность пропуска МЛП (не обнаружения МЛП) за лимитирующее время  $T_{\text{lim}}$  (ч), которое в данной работе будет иметь 9 значений в диапазоне от 1 до 5 ч через каждые 0,5 ч, то есть будут учитываться вероятности  $P_1, P_{1,5}, P_2, P_{2,5}, P_3, P_{3,5}, P_4, P_{4,5}, P_5$ ;

$T_{\text{mid}}$  – среднее время обнаружения МЛП, ч;

$S_{\text{mid}}$  – средняя площадь МЛП в момент его обнаружения,  $\text{м}^2$ .

Поскольку в настоящей работе будут рассматриваться 9 возможных значений лимита времени  $T_{\text{lim}}$ , введем еще один комплексный показатель  $P_{\text{mid}}$  в виде среднего значения от всех  $P_{T_{\text{lim}}}$ , рассчитываемого по формуле:

$$P_{\text{mid}} = \sum_{T_{\text{lim}}=1}^{T_{\text{lim}}=5} P_{T_{\text{lim}}} / 9. \quad (4)$$

Средняя вероятность  $P_{\text{mid}}$  пропуска МЛП играет роль главного показателя, который используется в роли критерия при оптимизации орбитальной структуры системы МКА.

Выбор значений лимита времени  $T_{\text{lim}}$  в пределах от 1 до 5 ч основан на том, что при более длительных сроках выявления МЛП его размеры становятся настолько большими, что тушение требует чрезмерно большого состава сил и средств [10, 11].

Итак, комплексный критерий  $P_{\text{mid}}$  в настоящей работе будет считаться главным. Это означает, что оптимальный состав параметров орбитального построения системы МКА, включающий число спутников  $N_{\text{sat}}$ , высоту ССО  $h$  и структуру системы, фиксируемую сдвигами по долготе  $d\lambda$  и фазе  $d\tau$ , требуется определять, добиваясь минимизации  $P_{\text{mid}}$ , хотя будут вычисляться и учитываться и все остальные показатели, приведенные выше.

Итак, требуется:

Обеспечить выбор орбитального построения системы МКА, предназначенной для оперативного

обнаружения МЛП на территории России, на основе минимизации главного критерия  $P_{mid}$ , стремясь, по возможности, минимизировать также и дополнительные показатели:  $T_{mid}$ ,  $S_{mid}$  и все  $P_{T_{lim}}$  при  $T_{lim} = 1, 1,5, 2, \dots, 5$  ч.

### 2. Рост площади лесного пожара с течением времени

В статье [1], используя ряд литературных источников [10 – 19], проведен подробный анализ факторов, влияющих на развитие лесного пожара. Они включали вид пожара, класс горимости лесных насаждений, класс пожарной опасности, скорость приземного ветра, размер начальной площади пожара и т. д. В результате анализа выведена следующая усредненная зависимость роста площади лесного пожара  $S$  во времени  $time$ :

$$S = S_{beg} + 1,32\sqrt{S_{beg}}V_{fr}time + 0,4356V_{fr}^2time^2, \quad (5)$$

где  $S$  и  $S_{beg}$  – текущая и начальная площади лесного пожара,  $m^2$ ;  $V_{fr}$  – скорость распространения фронтальной кромки пожара,  $m/ч$ ;  $time$  – время, ч.

Полагая, что скорость приземного ветра может варьировать от 0 до 8 м/с, устанавливаем по графикам из официальных документов МЧС России [10, 11] следующий диапазон скоростей фронта МЛП:

$$V_{fr} = 5 \div 100, \text{ м/ч}, \quad (6)$$

который и будет использоваться при расчетах по формуле (5).

### 3. Зависимость обнаружимой площади малоразмерных лесных пожаров от высоты орбиты и угла визирования

Полоса захвата бортового ИК-радиометра состоит из 5000 пикселей: по 2500 пикселей влево и вправо от надира. Введем обозначение для количества пикселей на полуполосе захвата:

$$N_{pixel} = 2500. \quad (7)$$

Для решения поставленной выше задачи требуется учитывать, как изменяется минимальная обнаружимая площадь  $\sigma(h, w)$  МЛП в зависимости от высоты орбиты  $h$  и угла визирования  $w$  вдоль полосы захвата бортового ИК-радиометра.

На рис. 1 показана геометрия сканирования пикселей вдоль полосы захвата ИК-радиометра. Видно, что размер проекции пикселя на земной поверхности растет при удалении от надира за счет увеличения угла визирования  $w$  и дальности  $f$ .

Используя картину на рис. 1, в работе [1] получены следующие формулы:

$$z = \sin^{-1}(\sin w(R_e + h)/R_e), \quad (8)$$

где  $R_e = 6371$  км – средний радиус Земли;

$$b = z - w, \quad (9)$$

центральный угол  $b$  однозначно связан с расстоянием  $B$  по земной поверхности от точки надира до точки под углом визирования  $w$ :

$$B = bR_e, \text{ км}; \quad (10)$$

здесь угол  $b$  выражен в рад

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

С помощью соотношений (8), (9) и (11) определяются коэффициент роста линейного масштаба  $K_1$  и коэффициент роста площади проекции пикселя  $K_2$ :

$$K_1 = f/(h \cos z) = R_e \sin b / (h \sin w \cos z); \quad (12)$$

$$K_2 = K_1 f = (R_e \sin b / (h \sin w))^2 / \cos z. \quad (13)$$

Предполагая инвариантность излучения МЛП по разным направлениям, то есть его соответствие закону Ламберта [20], минимально обнаружимая площадь  $\sigma(h, w)$  МЛП возрастает (от надира) пропорционально коэффициенту  $K_2$ , вычисляемому по формуле (13). Следовательно, для МКА с широкозахватным ИК-радиометром изменение минимальной обнаружимой площади лесного пожара  $\sigma(h, w)$ , измеряемой в  $m^2$ , вычисляется по следующей формуле, в которой учтено соотношение (1):

$$\sigma(h, w) = K_2 \sigma(510) h^2 / 510^2 = 25 K_2 h^2 / 510^2. \quad (14)$$

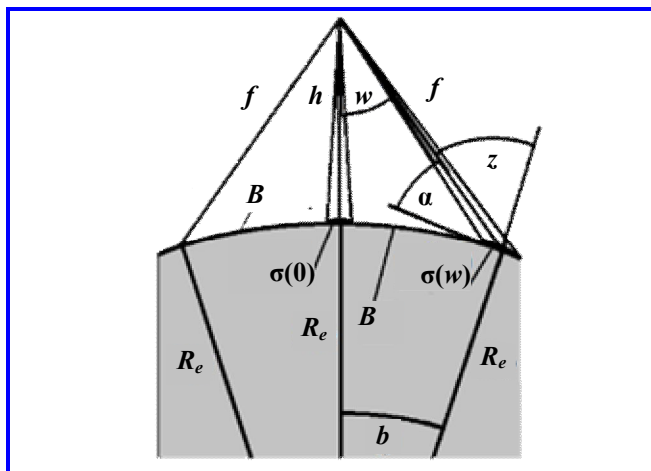


Рис. 1. К выводу формул для расчета роста проекции пикселя  $\sigma(w)$  на поверхности Земли при увеличении угла визирования  $w$



По формуле (14) можно рассчитать наибольшее значение минимальной обнаружимой площади МЛП для высоты  $h$  на краю полосы захвата  $\sigma_{\max}(h)$ :

$$\sigma_{\max}(h) = K_2(w_{\max})25h^2/510^2. \quad (15)$$

#### 4. Модель процесса обнаружения малоразмерных лесных пожаров системой спутников

Начинаем разработку процедуры сравнения различных вариантов космических систем МКА, предназначенных для обнаружения МЛП. Рассмотрим, в какой момент может быть выявлен лесной пожар из последовательности моментов его попаданий в полосы захвата спутников системы. Последовательность состоит из перерывов обзора. Строим модель процесса обнаружения МЛП системой спутников.

На рис. 2 в схематичном виде представлен процесс развития МЛП, достигшего площади  $S_{\text{beg}}$  в момент времени  $x$  после начала очередного перерыва обзора  $t_1$ , который на рис. 1 является 1-ым.  $S_{\text{beg}}$  – это минимальная площадь МЛП, обнаружимая в надире с нижней высоты из рассматриваемого диапазона высот орбит. С ростом времени  $\text{time}$  площадь  $S$  пожара ускоренно растет. В частности, в момент завершения очередного перерыва  $t_j$  она равна  $S_j$ , а в конце последнего перерыва  $t_J$  на рис. 1 достигает  $S_J$ .

Последовательность перерывов обзора  $t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_J$  фиксирует моменты, когда МЛП попадает в полосы захвата спутников системы, а потому и может быть обнаружен в эти моменты. Обнаружение состоится, если его площадь  $S_j$  в момент наблюдения окажется не меньше минимальной обнаружимой площади  $\sigma(h, w)$ .

Вероятность попадания МЛП в какой-нибудь пиксель из набора  $N_{\text{pixel}}$  пикселей на полуполосе захвата (при углах визирования  $w$  от 0 до  $w_{\max}$ ) одинакова и равна  $1/N_{\text{pixel}}$ . Угол визирования изменяется вдоль полосы захвата дискретно. Для пары пикселей, один из которых находится слева от надира, а другой – справа, и имеющих одинаковые номера  $n$ , перечисляемые по росту номера по мере удаления от надирного пикселя налево или направо, угол визирования  $w(n)$  один и тот же по абсолютной величине.

Ключевым для разработки процедуры расчета систем МКА для обнаружения МЛП является определение условной вероятности  $P_j$  выявления МЛП в момент завершения перерыва  $t_j$  при условии, что до этого данный МЛП еще не удалось обнаружить.

Приступаем к выводу соотношений, помогающих вычислить  $P_j$ . Сначала введем сокращенное выражение для расчета площади пожара, используя формулу (5):

$$S = \text{square}(\text{time}) = 0,04 \left( 5\sqrt{S_{\text{beg}}} + 3,3V_{fr} \cdot \text{time} \right)^2. \quad (16)$$

С помощью обозначения (16) представляем площадь  $S_j$  на рис. 2 в следующем виде:

$$S_j = \text{square}(T_j), \quad j = 1, 2, 3, \dots, J; \quad (17)$$

$$w(n) = w_{\max}n/N_{\text{pixel}}, \quad (18)$$

где

$$T_j = \text{time}_j = \left( \sum_{m=1}^{m=j} t_m \right) - x. \quad (19)$$

Далее введем сокращенное выражение для определения минимальной обнаружимой площади пожара при фиксированной высоте орбиты  $h$ :

$$\sigma(h, w) = \text{func}(w), \quad h = \text{const}, \quad (20)$$

где  $\text{func}(w)$  – функция, эквивалентная соотношениям (8), (9), (11), (13), (14) для расчета минимально обнаружимой площади  $\sigma(h, w)$  пожара под углом  $w$  на высоте орбиты  $h$ .

Учитывая фиксированное количество пикселей  $N_{\text{pixel}}$ , возникает дискретный набор значений  $\sigma(n)$ , соответствующих пикселям с номерами  $n = 0, 1, 2, \dots, N_{\text{pixel}}$ . Используя (20), получаем условие обнаружения МЛП с площадью  $S_j$  на пикселе с номером  $n$ :

$$S_j \geq \text{func}(n\delta), \quad (21)$$

где

$$\delta = w_{\max}/N_{\text{pixel}}. \quad (22)$$

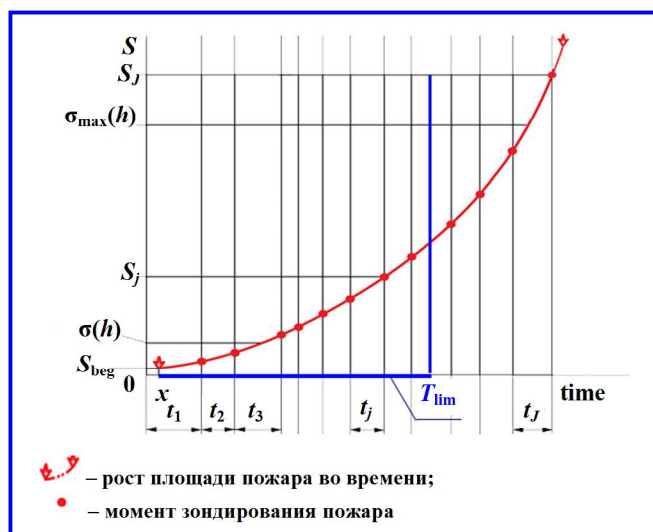


Рис. 2. Модель обнаружения лесного пожара в  $j$ -й по очереди момент его попадания в зону захвата одного из спутников системы

Учитывая (21) и (22), несложно убедиться, что наибольший номер  $n_j$  для перечня пикселей, на которых обнаруживается МЛП с площадью  $S_j$ , равен:

$$n_j = E(\text{func}^{-1}(S_j)/\delta), \quad (23)$$

где целочисленная функция  $E(a)$  равна наибольшему целому числу, не превосходящему ее аргумент  $a$ , а  $\text{func}^{-1}$  обозначает функцию, обратную к  $\text{func}$  из (20), то есть обратную к итоговому результату вычислений по совокупности формул (8), (9), (11), (13), (14).

В результате получена область пикселей, а точнее их номеров, перечисляемых от надира, на котором реализуется обнаружение МЛП с площадью  $S_j$ :

$$n = 0, 1, 2, \dots, n_j. \quad (24)$$

Используя (23), (24) и (22), находим искомую условную вероятность  $P_j$  выявления МЛП в момент завершения перерыва  $t_j$  при условии, что до этого еще не удалось обнаружить данный МЛП во все предыдущие моменты его попадания в полосы захвата МКА системы:

$$P_j = n_j/N_{\text{pixel}} = E(\text{func}^{-1}(S_j)/\delta)/N_{\text{pixel}}. \quad (25)$$

В этой формуле площадь лесного пожара  $S_j$  рассчитывается, используя (17) и (19).

Поясним, как определять и применять обратную функцию  $\text{func}^{-1}$  в формуле (25).

Вычисляя  $\text{func}(n\delta)$ , то есть проводя расчеты по формулам (8), (9), (11), (13), (14), а также (22), заполняется массив из пар значений  $n$  и  $\text{func}(n\delta)$  от  $n = 0$  вплоть до  $n = N_{\text{pixel}}$ . Из этого массива по значению площади  $S_j$  можно выбрать соответствующий ей номер  $n_j$ .

Безусловная вероятность  $F_j$  того, что именно в конце перерыва  $t_j$  произойдет обнаружение МЛП, может быть определена по следующей формуле:

$$F_j = P_j \prod_{m=1}^{m=j-1} (1 - P_m). \quad (26)$$

Вернемся еще раз к рис. 2. На нем отмечен предельный уровень минимально обнаружимой площади  $\sigma_{\text{max}}(h)$  на краю полосы захвата. По формуле (20):

$$\sigma_{\text{max}}(h) = \text{func}(w_{\text{max}}). \quad (27)$$

Выше на рис. 2 находится площадь пожара  $S_j$ , рассчитываемая из соотношений (17) и (19) в конце перерыва  $t_j$ . Очевидно, в этот момент МЛП выявляется

обязательно, если это не случилось при завершении какого-либо из предыдущих перерывов обзора.

В соотношениях (17) и (19) фигурирует время  $x$ . Все значения  $x$  в интервале от 0 до  $t_1$  равновероятны.

### 5. Процедура расчета вариантов космической системы с применением ВМОЗ-программы и метода Монте-Карло

В работе [1] и введении к настоящей статье уже отмечалось, что для реализации модели обнаружения МЛП требуется использовать все последовательности перерывов обзора, возникающие на заданной области Земли. Однако, количество таких перерывов, как правило, слишком велико и может измеряться тысячами [6]. Состав формируемых из них последовательностей перерывов обзора с учетом их частот еще во много раз больше, поэтому проведение расчетов на основе огромного множества подобных последовательностей практически нереально.

Тем не менее, с помощью метода статистических испытаний Монте-Карло [7], можно, используя датчик случайных чисел, выделить репрезентативную выборку, включающую  $K_{\text{set}}$  наборов, в каждом из которых присутствуют последовательности перерывов обзора для каждой скорости фронта МЛП из диапазона (6) на каждой широте заданной области Земли. Выборка должна быть достаточно большой, чтобы обеспечить определение всех показателей эффективности с высокой точностью. Суммарное количество  $N_{\text{el}}$  элементов (последовательностей перерывов обзора) в выборке равно количеству наборов  $K_{\text{set}}$ , умноженному на число скоростей фронта МЛП и на количество широт, на которые разбивается область Земли. Согласно [7], с ростом  $K_{\text{set}}$  конечные ошибки расчетов будут постепенно уменьшаться пропорционально  $\sqrt{N_{\text{el}}}$ .

Процедура расчета и выбора вариантов системы МКА с применением ВМОЗ-программы и метода Монте-Карло состоит, как и в статье [1], из 2-х стадий, но теперь их содержание иное.

Стадия 1. С помощью компьютерной ВМОЗ-программы выполняется расчет всех перерывов обзора вместе с частотами их повторения для всех широт заданной области Земли, перечисляемых с малым шагом, например,  $1^\circ$ . Результаты записываются в специальный массив для дальнейшего применения на 2-й стадии.

Стадия 2. Раз за разом реализуется один и тот же блок операций, фиксируемых номерами  $K = 1, 2, 3, \dots$  до тех пор, пока не выполнится условие их завершения, которое будет выведено в конце изложения стадии 2.

В рамках указанного блока для каждой из широт заданной области Земли, перебираемых с тем же

шагом, что и на стадии 1, и для каждой из скоростей фронта лесного пожара из диапазона (6), перечисляемых с малым шагом (например, 1 м/ч), с помощью датчика случайных чисел формируется последовательность перерывов обзора. Каждый следующий перерыв выбирается (для данной последовательности) из массива, заполненного на стадии 1, используя срабатывание этого датчика.

Для очередной последовательности выполняются следующие действия.

Для 1-го перерыва  $t_1$ , начиная с которого формируется последовательность перерывов обзора  $t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_J$ , вновь используя датчик случайных чисел, определяется промежуток времени  $x$  от начала  $t_1$  (на модели, изображенной на рис. 2) до момента, когда площадь лесного пожара достигает уровня  $S_{\text{beg}}$  и далее пойдет отсчет времени до обнаружения МЛП. Считается, что все значения  $x$  на полуоткрытом интервале  $[0, t_1)$  равновероятны.

Затем на момент завершения каждого перерыва  $t_j$ , включая и самый 1-й из них, вычисляются:

– истекшее время от момента  $x$  (на 1-м перерыве  $t_1$ ) до окончания перерыва  $t_j$ :

$$T_j = \text{time}_j = \left( \sum_{m=1}^{m=j} t_m \right) - x; \quad (28)$$

– достигнутая при этом площадь МЛП:

$$S_j = \text{square}(T_j); \quad (29)$$

– вероятность  $F_j$  обнаружения МЛП, вычисляемая по формулам (22), (23), (25), (26);

– обнаружимая площадь  $\sigma_{\text{max}}(h)$  на краю полосы захвата, вычисляемая по формуле (27);

– показатели эффективности  $P_{T_{\text{lim}}}$ , то есть значения вероятностей пропуска (не обнаружения) МЛП при различных лимитах времени  $T_{\text{lim}}$ ; говоря конкретнее, это все вероятности  $P_1, P_{1,5}, P_2, P_{2,5}, P_3, P_{3,5}, P_4, P_{4,5}, P_5$  из постановки задачи:

$$P_{T_{\text{lim}}} = 1 - \sum_{m=1}^{m=j} F_j \text{ при } T_j \leq T_{\text{lim}} < T_{j+1} \\ T_{\text{lim}} = 1, 1,5, 2, \dots, 5 \text{ ч}; \quad (30)$$

– среднее время обнаружения МЛП:

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

– средняя площадь МЛП в момент его обнаружения:

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

– главный показатель эффективности, то есть средняя вероятность  $P_{\text{mid}}$  пропуска МЛП, определяемая по формуле (4).

Последний перерыв  $t_J$ , включаемый в последовательность перерывов обзора, появляется, когда, как можно установить по модели на рис. 2, выполняется неравенство

$$S_J \geq \sigma_{\text{max}}(h). \quad (33)$$

После этого определяются средние значения для всех показателей эффективности, определенных по формулам (30) – (32) на каждом из реализованных блоков вычислений.

Далее выведем анонсированное выше условие завершения расчета блоков операций.

Генерируемые наборы последовательностей (для блоков операций на стадии 2) можно обозначать номерами  $K = 1, 2, 3, \dots$  по порядку их появления. Будем рассматривать два ряда наборов последовательностей, в 1-ом из которых будут учитываться только нечетные номера  $2K + 1$ , а во 2-ом – четные, то есть  $2K$ . Для каждого ряда (в отдельности) проводятся все вычисления на блоках стадии 2, получая значения показателей эффективности, обозначаемые следующим образом:

$$P_{T_{\text{lim}}}(2K + 1) \text{ при всех } T_{\text{lim}} = 1, 1,5, \dots, 5 \text{ ч}, \\ T_{\text{mid}}(2K + 1), S_{\text{mid}}(2K + 1), P_{\text{mid}}(2K + 1); \quad (34)$$

$$P_{T_{\text{lim}}}(2K) \text{ при всех } T_{\text{lim}} = 1, 1,5, \dots, 5 \text{ ч}, \\ T_{\text{mid}}(2K), S_{\text{mid}}(2K), P_{\text{mid}}(2K). \quad (35)$$

Обозначим через  $\delta(K)$  максимальную разность среди всех абсолютных величин разностей вероятностей  $P_{T_{\text{lim}}}(2K + 1)$  и  $P_{T_{\text{lim}}}(2K)$ :

$$\delta(K) = \max_{T_{\text{lim}}=1, 1,5, \dots, 5 \text{ ч}} (|P_{T_{\text{lim}}}(2K + 1) - P_{T_{\text{lim}}}(2K)|), \quad (36)$$

Выделение новых наборов последовательностей, а потому и проведение блоков расчетов завершается, когда выполнено следующее условие:

$$\delta(K) < \delta_{\text{max}}, \quad (37)$$

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

Далее определяется конечная величина каждого показателя эффективности в виде полусуммы его значений (34) и (35), полученных в обоих рядах блоков вычислений.

Очевидно, что число  $K$  блоков расчетов совпадает с количеством  $K_{set}$  наборов последовательностей перерывов обзора, использованных в этих блоках.

Предельная ошибка  $\delta_{max}$  при расчетах в настоящей статье задавалась на уровне 0,01. Кроме того, фиксировалось минимально допустимое количество  $K_{set}$  наборов последовательностей, принятое равным 100. Общее количество используемых последовательностей перерывов обзора  $N_{el}$  варьировало в интервале от 300 000 до 1 000 000, а суммарное число срабатываний датчика случайных чисел измерялось многими миллионами.

Множество пробных расчетов, проделанных при разных сочетаниях значений  $\delta_{max}$  и  $K_{set}$ , показало достаточность пары  $\delta_{max} = 0,01$  и  $K_{set} = 100$ , так как основные показатели  $P_{T_{lim}}$  приобретали в этом случае лишь небольшие различия не ранее 3-й значащей цифры.

### 6. Результаты расчетов

Реализуя приведенную в предыдущем разделе процедуру, были выполнены расчеты различных вариантов орбитального построения систем МКА для оперативного обнаружения МЛП на территории лесов России. Рассматривались следующие исходные данные в соответствии с постановкой задачи:

- диапазон широт области наблюдения на Земле:  $42^\circ \div 70^\circ$ , шаг по широтам  $1^\circ$ ;
- число МКА в космической системе  $N_{sat}$ :  $2 \div 20$ , шаг 2;
- число МКА в одной плоскости орбиты  $M_{ip} = 2$ ;
- диапазон высот  $h$  круговых ССО:  $250 \div 1000$  км, шаг 50 км;
- диапазон долготных сдвигов  $d\lambda$ :  $0 \div 90^\circ$ , шаг  $1^\circ$ ;
- диапазон фазовых сдвигов  $d\tau$ :  $0 \div 360^\circ$ , шаг  $5^\circ$ ;
- наибольшие углы визирования МЛП (от надира):  $\pm 59^\circ$ ;
- площадь  $\sigma(h)$  обнаружимого в надире МЛП рассчитывалась по формуле (1);
- площадь лесного пожара, после достижения которой начинается отсчет времени до момента его обнаружения, определена по формуле (1) для самой низкой высоты орбиты в 250 км и составила  $S_{beg} = 6 \text{ м}^2$ .

Не представляется возможным дать в настоящей статье весь объем полученных результатов расчетов. Наиболее значимые из них содержатся в табл. 1 – 4.

В табл. 1 приведены оптимальные наборы параметров орбитального построения систем МКА, обеспечивающие минимизацию главного показателя  $P_{mid}$  при различных количествах МКА в системе. Каждый набор включает число спутников  $N_{sat}$ , высоту круговой ССО  $h$  и углы  $d\lambda$  и  $d\tau$ , фиксирующие спутниковую структуру.

Таблица 1

Лучшие системы малоразмерных лесных пожаров по главному показателю  $P_{mid}$

$N_{sat}$	$h$ , км	$d\lambda$	$d\tau$	$P_{mid}$	$T_{mid}$ , ч	$S_{mid}$ , кв. м	$P_1$	$P_{1,5}$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
2	1000	–	–	0,225	2,01	9940	0,506	0,319	0,244	0,180	0,148	0,123
4	1000	$90^\circ$	$70^\circ$	0,107	1,16	1750	0,431	0,222	0,130	0,048	0,014	0,004
6	950	$65^\circ$	$260^\circ$	0,069	0,94	1020	0,348	0,142	0,068	0,016	0,003	0,001
	1000	$62^\circ$	$80^\circ$	–    –	0,94	970	0,342	0,140	0,070	0,017	0,003	0,001
8	750	$48^\circ$	$250^\circ$	0,048	0,83	870	0,266	0,100	0,041	0,007	0,001	0
10	650	$39^\circ$	$340^\circ$	0,034	0,76	805	0,193	0,074	0,024	0,003	0	0
	700	$39^\circ$	$25^\circ$	–    –	0,77	770	0,191	0,076	0,026	0,003	0	0
12	550	$33^\circ$	$170^\circ$	0,024	0,68	695	0,147	0,051	0,013	0,001	0	0
	600	$33^\circ$	$345^\circ$	–    –	0,70	700	0,147	0,049	0,015	0,001	0	0
14	500	$28^\circ$	$350^\circ$	0,017	0,63	630	0,109	0,034	0,008	0	0	0
	550	$28^\circ$	$195^\circ$	–    –	0,66	635	0,107	0,037	0,010	0,001	0	0
16	450	$25^\circ$	$345^\circ$	0,013	0,61	610	0,082	0,025	0,005	0	0	0
	500	$25^\circ$	$10^\circ$	–    –	0,63	615	0,082	0,027	0,006	0	0	0
18	400	$22^\circ$	$155^\circ$	0,009	0,54	505	0,067	0,015	0,002	0	0	0
	450	$22^\circ$	$190^\circ$	–    –	0,59	570	0,063	0,018	0,003	0	0	0
20	400	$20^\circ$	$165^\circ$	0,007	0,55	530	0,049	0,012	0,002	0	0	0



Анализируя табл. 1, можно сделать несколько выводов. Видно, что с повышением количества МКА оптимальная высота орбиты понижается от 1000 км при  $N_{\text{sat}} = 2 \div 6$  до 400 км при  $N_{\text{sat}} = 20$ .

Долготный сдвиг  $d\lambda$  с ростом числа МКА также уменьшается от  $90^\circ$  при  $N_{\text{sat}} = 2$  до  $20^\circ$  при  $N_{\text{sat}} = 20$ , причем его приближенное значение при количестве спутников, равном или превышающем 6, можно рассчитать по формуле

$$d\lambda \approx 360/N_{\text{sat}} + 36/(N_{\text{sat}} + 2).$$

Фазовый сдвиг  $d\tau$  принимает различные значения, не подчиняясь какой-либо закономерности в зависимости от количества МКА в системе.

Для системы из 6-ти спутников и больше, среднее время  $T_{\text{mid}}$  обнаружения лесного пожара становится ниже 1 ч, а средняя площадь  $S_{\text{mid}}$  обнаруженного МЛП – меньше  $1000 \text{ м}^2$ . Такие величины, по-видимому, можно признать приемлемыми на практике.

При 6-ти спутниках в системе значения средней вероятности пропуска лесного пожара  $P_{\text{mid}}$  и отдельных вероятностей  $P_1, P_{1,5}, P_2, P_{2,5}, P_3$  довольно большие, а оптимальная высота орбиты чрезмерно велика:  $\sim 1000$  км.

Для системы из 8-ми спутников главный показатель  $P_{\text{mid}}$  становится уже меньше 0,05; при этом все вероятности  $P_{T_{\text{lim}}}$ , за исключением  $P_1 = 0,266$ , сокращаются до 0,1 и ниже. Такой уровень, вероятно, можно считать вполне достаточным для

практических целей, так как он соответствует более 90% лесных пожаров, обнаруживаемых уже за лимитирующее время  $T_{\text{lim}} \geq 1,5$  ч. Оптимальная высота орбиты, равная 750 км, оказалась при 8-ми спутниках существенно меньше, чем для  $N_{\text{sat}} = 6$ .

При 10-ти МКА на высоте 650 км  $P_{\text{mid}} = 0,034$ ;  $P_1 = 0,193$ ,  $P_{1,5} = 0,074$ ,  $P_2 = 0,024$ ,  $P_3 = 0,003$ , а при лимитах времени  $T_{\text{lim}} = 4$  и 5 ч соответствующие вероятности  $P_{T_{\text{lim}}} = 0$ .

Системы из 12-ти и более спутников обеспечивают дальнейшее постепенное уменьшение абсолютно всех показателей эффективности, но его темп, как представляется, не настолько значителен, чтобы оправдать рост числа МКА.

Основываясь на данных в табл. 1 и учитывая сделанные выше выводы, можно рекомендовать создание систем для оперативного обнаружения МЛП из 8-ми или 10-ти МКА на орбитах с высотами соответственно 750 и 650 км.

Далее рассмотрим результаты расчетов в табл. 2. В ней представлены минимально достижимые, то есть оптимальные значения для каждой вероятности  $P_1, P_{1,5}, P_2, \dots, P_5$ , пропуска МЛП за времена лимита  $T_{\text{lim}}$ . Это означает, что оптимальная величина любого из данных показателей достигается для спутниковой структуры, оптимизирующей именно и только данный показатель. Структура фиксируется парой конкретных сдвигов  $d\lambda$  и  $d\tau$ , но их слишком сложно явно отобразить в этой таблице.

Таблица 2

**Оптимальные значения вероятностей  $P_{T_{\text{lim}}}$ , то есть  $P_1, P_{1,5}, P_2, P_{2,5}, P_3, P_{3,5}, P_4, P_{4,5}, P_5$ , и высот орбит  $h$ , на которых они достигаются**

$N_{\text{sat}}$	$P_1/h$	$P_{1,5}/h$	$P_2/h$	$P_3/h$	$P_4/h$	$P_5/h$
2	$\frac{0,440}{600 - 700}$	$\frac{0,319}{1000}$	$\frac{0,244}{1000}$	$\frac{0,180}{1000}$	$\frac{0,148}{1000}$	$\frac{0,123}{1000}$
4	$\frac{0,272}{600}$	$\frac{0,205}{1000}$	$\frac{0,124}{1000}$	$\frac{0,047}{1000}$	$\frac{0,014}{1000}$	$\frac{0,004}{1000}$
6	$\frac{0,210}{450}$	$\frac{0,140}{1000}$	$\frac{0,068}{950}$	$\frac{0,016}{850 - 950}$	$\frac{0,003}{800 - 1000}$	$\frac{0}{950 - 1000}$
8	$\frac{0,166}{400}$	$\frac{0,097}{800}$	$\frac{0,040}{700 - 750}$	$\frac{0,006}{600 - 700}$	$\frac{0}{300}$	$\frac{0}{250 - 1000}$
10	$\frac{0,138}{400}$	$\frac{0,063}{650}$	$\frac{0,021}{600}$	$\frac{0,002}{250 - 600}$	$\frac{0}{250 - 1000}$	$\frac{0}{250 - 1000}$
12	$\frac{0,117}{350}$	$\frac{0,040}{550}$	$\frac{0,011}{500}$	$\frac{0}{250 - 300}$	$\frac{0}{250 - 1000}$	$\frac{0}{250 - 1000}$
14	$\frac{0,101}{350}$	$\frac{0,026}{450}$	$\frac{0,006}{350 - 450}$	$\frac{0}{250 - 500}$	$\frac{0}{250 - 1000}$	$\frac{0}{250 - 1000}$
16	$\frac{0,082}{450 - 500}$	$\frac{0,017}{400}$	$\frac{0,003}{250 - 350}$	$\frac{0}{250 - 600}$	$\frac{0}{250 - 1000}$	$\frac{0}{250 - 1000}$
18	$\frac{0,063}{450}$	$\frac{0,011}{300 - 350}$	$\frac{0,001}{250 - 300}$	$\frac{0}{250 - 700}$	$\frac{0}{250 - 1000}$	$\frac{0}{250 - 1000}$
20	$\frac{0,048}{400}$	$\frac{0,007}{300 - 350}$	$\frac{0,001}{250 - 350}$	$\frac{0}{250 - 750}$	$\frac{0}{250 - 1000}$	$\frac{0}{250 - 1000}$



Красным цветом в табл. 2 выделены сочетания минимального числа спутников и высот орбит, когда обеспечивается стопроцентное обнаружение МЛП за лимитирующее время  $T_{lim}$ , а синим – когда это реализуется сразу во всем интервале высот от 250 до 1000 км.

Как и при анализе табл. 1, можно убедиться, что в табл. 2 оптимальные высоты орбит уменьшаются по мере увеличения числа спутников в системе. При этом наилучшие высоты для вероятности  $P_1$  изменяются при разных числах МКА в более узком диапазоне по сравнению с любой из остальных вероятностей  $P_{T_{lim}}$ .

Оптимальные вероятности  $P_1, P_{1,5}, P_2, P_{2,5}, P_3, P_{3,5}, P_4, P_{4,5}, P_5$  в табл. 2 почти совпадают с их значениями в табл. 1, когда число МКА находится в пределах от 2-х до 8-ми МКА, и немного больше различаются при 10-ти МКА. Однако, вероятность  $P_1$  в табл. 1 оказалась существенно хуже ее оптимальных величин в табл. 2 при тех же числах спутников. С другой стороны, по мере дальнейшего увеличения количества МКА значения  $P_1$  в обеих таблицах постепенно сближаются, но остальные вероятности при этом, наоборот, расходятся.

В целом, заканчивая анализ табл. 2, можно подтвердить вывод, сделанный ранее по табл. 1, о практической целесообразности создания системы из 8-ми или 10-ти МКА, учитывая близость значений в обеих таблицах соответствующих вероятностей  $P_{T_{lim}}$ , за исключением  $P_1$ , а также относительно невысокие оптимальные орбиты.

Далее рассмотрим табл. 3, в которой приведены оптимальные показатели  $T_{mid}$  и  $S_{mid}$ , реализуемые при соответствующих сочетаниях числа МКА, высоты орбиты и пар структурных углов, которые, как и в табл. 2, технически сложно явно отобразить в данной таблице.

Первый вывод, который можно сделать, рассматривая эту таблицу, заключается в том, что с ростом количества спутников оптимальные высоты понижаются, как это наблюдалось и при изучении предыдущих табл. 1 и 2. Для среднего времени  $T_{mid}$  обнаружения МЛП это уменьшение происходит быстрее, чем для средней площади  $S_{mid}$  обнаруженного пожара.

Оптимальные значения среднего времени  $T_{mid}$  обнаружения лесного пожара в табл. 3 очень мало отличаются от величин того же показателя в табл. 1 в диапазоне чисел спутников от 2-х до 8-ми, а начиная с 10-ти МКА, разница значений  $T_{mid}$  в рассматриваемых таблицах становится весьма замет-

ной. Оптимальные значения средней площади  $S_{mid}$  обнаруживаемого МЛП в табл. 3 близки к значениям этой площади в табл. 1 вплоть до  $N_{sat} = 6$ , а затем с ростом числа спутников все больше расходятся.

Таким образом, можно считать, что оптимальные величины показателей  $T_{mid}$  и  $S_{mid}$  в табл. 1 и 3 лучше всего совпадают при 6-ти спутниках в системе.

Сравним значения тех же показателей в табл. 1 и 3 для системы из 8-ми спутников. Выше отмечено, что среднее время  $T_{mid}$  в этом случае почти не отличается в обеих таблицах. В табл. 1 средняя площадь  $S_{mid} = 870 \text{ м}^2$ ; она оказалась больше оптимальной  $S_{mid} = 742 \text{ м}^2$  в табл. 3 примерно на 17%, но практически не слишком велика и существенно меньше уровня в  $\sim 1000 \text{ м}^2$ , оптимально достигаемого при 6-ти спутниках в табл. 3.

На основе анализа табл. 3 напрашивается вывод о практической целесообразности создания группировки из 6-ти или 8-ми спутников.

По результатам анализа всех трех табл. 1 – 3 можно рекомендовать создание системы из 8-ми МКА для оперативного обнаружения МЛП.

Рассмотрим табл. 4. Здесь содержатся диапазоны высот орбит, на которых можно добиться обнаружения МЛП с вероятностью не хуже 0,99 для разных лимитов времени  $T_{lim}$  при различных числах спутников в системе. Столь высокая вероятность практически эквивалентна полному выявлению МЛП за заданное время из интервала значений  $T_{lim}$  от 1 до 5 ч.

Таблица 3

**Оптимальные значения среднего времени обнаружения  $T_{mid}$  и средней площади  $S_{mid}$  выявленного малоразмерного лесного пожара, а также высоты орбит  $h$ , на которых они достигаются**

$N_{sat}$	$T_{mid}/h$ (ч/км)	$S_{mid}/h$ ( $\text{м}^2/\text{км}$ )
2	2,01/1000	9944/1000
4	1,15/1000	1717/1000
6	0,94/950 – 1000	973/1000
8	0,82/650 – 800	742/1000
10	0,72/600 – 650	604/1000
12	0,65/500 – 600	499/1000
14	0,59/500 – 550	449/1000
16	0,55/400 – 550	393/850
18	0,51/400 – 500	349/700
20	0,48/350 – 500	316/700

Таблица 4

**Высоты орбит, на которых обеспечиваются  $P_{\text{лим}} \leq 0,01$ , то есть обнаружение малоразмерных лесных пожаров с вероятностью не менее 99%, при оптимальном выборе структуры системы малых космических аппаратов**

Число МКА	Допустимое время обнаружения лесного пожара $T_{\text{лим}}$ , ч					
	1	1,5	2	3	4	5
4						900 – 1000
6					500 – 1000	250 – 1000
8				450 – 900	250 – 1000	
10				250 – 1000		
12						
14			250 – 550			
16			250 – 650			
18			250 – 1000			
20		250 – 400				

Согласно данным в табл. 4 почти полное обнаружение всех МЛП за 1 ч не удастся реализовать даже при 20-ти спутниках в системе. Обнаружение МЛП за 1,5 ч достижимо только при 20 МКА.

За 2 ч обнаружение МЛП с вероятностью 99% возможно обеспечить, используя весьма крупную группировку, состоящую из 14-ти МКА.

При сокращении лимита времени до 3 ч требуется уже вполне приемлемая на практике система из 8-ми МКА. Предельное время 3 ч для обнаружения МЛП, скорее всего, окажется соответствующим ожиданиям МЧС России в современных условиях.

Для лимитирующего времени в 4 ч число МКА снижается до 6-ти, а для лимита в 5 ч достаточно использовать всего лишь 4 спутника.

Подводя итог анализу результатов расчетов, представленных в табл. 1 – 4, можно предложить создание системы из 8-ми МКА, снабжаемых бортовыми широкозахватными ИК-радиометрами типа МСУ-ИК-СРМ и выводимых попарно на орбиты с высотой ~750 км.

### Выводы

1. Разработана процедура расчета и оптимизации системы МКА для оперативного обнаружения МЛП, базирующаяся на следующих составляющих:

– на моделях из [1], описывающих динамику развития МЛП и процесс его детектирования системой МКА;

– на компьютерной ВМОЗ-программе для определения всех перерывов обзора вместе с частотами их повторения на заданной области Земли;

– на методе Монте-Карло для получения репрезентативной выборки из общего множества последовательностей перерывов обзора, достаточной для

корректного расчета параметров орбитального построения группировки МКА.

2. Проведен большой объем расчетов различных вариантов орбитального построения систем МКА; основные результаты представлены в таблицах, позволяющих выбирать ключевые параметры группировки МКА, используя различные показатели эффективности.

3. Рекомендовано создание системы из 8-ми МКА на круговых ССО с высотой около 750 км.

### Литература

1. Разработка метода расчета числа спутников и высоты орбит для космической системы обнаружения малоразмерных лесных пожаров / И. Ю. Ильина, В. К. Саульский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2021. – Т. 183. – № 4. – С. 26 – 43.
2. Векторный метод синтеза орбит и структуры систем спутников для многополосного обзора Земли / В. К. Саульский // Космические исследования. – 2016. – Т. 54 – № 4. – С. 334 – 346.
3. Анализ систем спутников для периодического обзора Земли / В. К. Саульский // Космические исследования. – 2017. – Т. 55 – № 4. – С. 290 – 304.
4. Применение векторной модели обзора Земли для анализа ИСЗ на изомаршрутных орбитах / А. В. Горбунов, В. К. Саульский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. – Т. 153. – № 4. – С. 29 – 46.
5. Векторная модель обзора Земли и направления ее использования / А. В. Горбунов, В. К. Саульский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – Т. 156. – № 1. – С. 21 – 32.
6. Анализ структуры группировок спутников типа «Метеор-М» / А. В. Горбунов, И. Ю. Ильина, Л. А. Макриденко [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. – Москва : АО «ЦНИИмаш», 2020. – № 2 (113). – С. 5 – 21.
7. Соболев И. М. Метод Монте-Карло / И. М. Соболев. – Москва : НАУКА, 1968. – 64 с.

8. 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.
9. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В-ИК» / под ред. Л. А. Макриденко, С. Н. Волкова, А. В. Горбунова, Р. С. Салихова, С. И. Терехова. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – 130 с.
10. Методика оценки последствий лесных пожаров / МинЧС. – Москва : ВНИИ ГОЧС, 1994. – 42 с.
11. Указания по обнаружению и тушению лесных пожаров : введены Приказом Федеральной службы лесного хозяйства России от 30.06.95 № 100.
12. Виды лесных пожаров // Официальный сайт Уральской базы авиационной охраны лесов. – Екатеринбург. – URL: uralaviales.ru.
13. Лесные пожары. Тема 1 // Сетевое издание «Fireman.club»: [сайт]. – 2015 – 2021. – URL: https://fireman.club/conspects/lesnyie-pozharyi-tema-1.
14. Экстремальные ситуации. Лесной пожар // Мир путешествий и приключений : [сайт]. – 2000 – 2012. – URL: www/outdoors.ru>extra>fire.
15. Виды природных пожаров // Некоммерческое партнерство «Прозрачный мир» : [сайт]. – 2000 – 2021. – URL: info@transparentworld.ru.
16. Внимание! Лесные пожары! // ООО «Ботик-технологии»: [сайт]. – 2005 – 2020. – URL : www.botik.ru/park/rus/lesnye\_poaryu.
17. Предупреждение лесных пожаров // ОАО «ПЕЛЕНГ» : [сайт]. – Минск. – URL : peleng.by>newsuseful-info.
18. Российская система спутникового мониторинга лесных пожаров / Ершов Д. В., Коровин Г.Н., Лупян Е.А. [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сб. науч. ст. – 2004. – Вып. 1. – С. 47 – 57.
19. Сравнение результатов мониторинга природных пожаров в Красноярском крае системами ИСДМ-Рослесхоз и КАСКАД / Кобыжакова С. В. // Научно-аналитический журнал «Сибирский пожарно-спасательный вестник». – 2016. – № 1. – С. 45 – 48.
20. Ландсберг Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. – 6-ое изд., стереотип. – Москва : ФИЗМАТГИЗ, 2003. – 848 с.

Поступила в редакцию 11.10.2022

*Ирина Юрьевна Ильина, заместитель начальника научно-производственного комплекса «Космические комплексы», т. (495) 623-57-74, e-mail: nprk@hq.vniiem.ru.*  
*Виктор Константинович Саульский, доктор технических наук, главный специалист, т. (495) 623-57-74, e-mail: ntk.vniiem@bk.ru.*  
*(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

## RESEARCH OF ORBITAL CONFIGURATION OF FOREST FIRE DETECTION SYSTEM

I. Iu. Ilina, V. K. Saulskii

*The article describes the orbital configuration of a system of small spacecraft equipped with wide-coverage infrared radiometers capable to detect small forest fires at an early stage of their development. A method is used which takes into account the following indicators of small-sized forest fires when evaluating the efficiency of the space system: probability of skipping (not detecting) a fire at a given time limit, average detection time, average area of detected fires. The method is based on models that describe the dynamics of the small forest fire area growth in time and the procedure for its detection from a small spacecraft taking into account the given characteristics of infrared radiometers, number of small spacecraft in the system, altitude and inclination of the orbits as well as orbital structure. Based on this method, the procedure for comparing and selecting options of the orbital configuration of a system of small spacecraft is developed. The keypoint of the procedure is that it takes into account all survey interruptions that occur during the operation of the small spacecraft system throughout the forest zone of Russia. The interruptions composition and the frequency of their repetition are determined using software based on the 'vector model for the Earth survey'. Due to the fact that the number of interruptions of different duration and repetition frequency is usually very high, it is almost impossible to ensure account of all the appearing sequences of their alternation. Therefore, to ensure calculations and research of the orbital configuration of a system of small spacecraft, the Monte-Carlo statistical test method is used, which makes it possible to select a representative subset from the total amount of survey interruption sequences sufficient for a given calculation accuracy.*

**Key words:** orbital structure, wide-coverage infrared radiometer, small forest fire, vector model for the Earth survey, Monte-Carlo method, number of small spacecraft, orbit altitude, limiting time, probability of skipping a small forest fire, average time of detection of a small forest fire, average area of detected small forest fire.

### References

1. Development of the method for calculating the number of satellites and orbit altitude for a space system for detecting small forest fires / I. Iu. Ilina, V. K. Saulskii // Matters of Electromechanics. VNIEM Proceedings. – Moscow : VNIEM Corporation JSC, 2021. – Vol. 183. – No. 4. – P. 26 – 43.

2. Vector method of synthesis of orbits and structure of satellite systems for a multiband survey of the Earth / V. K. Saulskii // Space research. – 2016. – Vol. 54 – No. 4. – P. 334 – 346.
3. Analysis of satellite systems for periodic survey of the Earth / V. K. Saulskii // Space research. – 2017. – Vol. 55 – No. 4. – P. 290 – 304.
4. Application of the Earth survey vector model for the analysis of Earth satellites on repeating orbits / A. V. Gorbunov, V. K. Saulskii // Matters of Electromechanics. VNIEM Proceedings. – Moscow : VNIEM Corporation JSC, 2016. – Vol. 153. – No. 4. – P. 29 – 46.
5. Vector model for the Earth survey and ways of its use / A. V. Gorbunov, V. K. Saulskii // Matters of Electromechanics. VNIEM Proceedings. – Moscow : VNIEM Corporation JSC, 2017. – Vol. 156. – No. 1. – P. 21 – 32.
6. Analysis of the structure of satellite constellations of the ‘Meteor-M’ type / A. V. Gorbunov, I. Iu. Ilina, L. A. Makridenko [et al.] // Cosmonautics and Rocket Engineering. – Moscow : TSNIIMASH JSC, 2020. – No. 2 (113). – P. 5 – 21.
7. Sobol I. M. Monte-Carlo method / I. M. Sobol. – Moscow : NAUKA, 1968. – 64 p.
8. First results of operation of infrared multichannel radiometer of medium and far infrared ranges within the ‘Canopus-V-IK’ spacecraft / N. P. Akimov, K. V. Badaev, Iu. M. Gektin [et al.] // Rocket and space instrumentation and information systems. – 2018. – Vol. 5. – Issue 4. – P. 34 – 45.
9. Space system ‘Canopus-V’ for real-time monitoring of technogenic and natural emergencies with ‘Canopus-V-IK’ spacecraft / edited by L. A. Makridenko, S. N. Volkov, A. V. Gorbunov, R. S. Salikhov, S. I. Terekhov. – Moscow : VNIEM Corporation JSC, 2017. – 130 p.
10. Forest fires consequences assessment methodology / Russian Emergency Ministry. – Moscow : All-Russia Scientific Research Institute on Problems of Civil Defense and Emergency Situations, 1994. – 42 p.
11. Instructions for detecting and extinguishing forest fires: introduced by the Order of the Federal Forestry Service of Russia No. 100 dated 30.06.95.
12. Types of forest fires // Official site of the Ural aviation base for forests protection. – Yekaterinburg. – URL : [uralaviales.ru](http://uralaviales.ru).
13. Forest fires. Topic 1. ‘Fireman.club’ web publishing: [website]. – 2015 – 2021. – URL : <https://fireman.club/conspects/lesnyie-pozharyi-tema-1>.
14. Emergency situations. Forest fire // World of travel and adventure: [website]. – 2000 – 2012. – URL : [www/outdoors.ru>extra>fire](http://www/outdoors.ru>extra>fire).
15. Types of forest fires // Nonprofit partnership ‘Transparent world’: [website]. – 2000 – 2021. – URL : [info@transparentworld.ru](mailto:info@transparentworld.ru).
16. Attention! Forest fires! // Botik technology LLC: [website]. – 2005 – 2020. – URL : [www.botik.ru/park/rus/lesnye\\_pojury](http://www.botik.ru/park/rus/lesnye_pojury).
17. Forest fire prevention // PELENG JSC: [website]. – Minsk. – URL : [peleng.by>newsuseful-info](http://peleng.by>newsuseful-info).
18. Russian satellite system for forest fires monitoring / Ershov D. V., Korovin G.N., Lupian E.A. [et al.] // Modern problems of Earth's remote sensing from space. Collection of scientific articles. – 2004. – Issue 1. – P. 47 – 57.
19. Comparison of the results of monitoring natural fires in the Krasnoyarsk Territory by the Information System for Remote Monitoring of the Federal Forestry Agency and Cascade-system / Kobyzhakova S. V. // Scientific-analytic journal ‘Siberian fire and rescue bulletin’. – 2016. – No. 1. – P. 45 – 48.
20. Landsberg G.S. Optics / G. S. Landsberg. – 6th edition, stereotype. – Moscow : State publishing house of physical and mathematical literature, 2003. – 848 p.

*Irina Iurevna Ilina, Deputy Head of Research and Production Center «Space Systems»,  
tel. +7 (495) 623-57-74, e-mail: [npk@hq.vniiem.ru](mailto:npk@hq.vniiem.ru).*

*Viktor Konstantinovich Saulskii, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.),  
Chief Specialist, tel. +7 (495) 623-57-74, e-mail: [ntk.vniiem@bk.ru](mailto:ntk.vniiem@bk.ru).  
(VNIEM Corporation JSC).*