

# КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 629.783:551.5

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА ЧИСЛА СПУТНИКОВ И ВЫСОТЫ ОРБИТ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

И. Ю. Ильина, В. К. Саульский

*Рассматривается перспективная проблема обнаружения малоразмерных лесных пожаров с помощью системы спутников, оснащаемых широкозахватными инфракрасными радиометрами. Разработан методический подход к расчету требуемого количества спутников в системе и высоты их солнечно-синхронных орбит. Подход включает следующие составляющие элементы: формулировку задачи, модель развития очага лесного пожара (с течением времени), модель обнаружения малоразмерного лесного пожара при известных характеристиках бортовых инфракрасных радиометров, модель процесса обнаружения лесного пожара, процедуру расчета вариантов космической системы, упрощенную схему обнаружения малоразмерного лесного пожара. Проведены расчеты по упрощенной схеме для набора вариантов системы, в которых число спутников изменялось от 1 до 30, а высота орбиты от 250 до 1000 км. Полученные результаты представлены в виде таблиц, позволяющих выбирать количество спутников и высоту орбит, минимизирующие следующие показатели эффективности: вероятность не обнаружения (то есть пропуска) пожара при заданном лимите времени, среднее и максимальное времена обнаружения пожара, среднюю и максимальную площади пожара при его обнаружении.*

*Ключевые слова:* широкозахватный инфракрасный радиометр, малый космический аппарат, малоразмерный лесной пожар, пиксель, угол визирования, полоса обзора, число малых космических аппаратов, высота орбиты, перерыв обзора.

### Введение

В настоящее время большую важность приобрела проблема борьбы с лесными пожарами, ежегодно охватывающими обширные пространства на территории Сибири и Дальнего Востока нашей страны. В многочисленных литературных источниках описывается, какой громадный урон лесным массивам России наносят подобные пожары [1 – 6]. Кроме того, в них ставится задача оперативного выявления таких пожаров на начальной, то есть практически очаговой стадии их разрастания.

Когда лесной пожар распространяется на большую площадь, его практически невозможно потушить, даже привлекая современные авиационные средства [3 – 8]. В связи с этим важно уметь обнаруживать его на ранней стадии, когда для его ликвидации достаточно применить минимальный состав людских ресурсов и техники. Однако, ввиду быстроты расширения возникшего пожара, его своевременное выявление в большинстве ситуаций оказывается нереальным при использовании только традиционных средств, включая и авиационные, тем более что их количество сейчас относительно невелико по сравнению с тем, каким оно было во времена существования СССР.

Наиболее перспективным путем решения задачи раннего обнаружения малоразмерных лесных пожаров (МЛП) является использование спутников, снабжаемых съемочными приборами инфракрасного (ИК) диапазона [7 – 14].

Однако до сих пор ни в нашей стране, ни за рубежом эффективное решение этой задачи пока не реализовано на практике в должной мере, хотя определённые достижения по разработке и испытаниям спутников для детектирования МЛП уже имеются [12 – 14].

### 1. Возможности создания системы спутников для обнаружения малоразмерных лесных пожаров

В нашей стране с начала нового века для наблюдения за лесными пожарами активно используются космические данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), однако они применяются не для детектирования МЛП, а для мониторинга распространения уже достаточно крупных развивающихся лесных пожаров [7, 8].

С этой целью широко применяются съемки из космоса, реализуемые как на отечественных, так и на зарубежных космических аппаратах (КА) гидрометеорологического и исследовательского назначения типа «Метеор-М», NOAA, Aqua, Terra и т. д. [9 – 11]. Основным назначением названных спутников является решение задач гидрометеорологии, океанографии, экологии, изучения природных ресурсов, слежения за различными природными процессами и результатами антропогенной деятельности и т. д., а также поиск возможностей и обоснование целесообразности применения космической техники в новых направлениях ДЗЗ. Задача поиска и выявления МЛП не относится к их приоритетам, а пространственное разрешение бортовых съемочных приборов оказывается недостаточным для детектирования МЛП с размерами от нескольких десятков квадратных метров в тех спектральных областях, в которых эта съемка проводится.

Еще более важно, что обнаружение МЛП наиболее эффективно в специальном диапазоне электромагнитного спектра, а точнее в среднем «окне прозрачности» атмосферы 3,4 – 4,3 мкм. В этом относительно узком ИК-интервале по извест-

ному закону смещения Вина интенсивность теплового излучения лесного пожара с температурой 800 – 1000 К близка к его «пику». Поэтому МЛП может быть селективирован, то есть выделен на фоне относительно «холодной» окружающей территории с температурой до 300 К, для которой пик излучения, согласно тому же закону, принадлежит дальнему «окну прозрачности»: 8 – 12 мкм. Точнее говоря, небольшой по размерам очаг лесного пожара выявляется в пределах пикселя, имеющего в тысячи раз большую площадь, так как радиационная температура такого пикселя оказывается на 20° – 30° выше температуры соседнего пикселя без МЛП [14].

На протяжении ряда лет в АО «Российские космические системы» коллектив специалистов во главе с Ю. М. Гектиным ведёт разработку принципиально нового широкозахватного ИК-радиометра для обнаружения МЛП [15 – 17]. К настоящему моменту ими достигнуты большие успехи на данном поприще: впервые выведен в космос на борту КА «Канопус-В-ИК», созданного в АО «Корпорация «ВНИИЭМ», широкозахватный ИК-радиометр МСУ-ИК-СРМ, предназначенный именно для раннего обнаружения МЛП с размерами от  $5 \times 5 \text{ м}^2$  [13, 14].

ИК-радиометр МСУ-ИК-СРМ обладает очень широкой полосой захвата (около 2000 км) при размере пикселя в надире приблизительно  $200 \times 200 \text{ м}^2$ . Он детектирует лесные пожары в двух спектральных интервалах: 3,5 – 4,1 мкм и 8,4 – 9,4 мкм. Это позволяет ему уверенно выявлять МЛП на фоне окружающей территории днем и ночью. При этом второй диапазон, 8,4 – 9,4 мкм, помогает избежать ложных сигналов, которые могут быть приняты за МЛП в дневное время, а на самом деле являются просто следствиями отражения солнечного излучения от водных поверхностей, верхних слоев атмосферы и сильнонагретых участков Земли [14].

Сравнивая МСУ-ИК-СРМ с имеющимися зарубежными приборами-аналогами, в частности, установленными на спутниках TET-1 [18] и BIROS [19] в космической системе FireBIRD, а до этого применявшимися на КА BIRD [12], можно отметить принципиальное достоинство российского радиометра, состоящее в том, что он обладает гораздо большей полосой захвата. Это исключительно важно для сокращения сроков полного обзора обширных лесных территорий с целью оперативного обнаружения новых МЛП.

Рассматриваемый ИК-радиометр имеет относительно небольшие габариты и массу (менее 85 кг),

что позволяет использовать его на КА малого класса, вдвое или втрое меньших, чем спутник «Канопус-В-ИК», на борту которого впервые появился данный прибор. Малые спутники должны быть существенно дешевле КА типа «Канопус-В-ИК», оснащаемых несколькими видами съемочной аппаратуры. Это имеет важное практическое значение, поскольку, несмотря на широкие полосы захвата ИК-радиометров МСУ-ИК-СРМ, для оперативного выявления МЛП на всей огромной площади лесов России за считанное количество часов потребуется не один, а много спутников, оснащенных такими приборами.

Итак, возникает необходимость всестороннего исследования возможностей создания системы из малых КА (МКА) с ИК-радиометрами типа МСУ-ИК-СРМ на борту, предназначенной для быстрого (то есть раннего) обнаружения МЛП на всей лесной территории нашей страны. Оставим пока на будущее проблему проектирования указанных МКА и анализ затрат на их разработку и создание, а также поддержание функционирования и восполнение соответствующей космической системы. В данном исследовании будет решаться задача выбора и обоснования высоты орбиты и количества МКА, то есть предварительного определения основных параметров, задающих орбитальное построение космической системы для раннего обнаружения МЛП.

## 2. Исходные данные и критерии эффективности

В составе исходных данных должны рассматриваться:

- различные количества малых спутников  $N_{\text{sat}}$  в системе;
- достаточно большой интервал высот орбит  $h$  (км).

Поскольку будем исходить из того, что на борту каждого КА находится один ИК-радиометр с геометрией сканирования вдоль полосы захвата, соответствующей геометрии сканирования широкозахватного прибора МСУ-ИК-СРМ, размер обнаружимой площади малоразмерного лесного пожара  $\sigma(h)$  в надире в зависимости от высоты орбиты  $h$  должен быть равен:

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

где  $\sigma(510) = 25, \text{ м}^2$  – размер обнаружимой площади МЛП в надире для исходного радиометра МСУ-ИК-СРМ на высоте орбиты КА «Канопус-В-ИК», равной ~510 км [13, 14].

Изменение обнаружимой площади МЛП в зависимости от положения пикселя (в который попада-

ет этот МЛП) на полосе захвата КА, то есть от угла визирования, а также модель развития МЛП во времени будут проанализированы после формулирования постановки задачи.

Учитывая, что космическая система из МКА предназначена для оперативного обнаружения малоразмерных лесных пожаров в самые короткие сроки с моментов их возгораний, эффективность ее работы может оцениваться следующим набором показателей (которые будут использоваться в роли критериев):

- $BER(T_{lim})$  – вероятность того, что МЛП не удастся обнаружить за заданное время  $T_{lim}$ , то есть вероятность пропуска (иначе говоря, не обнаружения) МЛП за лимитируемое время  $T_{lim}$ ;

- $CT$  – среднее время обнаружения МЛП;

- $CT_{max}$  – максимальное время обнаружения МЛП.

Будут рассматриваться значения  $T_{lim}$  в пределах от 1 до 4 ч, считая наиболее актуальным интервал от 2 до 3 ч. При более длительных сроках выявления МЛП его размеры становятся настолько большими, что тушение требует чрезмерно большого состава сил и средств [20, 21].

Критерий  $BER(T_{lim})$  будет считаться главным.

Сроки обнаружения МЛП зависят как от скорости его распространения, так и от того, насколько регулярно и часто развивающийся очаг пожара попадает в полосы захвата спутников космической системы. Поэтому ключевую роль в процессе исследования и оценки эффективности различных вариантов орбитального построения должен играть какой-либо подходящий метод для определения полного состава перерывов обзора и частот их возникновения (для разных вариантов структуры системы МКА).

Для этой цели возможно применение алгоритма расчета и компьютерной программы на базе математического аппарата «векторной модели обзора Земли» [22 – 28]. Однако, требуется серьезная доработка данного алгоритма и программы для обеспечения полноценного учета специфики процесса детектирования МЛП. Данная работа пока не завершена. В связи с этим на настоящей (предварительной) стадии исследований выполнены вычисления по упрощенной модели покрытия заданной зоны Земли полосами захвата спутников системы. Эта модель, как и полная модель развития МЛП во времени, и формулы, определяющие изменение обнаружимой площади МЛП при разных углах визирования, будут описаны непосредственно вслед за формулируемой ниже постановкой задачи.

### 3. Постановка задачи

Дано:

- система МКА с широкозахватными ИК-радиометрами типа МСУ-ИК-СРМ на борту [14];

- минимальная площадь обнаружимого в надире МЛП определяется по формуле (1) на основе [13, 14];

- размер полосы захвата зависит от высоты орбиты  $h$  и задается наибольшими значениями углов визирования  $\pm 59^\circ$  [14];

- количество МКА в системе варьирует от 1 до 30 с шагом 1;

- все МКА в каждом рассматриваемом варианте системы функционируют на одинаковых круговых солнечно-синхронных орбитах (ССО) с высотами из диапазона 250 – 1000 км с шагом 50 км.

Требуется определить и обосновать количество МКА в системе  $N_{sat}$  и высоту их орбит  $h$ , используя следующие критерии, значения которых нужно минимизировать:

- 1) вероятность  $BER(T_{lim})$  того, что МЛП не удастся обнаружить за заданное время  $T_{lim}$  из интервала 1 – 4 ч с шагом 0,5 ч;

- 2) среднее время  $CT$  обнаружения МЛП;

- 3) максимальное время  $CT_{max}$  обнаружения МЛП.

### 4. Модель развития очага лесного пожара во времени

Начинаем строить модель развития МЛП. С этой целью был изучен большой объем данных, приведенных в литературных источниках [1 – 6, 20, 21]. Наиболее важными среди них были официальные документы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий [20, 21].

Развитие лесного пожара зависит от многочисленных факторов, среди которых можно выделить следующие:

- вид пожара (верховой устойчивый, верховой беглый, низовой);

- класс горимости лесных насаждений;

- класс пожарной опасности погоды;

- скорость ветра;

- начальная площадь  $S_{beg}$  или начальный периметр  $P_{beg}$  очага пожара.

Для различных сочетаний перечисленных факторов возникают совершенно разные по скорости распространения пожары. Однако, в настоящем исследовании требуется получить одну усредненную модель развития МЛП. С целью ее формирования на основе анализа доступных литературных

источников были выбраны следующие условия, которым должна соответствовать данная модель.

Во-первых, будет рассматриваться только низовой вид пожара, поскольку он появляется в 97 – 98 % всех лесных пожаров на территории нашей страны [1 – 2].

Во-вторых, будут учитываться два главных класса горимости, то есть 1-й и 2-й. К 1-му классу относятся чистые хвойные лесные массивы, но без листовенных и с допущением примеси листовенных пород [1 – 4, 20, 21]. 2-й класс составляют чистые с примесью хвойных пород листовенные насаждения, а также листовенные. Оба данных класса горимости образуют наибольшую по площади лесную территорию в составе общего пространства лесов России.

В-третьих, должны быть учтены классы пожарной опасности погоды [2, 20, 21] с тем, чтобы, сравнивая их, выбрать те, которые наиболее актуальны именно с точки зрения раннего обнаружения МЛП. Результаты анализа приведены непосредственно ниже.

Класс пожарной опасности (ПО) определяется по результату расчета специального комплексного показателя  $K_{ПО}$ . Он зависит от погодных условий в лесу и вычисляется как сумма произведений температуры воздуха  $T_{12}$  в 12 ч по местному времени на разность между значением этой температуры и точкой росы  $\tau_{12}$  в те же 12 ч в каждый день с момента последнего дождя [2, 20]:

$$K_{ПО} = \sum_{n=1}^{n_{\max}} T_{12}(T_{12} - \tau_{12}),$$

где  $n = 1, 2, \dots, n_{\max}$  – номер очередного дня с момента последнего дождя; при этом осадки, которые за сутки оказались меньше 25 мм, в расчёт не принимаются.

Количество выпавших осадков определяется по осадкомеру. Температура воздуха задается по сухому термометру психрометра. Точка росы вычисляется по психрометрическим таблицам на основании отсчетов по сухому и смоченному термометрам. Психрометр устанавливается вне помещения в тени на высоту 2 м от земли.

1-му классу ПО погодных условий соответствует величина показателя  $K_{ПО} \leq 300$ . Считается, что при данном классе опасность пожара отсутствует. Большинство причин (то есть источников огня) само по себе в этом случае пожаров не вызывает, хотя возможны пожары от молний (при сухих грозах). Уже возникшие пожары распространяются медленно, мелкие очаги расширяются неравномерно или, что чаще, прекращают действовать. Реальной необходи-

мости в сверхоперативном выявлении подобных лесных пожаров нет.

2-му классу ПО соответствует  $K_{ПО} = 301 - 1000$ . Данный класс означает, что опасность возникновения и распространения лесного пожара существует, но она мала. В этом случае лесные пожары могут возникать только от сильных источников огня, однако количество возгораний невелико, а скорость их распространения незначительна. Борьба с пожарами при 2-м классе ПО не представляет особой трудности. Тем не менее возникший пожар желательно оперативно обнаружить и ликвидировать.

3-му классу ПО соответствует  $K_{ПО} = 1001 - 4000$ . Принадлежность состояния погоды к этому классу свидетельствует о средней пожарной опасности. Здесь большинство источников огня приводит к возникновению лесных пожаров. Они интенсивны, выделяют большое количество тепла, быстро распространяются и создают дополнительные мелкие очаги. Ликвидация пожара связана с определенными трудностями, если не будет обеспечено его тушение в самом начале. Таким образом, существует насущная необходимость скорейшего обнаружения лесных пожаров при 3-м классе ПО погоды.

4-му классу ПО соответствует  $K_{ПО}$  в пределах от 4001 до 10 000 – 12 000. Это высокий уровень ПО. При данном классе погоды пожары возникают даже от незначительных источников огня, быстро развиваются, создают дополнительные мелкие очаги. Непосредственное тушение (малыми силами и средствами) подобного пожара практически невозможно. Поэтому тратиться на оперативное детектирование лесного пожара, возникающего в условиях 4-го класса ПО погоды, практически считается не слишком целесообразным.

5-му классу ПО соответствует очень большая величина комплексного показателя  $K_{ПО}$ , превышающая 10 000 – 12 000. Констатируется чрезвычайная опасность возникновения и роста лесных пожаров. Они инициируются любым источником огня или высокими температурами. Горение происходит весьма интенсивно. Огонь распространяется стремительно. В результате непосредственное тушение еще более нереально, чем для предыдущего 4-го класса пожарной опасности. Тем более при 5-м классе ПО лишено практического смысла оперативное детектирование лесных пожаров с целью организации их непосредственного тушения.

На основе проведенного описания и сравнения возможностей и целесообразности оперативного обнаружения лесных пожаров можно сделать вывод о том, что с практической точки зрения нужно

рассматривать лишь 2-й и 3-й классы ПО погодных условий.

Важную роль для интенсивности распространения лесного пожара имеет скорость ветра. Она может варьировать в очень больших пределах от 0 до 8 – 12 и более метров в секунду, как следует из литературных источников МЧС России [20, 21].

Однако, в подавляющем большинстве случаев, как можно судить по таблицам, представленным в этих официальных источниках, для низовых пожаров эту скорость достаточно считать, не превосходящей 4 – 6 м/с. Более того, для малоразмерных, то есть не слишком развитых и как бы охраняемых пологом леса, пожаров на начальной стадии достаточно учитывать скорость ветра до 4 – 6 м/с, когда производится оценка по формулам, графикам или таблицам из [20] скоростей распространения фронтальной кромки МЛП. В источнике [20] имеются также графики и таблицы, позволяющие определять скорости перемещения флангов и тыла лесного пожара, однако именно по уровню фронтальной скорости определяется (по формулам, графикам или таблицам) рост периметра и площади лесного пожара во времени.

Последним из рассматриваемых факторов, от которых зависит развитие МЛП, служит начальная площадь  $S_{\text{beg}}$ , которую будем исчислять в кв. метрах, или же начальный периметр  $P_{\text{beg}}$  очага пожара, измеряемый в линейных метрах. Обе эти величины, то есть площадь и периметр лесного пожара, пересчитываются друг в друга, то есть по значению одной из них можно вычислить другую (по формулам, которые будут приведены дальше).

В настоящей работе нужно исходить из минимальной площади первоначального очага, до достижения которой МЛП развивается очень медленно. В доступной литературе не удалось найти сведений, которые бы позволили однозначно получить ее оценку. Поэтому будем считать начальную площадь  $S_{\text{beg}}$  одинаковой для всех вариантов анализируемых в дальнейшем космических систем и равной минимальной площади пожара, обнаружимого в надире с помощью ИК-радиометра МСУ-ИК-СРМ на наименьшей исследуемой высоте орбиты, то есть 250 км. По формуле (1) она приблизительно равна  $\sim 6 \text{ м}^2$ .

Итак, при определении модели развития МЛП будем учитывать следующие факторы:

- 1) вид пожара – устойчивый низовой;
- 2) классы горимости – 1-й и 2-й;
- 3) классы ПО погоды – 2-й и 3-й;
- 4) скорость ветра – от 0 до 8 м/с;
- 5) начальная площадь пожара

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

В [20] приводятся следующие формулы для вычисления площади  $S$  и периметра  $P$  развивающегося низового лесного пожара, в которых используется также и скорость перемещения фронтальной кромки лесного пожара, определяемая на основе 4-х первых из только что перечисленных факторов:

$$S = 4 \cdot 10^{-6} P^2, \text{ га или } S = 0,04 P^2, \text{ м}^2, \quad (3)$$

где

$$P = 500\sqrt{S}[\text{га}] + \Delta P, \text{ м или } P = 5\sqrt{S}[\text{м}^2] + \Delta P, \text{ м}; \quad (4)$$

а приращение периметра

$$\Delta P = 3,3V_{fr} \text{ time}, \quad (5)$$

где  $V_{fr}$  – скорость фронта пожара, м/ч; time – время, ч.

На основе соотношений (3) – (5) можно вывести следующую формулу для вычисления роста площади пожара  $S$  во времени time с дополнительным учетом последнего, то есть 5-го из названных выше факторов, то есть начальной площади лесного пожара, обозначаемой как  $S_{\text{beg}}$ :

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

или

$$S = S_{\text{beg}} + 1,32\sqrt{S_{\text{beg}}} V_{fr} \text{ time} + 0,4356V_{fr}^2 \text{ time}^2, \quad (6)$$

где текущая  $S$  и начальная  $S_{\text{beg}}$  площади лесного пожара выражаются в  $\text{м}^2$ , скорость  $V_{fr}$  распространения фронтальной кромки пожара задается в м/ч, время time фиксируется в ч.

Полученная формула (6) будет далее использоваться для моделирования изменения площади малоразмерного лесного пожара во времени.

В [20] на рис. 4.1 и 4.2, графики, по которым можно выбирать скорость перемещения фронта низового лесного пожара в зависимости от скорости ветра, класса горимости и класса погодной опасности. Полагая скорость ветра равной от 0 до 4 – 6 м/с, для 1-го и 2-го классов горимости при 2-м и 3-м классах пожарной опасности погодных условий выбираем для дальнейшего применения в

настоящей работе следующий диапазон скоростей перемещения фронтальной кромки МЛП:

$$V_{fr} = 5 \div 50, \text{ м/ч.} \quad (7)$$

### 5. Модель обнаружения малоразмерных лесных пожаров с помощью бортового инфракрасного радиометра

В рамках сформулированной выше постановки 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 широкозахватного ИК-радиометра.

Рассмотрим рис. 1. На нем показана геометрия сканирования пикселей вдоль полосы захвата для съёмочного прибора типа МСУ-ИК-СРМ. Видно, что размер проекции пикселя на поверхности Земли растет при удалении от надира за счет возрастания угла визирования  $w$  и дальности  $f$ . На основании известной из школьного курса теоремы синусов

$$\sin w / R_e = \sin z / (R_e + h) = \sin b / f, \quad (8)$$

следовательно,

$$z = \sin^{-1}(\sin w (R_e + h) / R_e), \quad (9)$$

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

Учитывая, что  $z = w + b$ , находим центральный угол  $b$ , определяющий расстояние по земной поверхности от точки надира до проекции пикселя под углом визирования  $w$ :

$$b = z - w. \quad (10)$$

Используя (8) и (10), определяем дальность  $f$  под углом визирования  $w$ :

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

Теперь с помощью соотношений (11), (10) и (9) можно, во-первых, определить коэффициент роста линейного масштаба  $K_1$  при увеличении угла визирования  $w$  по следующей формуле:

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

а затем найти коэффициент роста площади проекции пикселя  $K_2$  по формуле:

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

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

$$B = b R_e, \text{ км,} \quad (14)$$

здесь угол  $b$  выражен в рад.

На рис. 2 представлены графики значений коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$ , вычисленные по формулам (9) – (14) для КА «Канопус-В-ИК» в зависимости от удаления на расстояние  $B$  от точки надира на поверхности Земли, соответствующее (14). Высота орбиты  $h = 510$  км [13].

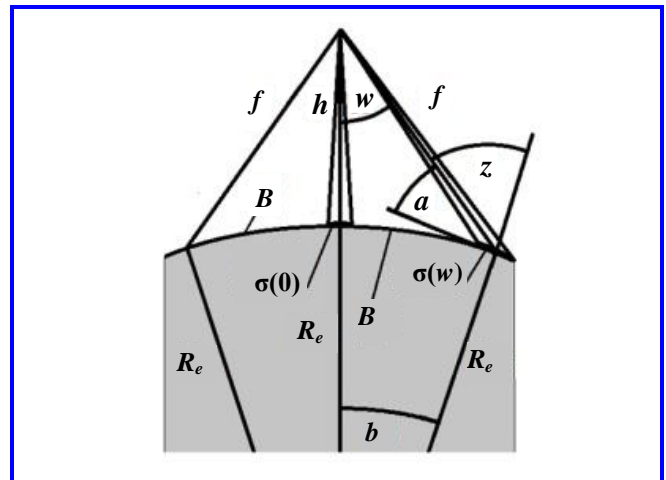


Рис. 1. К выводу формул для расчёта роста проекции пикселя  $\sigma(w)$  на поверхности Земли при увеличении угла визирования  $w$

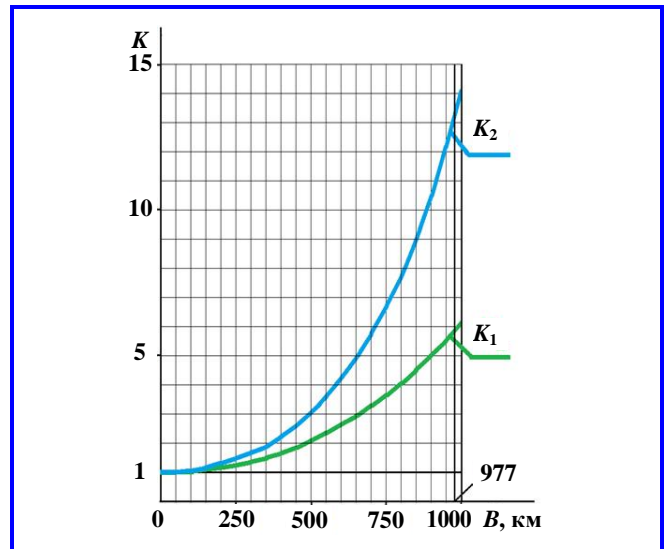


Рис. 2. Рост коэффициентов линейного масштаба  $K_1$  и площади проекции пикселя  $K_2$  при удалении на расстояние  $B$  от точки надира на поверхности Земли

Для прибора МСУ-ИК-СРМ наибольшее значение угла визирования  $w_{\max} = 59^\circ$ , поэтому на рис. 2 показана величина расстояния, соответствующего этому углу, 977 км. Следовательно, для КА «Канопус-В-ИК», снабженного данным ИК-радиометром, половина полосы захвата  $B_{\max}$  и вся полоса равны П:

$$\begin{aligned} B_{\max} &= 977 \text{ км;} \\ \Pi &= 2B_{\max} = 1954 \text{ км.} \end{aligned} \quad (15)$$

По графикам на рис. 2 несложно установить, что на краю полосы захвата коэффициент роста проекции пикселя достигает внушительной величины

$$K_2 = 13,11. \quad (16)$$

Это означает, что в такой же пропорции увеличивается минимально обнаружимая площадь МЛП, предполагая инвариантность излучения МЛП по разным направлениям, то есть его соответствие закону Ламберта [29]. Видно, насколько стремительно возрастает обнаружимая площадь на краю полосы захвата КА «Канопус-В-ИК». При более внимательном анализе формул (9) – (13) можно установить, что на низких высотах максимальное значение коэффициента  $K_2$  меньше (16), однако, оно растет все более значительно с повышением высоты орбиты вплоть до 1000 км и выше.

Для МКА с широкозахватным ИК-радиометром типа МСУ-ИК-СРМ на борту изменение минимальной обнаружимой площади лесного пожара  $\sigma(h, w)$  вычисляется по следующей формуле, в которой учтено соотношение (1):

$$\sigma(h, w) = K_2 \sigma(510) h^2 / 510^2 = 25 K_2 h^2 / 510^2, \text{ м}^2, \quad (17)$$

где коэффициент  $K_2$  рассчитывается по формуле (13) в зависимости от угла визирования  $w$ .

Таким образом, совокупность формул (9) – (13) определяет для МКА, снабжаемого прибором типа МСУ-ИК-СРМ, геометрию сканирования вдоль полосы захвата при изменении высоты орбиты  $h$  и угла визирования  $w$ . В дополнение к этому по формуле (17) рассчитывается увеличение минимальной обнаружимой площади МЛП по формуле (17). При этом наибольшее значение минимальной обнаружимой площади МЛП для высоты  $h$  на краю полосы захвата равно:

$$\sigma_{\max}(h) = K_2(w_{\max}) 25 h^2 / 510^2, \quad (18)$$

где  $K_2(w_{\max})$  вычисляется по формуле (13) с использованием (9) и (10).

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

Используя полученную модель развития МЛП в составе формул (3) – (6) и только что найденную зависимость обнаружимой площади МЛП от угла визирования и высоты КА, начинаем разработку процедуры (алгоритма) сравнения различных вариантов космических систем, предназначенных для обнаружения МЛП и отличающихся количеством спутников и высотами ССО. Для этого сначала проанализируем, как может осуществляться детектирование возникшего лесного пожара в результате череды его попаданий в полосы захвата спутников космической системы, то есть через промежутки времени, являющиеся перерывами обзора. Короче говоря, строим модель обнаружения МЛП системой спутников.

На рис. 3 в схематическом виде представлен процесс развития МЛП, достигшего по условию (2) первоначальной площади  $S_{\text{beg}} = 6 \text{ м}^2$  в момент времени  $x$  после начала очередного перерыва обзора  $t_1$ , который условно считается 1-м (на схеме на рис. 3). Далее с ростом времени  $\text{time}$  площадь МЛП, обозначаемая символом  $S$ , быстро увеличивается, как изображено на рис. 3. В частности, в момент завершения перерыва  $t_j$  она равна  $S_j$ , а в конце последнего перерыва  $t_j$  на рис. 3 достигает  $S_j$ .

Реализуемый перечень перерывов обзора  $t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_j$ , фиксирует моменты, когда МЛП оказывается в пределах полос захвата спутников системы, а потому и может быть детектирован и обнаружен. В частности, на рис. 3 обнаружение может состояться, например, в  $j$ -й по очереди момент зондирования, то есть в конце перерыва  $t_j$ , если до этого не удалось выявить данный МЛП во все предыдущие моменты зондирования.

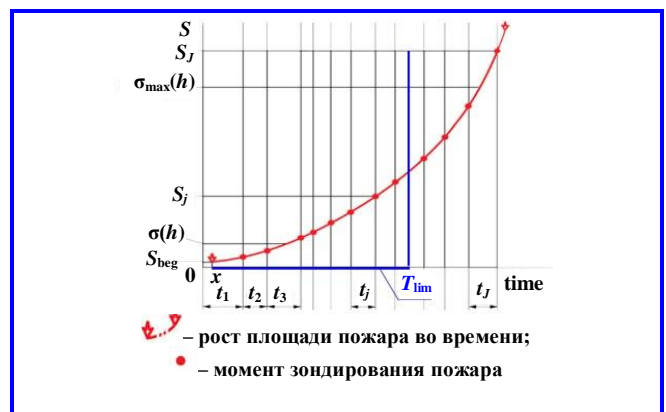


Рис. 3. Модель обнаружения малоразмерного лесного пожара в  $j$ -й по очереди момент зондирования малоразмерного лесного пожара, которые чередуются с интервалами, равными перерывам обзора

Условием обнаружения пожара служит то, что его площадь  $S_j$ , достигнутая в момент зондирования, превышает или равна минимальной обнаружимой площади  $\sigma(h, w)$  для пикселя, в который попал МЛП. Здесь предполагается, что данный пиксель виден под углом визирования  $w$ .

Вероятность того, что МЛП попадет в какой-нибудь пиксель из всего их набора в интервале углов визирования от 0 до  $w_{\max}$ , одинакова и равна  $1/(2N_{\text{pixel}})$ , где  $(2N_{\text{pixel}})$  – число пикселей во всем диапазоне от  $-w_{\max}$  до  $+w_{\max}$ . Угол визирования, учитывая конечность числа пикселей, изменяется вдоль полосы захвата дискретно. При этом для пары пикселей, один из которых находится слева от надире, а другой – справа, имеющих одинаковые номера  $n$ , перечисляемые по росту номера по мере удаления от надирного пикселя (соответственно налево и направо), угол визирования будет одним и тем же по абсолютной величине:

$$w(n) = w_{\max}n/N_{\text{pixel}}. \quad (19)$$

Можно оценить число пикселей  $N_{\text{pixel}}$  исходя из того, что в надире линейный размер пикселя, согласно [14], равен  $p = 200$  м, угловые размеры всех пикселей одинаковы, КА «Канопус-В-ИК» выведен на орбиту с высотой  $h = 510$  км [13], а наибольший угол визирования  $w_{\max} = 59^\circ$ . Очевидно,

$$N_{\text{pixel}} = (\pi w_{\max}/180)/(p/h) = 2626.$$

Учитывая возможность использования в источниках [13, 14] немного округленных значений линейного размера пикселя, высоты орбиты и наибольшего угла визирования, истинное количество пикселей также следует считать «круглым» числом. Поэтому будем предполагать, что оно равно

$$N_{\text{pixel}} = 2500. \quad (20)$$

Впрочем, точная величина  $N_{\text{pixel}}$  хоть и любопытна, но не играет существенной роли в настоящем исследовании, так как не может привести к каким-либо значительным ошибкам в будущих расчетах.

Итак, в конце перерыва  $t_j$  состоится обнаружение МЛП, если его площадь  $S_j$ , вычисленная по формуле (6), будет не меньше минимальной площади обнаружения  $\sigma(h, w)$ , определяемой из соотношений (17) и (13) с учетом (9) и (10). Ключевым для дальнейшей разработки искомого алгоритма расчета вариантов космических систем, предназначенных для обнаружения лесных пожаров и отличающихся количеством спутников и высотами орбит, является определение условной вероятности  $P_j$  выявления МЛП в момент завершения пере-

рыва  $t_j$  при условии, что до этого не удалось обнаружить данный МЛП.

Приступаем к выводу соотношений, помогающих вычислить  $P_j$ . Сначала введем сокращенное выражение для расчета площади пожара:

$$S = \text{square}(\text{time}) = 0,04(5\sqrt{S_{\text{beg}}} + 3,3V_{fr}\text{time})^2, \quad (21)$$

то есть функция  $\text{square}(\text{time})$  является кратким обозначение формулы (6) для определения площади МЛП после истечения времени  $\text{time}$  с начального момента, когда его площадь достигла  $S_{\text{beg}} = 6 \text{ м}^2$ . Используя (21), можно в следующем виде представить площадь  $S_j$  на рис. 3:

$$S = \text{square}\left(\sum_{m=1}^{m=j} t_m\right) - x, \quad j = 1, 2, 3, \dots, J; \quad (22)$$

так как

$$\text{time}_j = \left(\sum_{m=1}^{m=j} t_m\right) - x. \quad (23)$$

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

$$\sigma(h, w) = \text{func}(w), \quad h = \text{const}, \quad (24)$$

где  $\text{func}(w)$  – это функция, эквивалентная совокупности соотношений (17), (13), (9) и (10), обеспечивающих определение минимальной обнаружимой площади МЛП под углом визирования  $w$  (при заданной постоянной 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 (24), записываем следующее условие того, что пожар с площадью  $S_j$  обнаруживается на пикселе с номером  $n$ :

$$S_j \geq \text{func}(n\delta), \quad (25)$$

$$\delta = w_{\max}/N_{\text{pixel}}. \quad (26)$$

Учитывая (25) и (26), несложно убедиться, что наибольший номер  $n_j$  для перечня пикселей, на которых обнаруживается МЛП с площадью  $S_j$ , равен:

$$n_j = E(\text{func}^{-1}(S_j)/\delta), \quad (27)$$

где целочисленная функция  $E(a)$  равна наибольшему целому числу, не превосходящему ее аргумент  $a$ , а  $\text{func}^{-1}$  обозначение функции, обратной к  $\text{func}$  из (24), то есть обратной к итоговому результату вычислений по совокупности формул (17), (13), (9) и (10).



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

$$n = 0, 1, 2, \dots, n_j \quad (28)$$

Используя (27) и (28), находим искомую вероятность  $P_j$  выявления МЛП в момент завершения перерыва  $t_j$  при условии, что до этого ещё не удавалось обнаружить данный МЛП в предыдущие моменты его попадания в полосы захвата КА:

$$P_j = n_j / N_{\text{pixel}} = E(\text{func}^{-1}(S_j) / \delta) / N_{\text{pixel}} \quad (29)$$

В этой формуле площадь лесного пожара  $S_j$  рассчитывается по формулам (22) и (23).

Пока остается неясным, как определить и применять обратную функцию  $\text{func}^{-1}$  в формуле (29). Возможны два способа практической реализации соотношения (29):

1) перебирая по мере возрастания все номера  $n$ , начиная от надирного 0, вычисляются значения  $\text{func}(n\delta)$  до тех пор, пока не определится наибольший среди них, при котором ещё реализуется условие (25); это и будет искомый номер  $n_j$ , то есть фактически будет использована обратная функция  $\text{func}^{-1}$ ;

2) на основе  $\text{func}(n\delta)$ , то есть, проводя вычисления с помощью соотношений (17), (13), (9) и (10) и с учетом также и (26), заполняется массив из пар значений  $n$  и  $\text{func}(n\delta)$  от  $n = 0$  вплоть до  $n = N_{\text{pixel}}$ . Из полученного массива по величине площади  $S_j$  несложно выбрать соответствующий ей номер  $n_j$ .

2-й способ более предпочтителен для ускорения процедуры расчетов. Он и будет применяться в разрабатываемом алгоритме.

Итак, найден путь к вычислению условной вероятности  $P_j$  из соотношения (29). Безусловная вероятность  $F_j$  того, что именно в конце перерыва  $t_j$  произойдет обнаружение лесного пожара, может быть определена по следующей формуле:

$$F_j = P_j \prod_{m=1}^{m=j-1} (1 - P_m), \quad (30)$$

где условные вероятности  $P_m$  определяются, используя соотношение (29), которое реализуется с помощью любого из двух только что описанных способов.

Вернемся еще раз к рассмотрению рис. 3. На нем отмечен предельный уровень минимальной обнаружимой площади на краю полосы захвата, которая вычисляется на основе соотношения (24):

$$\sigma_{\text{max}}(h) = \text{func}(w_{\text{max}}) \quad (31)$$

Выше на рис. 3 находится площадь пожара  $S_j$ , рассчитываемая из соотношений (22) и (23). Очевидно, что в конце перерыва  $t_j$  лесной пожар будет обязательно выявлен, если это не случилось при завершении какого-либо из предыдущих перерывов обзора.

В соотношениях (22) и (23) фигурирует время  $x$ . Оно может варьировать в пределах от 0 до  $t_1$ . Все значения  $x$  в этом интервале равновероятны. Следовательно, в разрабатываемом алгоритме нужно последовательно перебирать все возможные значения с малым шагом, а затем находить среднее арифметическое среди полного состава определенных из соотношения (30) вероятностей  $F_j$ .

### 7. Процедура расчета вариантов космической системы

Используя выведенные формулы (21) – (31), процедура (алгоритм) расчета критериев эффективности сводится к перебору всех возможных последовательностей перерывов обзора  $t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_j$ , для которых реализуются две стадии вычислений.

Стадия 1 включает этапы А, Б и В.

А. Для очередной последовательности, начавшейся в момент  $x$  от начала перерыва  $t_1$ , в конце этого и каждого следующего  $j$ -го перерыва определяются:

– истекший промежуток времени

$$T_j = \text{time}_j = \left( \sum_{m=1}^{m=j} t_m \right) - x; \quad (32)$$

– достигнутая площадь МЛП

$$S_j = \text{square}(T_j); \quad (33)$$

– вероятность  $F_j$  обнаружения МЛП (в момент завершения  $j$ -го перерыва), вычисляемая по формулам (26), (27), (29) и (30);

– минимально обнаружимая площадь на краю полосы захвата, вычисляемая по формуле (31).

Попутно для всех моментов времени  $t_j$  вплоть до последнего  $t_j$  вычисляются:

– вероятности не обнаружения МЛП при различных лимитах времени  $T_{\text{lim}}$ :

$$\text{BER}(T_{\text{lim}}) = 1 - \sum_{m=1}^{m=j} F_m \text{ при } T_j \leq T_{\text{lim}} < T_{j+1}; \quad (34)$$

– среднее время обнаружения МЛП (на рассматриваемом варианте последовательности):

$$CT = \sum_{j=1}^{j=J} T_j F_j; \quad (35)$$

$$CS_{\max} < \text{square}(CT_{\max}). \quad (40)$$

– максимальное время обнаружения МЛП:

$$CT_{\max} = T_j. \quad (36)$$

Дополнительно можно определить величины достигаемой (на данной последовательности) средней  $CS$  и максимальной  $CS_{\max}$  площадей МЛП по следующим формулам:

$$CS = \sum_{j=1}^{j=J} S_j F_j = \sum_{j=1}^{j=J} \text{square}(T_j) F_j; \quad (37)$$

$$CS_{\max} = \text{square}(T_j) = \text{square}(T_j). \quad (38)$$

**Б. Так как каждый рассматриваемый вариант последовательности начинается в момент  $0 \leq x < t_1$ ,** нужно повторить вычисления по формулам (32) – (38) для всех значений  $x$ , перечисляемых с каким-либо малым шагом на полуоткрытом интервале  $[0, t_1)$ , а затем определить для совокупностей всех найденных критериев их средние значения  $BER(T_{\lim})$ ,  $CT$  и  $CS$ , а также максимальные  $CT_{\max}$  и  $CS_{\max}$ .

**В. Учитывая необходимость рассмотрения всех значений скоростей перемещения фронта пожара, заданных в (7),** вычисления по этапам **А** и **Б** требуется снова повторить для каждой скорости в диапазоне 5 – 50 м/ч с малым шагом, например, 0,5 м/ч, а затем определить средние значения  $BER(T_{\lim})$ ,  $CT$  и  $CS$ , а также максимальные  $CT_{\max}$  и  $CS_{\max}$ .

**Стадия 2. Повторяя стадию 1 в составе ее этапов А, Б и В для разных последовательностей перерывов обзора, возникающих при работе космической системы, определяются итоговые средние значения искомым критериев  $BER(T_{\lim})$ ,  $CT$  и  $CS$  и итоговые максимальные  $CT_{\max}$  и  $CS_{\max}$**

Необходимо заметить, что максимальные значения  $CT_{\max}$  и  $CS_{\max}$  не могут превышать следующих ограничений:

$$\begin{aligned} CT_{\max} &< \text{square}^{-1}(\sigma_{\max}(h)) + t_{\max} = \\ &= 5(\sqrt{\sigma_{\max}(h)} - \sqrt{S_{\text{beg}}}) / (3,3V_{fr}) + t_{\max}, \end{aligned} \quad (39)$$

где  $\sigma_{\max}(h)$  определяется по формуле (18), а  $t_{\max} = \max(t_1, t_2, t_3, \dots)$ , причем в выводе формулы (39) учтен вид функции  $\text{square}$  из (21);

На этом завершается основное, наиболее важное содержание искомого алгоритма, но возникает естественный вопрос: как и какие варианты из последовательностей перерывов обзора  $t_1, t_2, \dots, t_j, \dots$ , нужно рассматривать? Точный ответ – все сочетания этих перерывов в любых последовательностях и с учетом частот их возникновения. Совокупности перерывов обзора с их частотами требуется определять, исходя из структуры, то есть орбитального построения космических систем с разным количеством МКА на орбитах с разной высотой. Состав перерывов обзора очень велик, он может измеряться тысячами [30, 31].

Ясно, что учет абсолютно всех возможных последовательностей перерывов обзора практически нереален. Поэтому, скорее всего, нужно будет в дальнейшем применять метод Монте-Карло [32]. В рассматриваемой ситуации он может сводиться к генерированию случайных последовательностей перерывов обзора, задаваемых с помощью датчика случайных чисел, то есть назначения очередного перерыва среди всех возможных (с помощью этого датчика). При этом должны учитываться частоты возникновения различных перерывов обзора, расчет которых является самостоятельной проблемой.

Многokrатно повторяя процесс генерирования, в котором для каждой очередной последовательности перерывов обзора находятся значения критериев эффективности (требуемые в постановке задачи), можно затем вычислить средние значения данных критериев, которые и будут считаться искомыми. При этом, естественно, нельзя избежать ошибок в конечных результатах, так как число  $N$  реализаций процесса не может быть бесконечным. Точность итоговых результатов по методу Монте-Карло обычно считается пропорциональной  $\sqrt{N}$ . Это означает, что для сокращения ошибок вдвое потребуется каждый раз увеличивать  $N$  в 4 раза, а для их уменьшения – в 10 – 100 раз.

Очевидно, что для организации статистических испытаний по методу Монте-Карло сначала необходимо определить полную совокупность перерывов обзора вместе с частотами их появления. Выше уже отмечалось, что это, в принципе, можно обеспечить с помощью аппарата «векторной модели обзора Земли» [22 – 28]. Однако, процесс ее приспособления к рассматриваемой в настоящем исследовании задаче с учетом необходимости проведения длинного ряда испытаний по методу Монте-Карло пока не завершен.

### 8. Процедура расчета на основе упрощенной схемы обнаружения малоразмерных лесных пожаров

Учитывая сказанное, к настоящему моменту была реализована упрощенная процедура, основанная на использовании вместо огромного количества перерывов обзора единственного среднего периода обзора. Конечно, это не лучшее решение исследуемой проблемы. Однако, оно все-таки даст возможность предварительно оценить, как варьирование высоты орбиты и количества МКА влияет на процесс обнаружения МЛП.

Итак, требуется определить средний период обзора  $t_{mid}$  для космической системы из  $N_{sat}$  МКА, находящихся на круговых ССО с высотой  $h$ . Этот период будем вычислять для широты  $\varphi = 55^\circ$ , которая является приблизительно средней широтой для экономически значимой территории распространения лесных массивов России. Искомый средний период равен:

$$t_{mid}(\varphi) = \pi / (N_{sat} d(\varphi)), \text{ витков орбиты}, \quad (41)$$

где  $d(\varphi)$  – «след» от полосы захвата П спутника на широте  $\varphi$ , равный длине участка широты, пересеченного полосой  $\Pi = 2w_{max} = 2 \cdot 59^\circ = 118^\circ$ . Кроме того, на основании (15),  $\Pi = 1954$  км.

Приближенный расчет «следа» с точностью, вполне достаточной для проводимого исследования, производился по следующей формуле [22 – 24, 28]:

$$d(\varphi) = a(2\pi - l \cos i) / \left( 2\pi \sqrt{\cos^2(\varphi) - \cos^2(i)} \right), \text{ рад}, \quad (42)$$

где  $i$  – наклонение орбиты;  $l$  – межвитковое расстояние, рад;  $a$  – полоса захвата спутника на земной поверхности, рад. В данном случае

$$a = 2w_{max}\pi/180 = 2 \cdot 59\pi/180. \quad (43)$$

Наклонение  $i$  ССО с достаточной для настоящего исследования точностью определялось по следующей формуле из [33]:

$$i = \frac{\pi}{2} + \sin^{-1} \left( \begin{array}{l} 2\pi(R_e + h)^{\frac{7}{2}} \sqrt{\mu} / (\varepsilon T_{tr}) + \\ + 2\pi(R_e + h)^{\frac{3}{2}} / (\sqrt{\mu} T_{tr}) - \\ - 32\pi^3 (R_e + h)^{\frac{17}{2}} \sqrt{\mu} (\varepsilon^2 T_{tr}^3) \end{array} \right). \quad (44)$$

В этой формуле используются следующие константы:

- средний радиус Земли  $R_e = 6371$  км;
- постоянная сжатия Земли  $\mu = 398602 \text{ км}^3/\text{с}^2$ ;
- постоянная тяготения Земли  $\varepsilon = 2,634 \cdot 10^{10} \text{ км}^5/\text{с}^2$ ;
- тропический год  $T_{tr} = 365,2422$  суток, причем для правильной подстановки  $T_{tr}$  в формулу (35) нужно эту цифру умножить на количество секунд в сутках, то есть на  $24 \times 3600$ .

Межвитковое расстояние  $l$  также с вполне достаточной точностью определяется по следующей формуле из [34]:

$$l = \left( \frac{2\pi(R_e + h)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{\mu}} + \frac{2\pi\varepsilon(1 - 4\cos^2(i))}{\sqrt{(R_e + h)\mu^3}} \right) \omega + \frac{2\pi\varepsilon \cos i}{\mu(R_e + h)^2}, \quad (45)$$

где угловая скорость вращения Земли  $\omega = 7,29211 \cdot 10^{-5}$  рад/с.

По формуле (41) средний период обзора вычисляется в витках орбиты. В настоящем исследовании наиболее удобной единицей измерения времени служит час. Обозначим средний период обзора, выражаемый в ч, через  $\tau$ . Тогда вместо (41) получаем

$$\tau(\varphi) = T_{dr} t_{mid}(\varphi) = 2\pi T_{dr} / (N_{sat} d(\varphi)), \quad (46)$$

где  $T_{dr}$  – драконический период обращения спутника. Для его вычисления применялась формула из [35]:

$$T_{dr} = \frac{2\pi(R_e + h)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{\mu}} + \frac{2\pi\varepsilon(1 - 4\cos^2(i))}{\sqrt{(R_e + h)\mu^3}}, \text{ с}. \quad (47)$$

Здесь драконический период вычисляется в секундах, поэтому прежде, чем подставлять в (46) результат расчета из (47), требуется предварительно разделить его на 3600 для перевода в часы.

Совокупность формул (41) – (47) обеспечивала определение среднего периода обзора  $\tau(\varphi)$  широты  $\varphi$  системой из  $N_{sat}$  малых спутников, функционирующих на ССО.

На рис. 4 показано, как использование перечня из одинаковых периодов  $\tau(\varphi)$  вместо длинной последовательности разных перерывов обзора  $t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_l$ , упрощает схему обнаружения МЛП, ранее изображенную на рис. 3.

Учитывая упрощенную схему на рис. 4, во многих формулах из состава (32) – (40) происходят изменения, придающие им следующий более простой вид:

$$T_j = \text{time}_j = j\tau(\varphi) - x; \quad (48)$$

$$S_j = \text{square}(T_j) = \text{square}(j\tau(\varphi) - x); \quad (49)$$

$$CT = \sum_{j=1}^{j=J} T_j F_j = \sum_{j=1}^{j=J} (j\tau(\varphi) - x) F_j; \quad (50)$$

$$CT_{\max} = T_J = J\tau(\varphi) - x; \quad (51)$$

$$CS = \sum_{j=1}^{j=J} S_j F_j = \sum_{j=1}^{j=J} \text{square}(j\tau(\varphi) - x) F_j; \quad (52)$$

$$CS_{\max} = \text{square}(T_J) = \text{square}(J\tau(\varphi) - x). \quad (53)$$

Далее нужно отметить, что стадия 2 в упрощенном алгоритме вообще исчезает.

Кроме того, добавим, что максимальные значения  $CT_{\max}$  и  $CS_{\max}$  не могут превышать следующих ограничений:

$$CT_{\max} = \text{square}^{-1}(\sigma_{\max}(h)) + \tau(\varphi) = 5 \left( \sqrt{\sigma_{\max}(h)} - \sqrt{S_{\text{beg}}} \right) / (3,3V_{fr}) + \tau(\varphi), \quad (54)$$

где  $\sigma_{\max}(h)$  определяется по формуле (18)

$$CS_{\max} < \text{square}(CT_{\max}). \quad (55)$$

В формулах (49), (52), (53), (55) функция square задаётся в виде выражений (6) или (21).

### 9. Результаты расчетов по упрощенной схеме обнаружения малоразмерных лесных пожаров

На основе упрощенной схемы обнаружения МЛП были проведены расчеты в соответствии с набором исходных данных в постановке задачи. Точнее говоря, рассматривались все ССО в диапазоне высот  $h$  от 250 до 1000 км с шагом 50 км. Число спутников  $N_{\text{sat}}$  варьировалось в пределах от 1 до 30 с шагом в один МКА. Минимальная площадь  $\sigma(h)$  МЛП, обнаружимого в надире, определялась по формуле (1). Ввиду (2) начальная площадь пожара принята равной  $S_{\text{beg}} = 6 \text{ м}^2$ . В соответствии с (7) был выбран диапазон скоростей фронтальной зоны пожара  $V_{fr} = 5 \div 50 \text{ м/ч}$  с шагом 0,5 м/ч.

Для главного критерия  $\text{VER}(T_{\text{lim}})$  допустимое (предельное) время обнаружения пожара  $T_{\text{lim}}$  задавалось в интервале от 1-го до 4-х ч через каждые 0,5 ч.

Основные результаты даны в табл. 1 – 3. Анализируя их, можно найти лучшие сочетания числа спутников и высоты орбит для рассматриваемых критериев эффективности.



Рис. 4. Упрощенная схема обнаружения малоразмерного лесного пожара в  $j$ -й по счёту из моментов зондирования, которые чередуются с периодом  $\tau$

Таблица 1

Значения главного критерия  $\text{VER}(T_{\text{lim}})$  для космических систем из минимального количества малых космических аппаратов, обеспечивающих  $\text{VER}(T_{\text{lim}}) \leq 0,01$

Число МКА	Высота орбиты $h$ [км]	Допустимое время обнаружения лесного пожара $T_{\text{lim}}$ , ч						
		1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
30	250	0,0135						
	17	250	0,0084					
11	250			0,0085				
	300			0,0079				
8	300				0,0065			
	350				0,0071			
	400				0,0090			
6	300					0,0084		
	350					0,0062		
	400					0,0070		
	450					0,0087		
5	300						0,0074	
	350						0,0046	
	400						0,0046	
	450						0,0056	
	500						0,0069	
	550						0,0081	
	600						0,0088	
650						0,0098		
4	350							0,0055
	400							0,0044
	450							0,0048
	500							0,0057
	550							0,0069
	600							0,0078
	650							0,0086
	700							0,0091
750							0,0098	

Таблица 2

Лучшие системы по главному критерию ВЕР( $T_{lim}$ )

Число МКА	Предел времени обнаружения пожара $T_{lim}$ , ч						
	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
1	<u>0,9135</u> 1000	<u>0,8205</u> 1000	<u>0,7062</u> 1000	<u>0,5830</u> 1000	<u>0,4546</u> 1000	<u>0,3230</u> 1000	<u>0,2022</u> 1000
2	<u>0,8334</u> 1000	<u>0,6332</u> 1000	<u>0,4123</u> 1000	<u>0,2345</u> 1000	<u>0,1439</u> 1000	<u>0,0878</u> 850	<u>0,0502</u> 750
3	<u>0,7469</u> 1000	<u>0,4555</u> 1000	<u>0,2541</u> 1000	<u>0,1354</u> 800	<u>0,0670</u> 650	<u>0,0325</u> 600	<u>0,0151</u> 500
4	<u>0,6668</u> 1000	<u>0,3536</u> 1000	<u>0,1702</u> 750	<u>0,0719</u> 600	<u>0,0299</u> 500	<u>0,0122</u> 450	<u>0,0044</u> 400
5	<u>0,5821</u> 1000	<u>0,2765</u> 750	<u>0,1071</u> 600	<u>0,0399</u> 500	<u>0,0139</u> 400	<u>0,0046</u> 350 – 400	<u>0,0012</u> 350
6	<u>0,5219</u> 1000	<u>0,2094</u> 600	<u>0,0685</u> 500	<u>0,0215</u> 400	<u>0,0062</u> 350	<u>0,0016</u> 300	<u>0,0002</u> 300
7	<u>0,4614</u> 750	<u>0,1540</u> 550	<u>0,0448</u> 450	<u>0,0119</u> 350	<u>0,0029</u> 300	<u>0,0005</u> 300	<u>0</u> 250 – 300
8	<u>0,3979</u> 700	<u>0,1134</u> 500	<u>0,0284</u> 400	<u>0,0065</u> 300	<u>0,0013</u> 300	<u>0,0001</u> 250	<u>0</u> 250 – 350
9	<u>0,3392</u> 600	<u>0,0827</u> 450	<u>0,0184</u> 350	<u>0,0036</u> 300	<u>0,0004</u> 250	<u>0</u> 250 – 300	<u>0</u> 250 – 400
10	<u>0,2963</u> 500	<u>0,0617</u> 400	<u>0,0118</u> 300	<u>0,0018</u> 250	<u>0,0001</u> 250	<u>0</u> 250 – 350	<u>0</u> 250 – 450
11	<u>0,2421</u> 500	<u>0,0447</u> 350	<u>0,0079</u> 300	<u>0,0009</u> 250	<u>0</u> 250	<u>0</u> 250 – 350	<u>0</u> 250 – 550
12	<u>0,2041</u> 450	<u>0,0346</u> 350	<u>0,0051</u> 250	<u>0,0005</u> 250	<u>0</u> 250 – 300	<u>0</u> 250 – 400	<u>0</u> 250 – 600
13	<u>0,1717</u> 450	<u>0,0250</u> 300	<u>0,0032</u> 250	<u>0,0003</u> 250	<u>0</u> 250 – 300	<u>0</u> 250 – 450	<u>0</u> 250 – 700
14	<u>0,1463</u> 400	<u>0,0198</u> 300	<u>0,0023</u> 250	<u>0,0001</u> 250	<u>0</u> 250 – 350	<u>0</u> 250 – 500	<u>0</u> 250 – 750
15	<u>0,1261</u> 350	<u>0,0150</u> 250	<u>0,0016</u> 250	<u>0</u> 250	<u>0</u> 250 – 350	<u>0</u> 250 – 550	<u>0</u> 250 – 800
16	<u>0,1005</u> 350	<u>0,0109</u> 250	<u>0,0011</u> 250	<u>0</u> 250	<u>0</u> 250 – 400	<u>0</u> 250 – 600	<u>0</u> 250 – 850
17	<u>0,0865</u> 350	<u>0,0084</u> 250	<u>0,0008</u> 250	<u>0</u> 250	<u>0</u> 250 – 400	<u>0</u> 250-650	<u>0</u> 250 – 900
18	<u>0,0721</u> 300	<u>0,0067</u> 250	<u>0,0005</u> 250	<u>0</u> 250 – 300	<u>0</u> 250 – 450	<u>0</u> 250 – 700	<u>0</u> 250 – 1000
19	<u>0,0605</u> 300	<u>0,0055</u> 250	<u>0,0003</u> 250	<u>0</u> 250 – 300	<u>0</u> 250-450	<u>0</u> 250 – 700	<u>0</u> 250 – 1000
20	<u>0,0506</u> 300	<u>0,0045</u> 250	<u>0,0002</u> 250	<u>0</u> 250 – 300	<u>0</u> 250 – 500	<u>0</u> 250-750	<u>0</u> 250 – 1000
21	<u>0,0450</u> 300	<u>0,0037</u> 250	<u>0,0001</u> 250	<u>0</u> 250 – 350	<u>0</u> 250 – 550	<u>0</u> 250 – 800	<u>0</u> 250 – 1000
22	<u>0,0355</u> 250	<u>0,0030</u> 250	<u>0,0001</u> 250	<u>0</u> 250 – 350	<u>0</u> 250 – 550	<u>0</u> 250 – 800	<u>0</u> 250 – 1000
23	<u>0,0302</u> 250	<u>0,0025</u> 250	<u>0,0001</u> 250	<u>0</u> 250 – 350	<u>0</u> 250 – 600	<u>0</u> 250 – 850	<u>0</u> 250 – 1000
24	<u>0,0263</u> 250	<u>0,0019</u> 250	<u>0</u> 250	<u>0</u> 250 – 400	<u>0</u> 250-600	<u>0</u> 250 – 850	<u>0</u> 250 – 1000
25	<u>0,0224</u> 250	<u>0,0014</u> 250	<u>0</u> 250	<u>0</u> 250 – 400	<u>0</u> 250 – 650	<u>0</u> 250 – 900	<u>0</u> 250 – 1000
26	<u>0,0201</u> 250	<u>0,0011</u> 250	<u>0</u> 250	<u>0</u> 250 – 400	<u>0</u> 250 – 650	<u>0</u> 250 – 900	<u>0</u> 250 – 1000
27	<u>0,0182</u> 250	<u>0,0008</u> 250	<u>0</u> 250	<u>0</u> 250 – 450	<u>0</u> 250 – 700	<u>0</u> 250 – 950	<u>0</u> 250 – 1000
28	<u>0,0166</u> 250	<u>0,0007</u> 250	<u>0</u> 250	<u>0</u> 250 – 450	<u>0</u> 250 – 700	<u>0</u> 250 – 950	<u>0</u> 250 – 1000
29	<u>0,0147</u> 250	<u>0,0006</u> 250	<u>0</u> 250 – 300	<u>0</u> 250 – 500	<u>0</u> 250 – 700	<u>0</u> 250 – 950	<u>0</u> 250 – 1000
30	<u>0,0135</u> 250	<u>0,0005</u> 250	<u>0</u> 250 – 300	<u>0</u> 250 – 500	<u>0</u> 250 – 750	<u>0</u> 250 – 1000	<u>0</u> 250 – 1000

В табл. 1 представлены лучшие системы по главному критерию  $BER(T_{lim})$  при различных лимитах времени  $T_{lim}$ . При этом основным диапазоном считался 2 – 3 ч. Допустимый уровень вероятности равнялся 0,01, то есть 1%, что соответствует практически полному выявлению МЛП за заданное лимитирующее время.

Для  $T_{lim} = 2; 2,5; 3; 3,5$  и 4 ч в данной таблице даны значения  $BER(T_{lim})$  для минимального числа спутников  $N_{sat}$  в сочетании с высотами орбит  $h$ , на которых эти вероятности не превышают 0,01.

Для  $T_{lim} = 1$  ч не нашлось ни одной системы, реализующей столь высокий уровень  $BER(T_{lim})$  даже при наибольшем количестве спутников  $N_{sat} = 30$ . В связи с этим в рассматриваемой таблице для  $T_{lim} = 1$  ч представлена система, для которой просто достигается минимальное значение  $BER(T_{lim})$ . Добавим, что в рассматриваемой таблице красным цветом обозначены лучшие системы для каждого лимита времени.

По мере возрастания допустимого времени  $T_{lim}$  оптимальные («красные») высоты орбит в табл. 1 постепенно повышаются от 250 до 400 км. При этом для самого актуального интервала, от 2-х до 3-х ч, оптимальные высоты принадлежат ещё более узкому диапазону 300 – 350 км. Он и может быть рекомендован для перспективной системы МКА, если стремиться к практически полному обнаружению МЛП для каждого лимитирующего времени в диапазоне от 2-х до 3-х ч.

В табл. 2 результаты представлены в виде дробей, числителями которых служат лучшие значения  $BER(T_{lim})$ , а знаменателями – высоты  $h$  для их реализации.

По данным в табл. 2 видно, что для небольшого числа МКА оптимальны высокие орбиты. С ростом  $N_{sat}$  и  $T_{lim}$  высоты орбит неуклонно понижаются и, в конечном итоге, достигают 250 км. «Синим» цветом выделены лучшие системы для высот 500 – 550 км, в пределах которых находится орбита КА «Канопус-В-ИК».

«Красным» цветом выделены системы, реализующие стопроцентное обнаружение МЛП за заданное предельное время. Видно, что с ростом количества МКА диапазоны высот орбит, в которых обеспечивается полное выявление МЛП, все более и более расширяются, причем, в конце концов, реализуется обнаружение всех МЛП на любой высоте орбиты из всего рассматриваемого интервала от 250 до 1000 км.

Используя табл. 2, можно выбирать сочетания числа МКА и высоты орбиты, обеспечивающие наилучшую вероятность обнаружения МЛП за заданное предельное время.

В табл. 3 представлены оптимальные варианты систем МКА по двум остальным показателям из постановки задачи: среднему  $CT$  и максимальному  $CT_{max}$  временам обнаружения МЛП, а также еще по двум вспомогательным: средней  $CS$  и максимальной  $CS_{max}$  площадям обнаруженных МЛП.

Рассматривая данную таблицу, можно убедиться, что с ростом количества спутников неуклонно уменьшаются оптимальные высоты орбит, причём для каждого из показателей. Однако для разных показателей эти высоты различны. Для средних значений времени обнаружения  $CT$  и площади  $CS$  лесного пожара оптимальные высоты ближе друг к другу, чем для максимальных  $CT_{max}$  и  $CS_{max}$ . Наиболее низкие орбиты характерны для максимального времени обнаружения пожара  $CT_{max}$ .

Таблица 3

**Минимальные значения показателей  $CT$ ,  $CT_{max}$ ,  $CS$ ,  $CS_{max}$  и высот орбит  $h$ , на которых они реализуются**

Число МКА	$CT/h$ , ч	$CT_{max}/h$ , ч	$CS/h$ , м <sup>2</sup>	$CS_{max}/h$ , м <sup>2</sup>
1	2,95/1000	13,58/550	3337,9/1000	37941,4/950
2	1,97/1000	9,00/450	1376,5/1000	15392,8/850
3	1,62/1000	7,06/350	891,0/1000	9205,6/800
4	1,43/750	5,96/350	676,2/1000	6508,3/750
5	1,26/650	5,18/300	555,7/1000	4992,5/700
6	1,14/600	4,66/300	478,7/1000	4024,0/650
7	1,04/550	4,22/250	425,1/700	3367,1/600
8	0,96/500	3,88/250	385,7/650	2867,5/600
9	0,89/500	3,62/250	355,4/600	2534,3/600
10	0,84/450	3,40/250	331,4/600	2232,9/550
11	0,79/450	3,23/250	311,9/550	2017,3/550
12	0,75/400	3,09/250	295,7/550	1818,2/500
13	0,71/400	2,97/250	282,0/500	1657,4/500
14	0,68/400	2,86/250	270,3/500	1525,5/500
15	0,65/400	2,79/250	260,2/500	1415,7/500
16	0,62/350	2,71/250	251,3/450	1322,9/500
17	0,60/350	2,64/250	243,5/450	1226,2/450
18	0,57/350	2,57/250	236,5/450	1153,3/450
19	0,55/350	2,52/250	230,3/450	1090,0/450
20	0,54/350	2,47/250	224,7/400	1034,5/450
21	0,52/300	2,42/250	219,6/400	974,3/400
22	0,50/300	2,38/250	214,9/400	925,9/400
23	0,49/300	2,34/250	210,6/400	882,8/400
24	0,47/300	2,31/250	206,7/400	844,2/400
25	0,46/300	2,28/250	203,1/400	809,5/400
26	0,45/300	2,25/250	199,8/350	769,9/400
27	0,43/300	2,22/250	196,6/350	741,8/400
28	0,42/300	2,20/250	193,8/350	716,2/400
29	0,41/250	2,18/250	191,0/350	688,4/350
30	0,40/250	2,15/250	188,5/350	662,4/350

Для выявления МЛП в среднем за 2 ч требуются два спутника на орбитах с высотой 1000 км. Оптимальной высотой по критерию  $CT_{\max}$  для системы из тех же 2-х МКА служит  $h = 450$  км, на которой  $CT_{\max}$  составляет 9 ч.

Для системы из 4-х спутников среднее время  $CT$  обнаружения МЛП опускается ниже полутора часов при высоте орбиты 750 км, а максимальное время  $CT_{\max}$  оказывается чуть менее 6 ч для оптимальной высоты в 350 км.

Для 6-ти спутников среднее время  $CT$  равно 1,14 ч при высоте орбиты 600 км, а максимальное  $CT_{\max}$  составляет 4,66 ч для оптимальной высоты орбиты в 300 км.

Приведенные примеры показывают, насколько по-разному следует выбирать высоты орбит для минимизации средних и максимальных значений времени обнаружения МЛП.

Для обнаружения МЛП в среднем менее чем за 1 ч нужна система из 8-ми МКА на орбитах с  $h = 500$  км, что приблизительно соответствует орбите КА «Канопус-В-ИК». Наилучшая высота для минимизации максимального времени обнаружения МЛП для 8-ми МКА понижается до 250 км. Это означает (как и в случае примеров для 2-х – 6-ти МКА), что разница между оптимальными высотами орбит для минимизации среднего и максимального времени обнаружения МЛП является весьма существенной.

Для выявления очередного МЛП со средней площадью менее  $400 \text{ м}^2$ , то есть с размерами примерно  $20 \times 20$  м, необходимо, как следует из табл. 2, не менее 8-ми спутников на орбитах с высотой 650 км.

### Выводы

1. Разработан метод расчета числа спутников и высоты орбит для космической системы раннего обнаружения МЛП. Метод включает модель роста МЛП во времени, модель обнаружения МЛП с помощью бортового широкозахватного ИК-радиометра, полную модель и упрощенную схему процесса обнаружения МЛП спутниками космической системы, процедуру оптимизации вариантов построения космической системы на основе заданных показателей (критериев) эффективности.

2. Выполнен расчет космических систем по упрощенной схеме, в котором учитывались:

- число спутников 1 – 30 с шагом 1;
- высота круговых ССО 250 – 1000 км с шагом 50 км;
- скорость перемещения фронтальной кромки МЛП 5 – 50 м/ч с шагом 0,5 м/ч;

– главный критерий – вероятность не обнаружения МЛП за допустимое время, которое варьировало от 1 до 4 ч с шагом 0,5 ч;

– дополнительные критерии: среднее и максимальное время обнаружения МЛП, средняя и максимальная площадь обнаруживаемого МЛП.

### Литература

1. Виды лесных пожаров // Официальный сайт Уральской базы авиационной охраны лесов. – Екатеринбург. – URL : [uralaviales.ru](http://uralaviales.ru).
2. Лесные пожары. Тема 1 // Сетевое издание «Fireman.club»: [сайт]. – 2015 – 2021. – URL : <https://fireman.club/conspects/lesnyie-pozharyi-tema-1>.
3. Экстремальные ситуации. Лесной пожар // Мир путешествий и приключений : [сайт]. – 2000 – 2012. – URL : [www/outdoors.ru/extra>fire](http://www/outdoors.ru/extra>fire).
4. Виды природных пожаров // Некоммерческое партнерство «Прозрачный мир» : [сайт]. – 2000 – 2021. – URL : [info@transparentworld.ru](mailto:info@transparentworld.ru).
5. Внимание! Лесные пожары! // ООО «Ботик-технологии»: [сайт]. – 2005 – 2020. – URL : [www.botik.ru/park/rus/lesnye\\_poary](http://www.botik.ru/park/rus/lesnye_poary).
6. Предупреждение лесных пожаров // ОАО «ПЕЛЕНГ»: [сайт]. – Минск. – URL: [peleng.by/newsuseful-info](http://peleng.by/newsuseful-info).
7. 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.
8. 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.
9. Обзор параметров аппаратуры AVHRR. – URL: <https://lta.cr.usgs.gov/AVHRR>.
10. Официальный сайт проекта MODIS // NASA, США. – URL: <http://modis.gsfc.nasa.gov/>.
11. Многозональное сканирующее устройство малого разрешения МСУ-МР для космического информационного комплекса «Метеор-М». Принцип работы, эволюция, перспективы / Н. П. Акимов, К. В. Бадаев, Ю. М. Гектин [и др.] // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2015. – Т. 2. – Вып. 4. – С. 30 – 39.
12. BIRD Detection and Analysis of High temperature Events: First Results / В. Zhukov, K. Briess, E. Lorenz [et al.] // Proc. SPIE. – 2003. – Vol. 4886. – P. 160 – 171.
13. 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.
14. 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.
15. ИК-радиометры нового поколения на основе многоэлементных приемников излучения / Н. П. Акимов, Ю. М. Гектин, М. Б. Смелянский [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление, приложение. – 2007. – № 5. – С. 52.
16. Перспективный ИК-радиометр для оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций на территории России / Н. П. Акимов, К. В. Бадаев, Ю. М. Гектин [и др.] // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли (Материалы III Международной научной конференции). – Красноярск, 2016. – С. 46 – 49.
17. Патент № 2324151 С1 Российская Федерация, МПК G01J 3/06. Многоканальный сканирующий радиометр с широким углом обзора : № 2006132471/28 : заявл. 11.09.2006 : опубл. 10.05.2008 / Н. П. Акимов, Ю. М. Гектин, М. Б. Смелянский, А. Г. Фролов ; патентообладатель Российский НИИ космического приборостроения.
18. Обзор параметров аппаратуры TET-1. – URL : <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellitemissions/t/tet-1>.
19. Обзор параметров аппаратуры BIROS. – URL : <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellitemissions/b/biros>.
20. Сборник методик по прогнозированию возможных аварий, катастроф, стихийных бедствий в РСЧС. Книга 2. Методика оценки последствий лесных пожаров / МинЧС. – Москва : ВНИИ ГОЧС, 1994. – 42 с.
21. Указания по обнаружению и тушению лесных пожаров : введены Приказом Федеральной службы лесного хозяйства России от 30.06.95 № 100.
22. Векторный метод синтеза орбит и структуры систем спутников для многополосного обзора Земли / В. К. Саульский // Космические исследования. – 2016. – Т. 54 – № 4. – С. 334 – 346.
23. Анализ систем спутников для периодического обзора Земли / В. К. Саульский // Космические исследования. – 2017. – Т. 55 – № 4. – С. 290 – 304.
24. 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.
25. Рациональные орбиты для многополосного обзора Земли из космоса / В. К. Саульский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2015. – Т. 145. – № 2. – С. 42 – 56.
26. Векторный метод анализа спутниковых структур / А. В. Горбунов, В. К. Саульский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2015. – Т. 147. – № 4. – С. 18 – 28.
27. 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.
28. 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.
29. Ландсберг Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. – 6-е изд., стереотип. – Москва : ФИЗМАТГИЗ, 2003. – 848 с.
30. Анализ структуры группировок спутников типа «Метеор-М» / Л. А. Макриденко, А. В. Горбунов, И. Ю. Ильина [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. – 2020. – № 2 (113). – С. 5 – 21.
31. 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.
32. Соболев И. М. Метод Монте-Карло / И. М. Соболев. – Москва : НАУКА, 1968. – 64 с.
33. Метод оптимизации орбит и структуры ИСЗ для периодического круглосуточного обзора Земли / В. К. Саульский // Исследование Земли из космоса. – 1987. – № 1. – С. 111 – 121.
34. Рациональные орбиты ИСЗ, осуществляющих обзор Земли независимо от солнечного освещения / С. Д. Гришин, В. К. Саульский, Г. Р. Успенский // Исследование Земли из космоса. – 1983. – № 1. – С. 108 – 116.
35. Особенности комплексирования на борту ИСЗ приборов с различными полосами обзора / А. А. Асташкин, В. К. Саульский, Г. Р. Успенский // Исследование Земли из космоса. – 1981. – № 4. – С. 66 – 69.

Поступила в редакцию 20.08.2021

*Ирина Юрьевна Ильина, заместитель начальника научно-производственного комплекса «Космические комплексы», т. (495) 623-57-74, e-mail: npk@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»).

## DEVELOPMENT OF METHOD FOR CALCULATING THE NUMBER OF SATELLITES AND HEIGHT OF ORBITS FOR A SPACE SYSTEM FOR DETECTING SMALL-SIZED FOREST FIRES

I. Iu. Ilina, V. K. Saulskii

*An advanced problem of detecting small-sized forest fires using a system of satellites equipped with wide-coverage infrared radiometers is considered. A methodological approach has been developed to calculate the required number of satellites within the system and altitude of their sun-synchronous orbits. The approach includes the following components: wording of the problem, model for the development of the*



forest fire (in the course of time), model for detecting a small-sized forest fire with known characteristics of on-board infrared radiometers, model of the forest fire detection process, procedure for calculating space system configuration options, simplified scheme for detecting a small-sized forest fire. Calculations are performed according to a simplified scheme for the system configuration options where the number of satellites varies from 1 to 30, and the height of the orbit from 250 to 1000 km. The obtained results are presented in the form of tables that allows selecting the number of satellites and the height of the orbits minimizing the following efficiency indicators: probability of not detecting (skipping) a fire at a given time limit, the average and maximum fire detection times, the average and maximum fire area during its detection. **Key words:** wide-coverage infrared radiometer, small spacecraft, small forest fire, pixel, angle of sighting, swath, number of small spacecraft, height of the orbit, swath interruption.

### References

1. Types of forest fires // Official website of the Ural Aviation Forest Protection Base. – Yekaterinburg. – URL : [uralaviales.ru](http://uralaviales.ru).
2. Forest fires. Topic 1 // Online publication ‘Fireman.club’ : [website]. – 2015 – 2021. – URL : <https://fireman.club/conspects/lesnyie-pozharyi-tema-1>.
3. Extreme situations. Forest fire // The world of travel and adventure : [website]. – 2000 – 2012. – URL : [www/outdoors.ru>additional>fire](http://www.outdoors.ru>additional>fire).
4. Types of wildfires // Non-profit partnership ‘Transparent World’ : [website]. – 2000 – 2021. – URL : [info@transparentworld.ru](mailto:info@transparentworld.ru).
5. Attention! Forest fires! // LLC ‘Bot-technologies’ : [website]. – 2005 – 2020. – URL : [www.botik.ru/park/rus/lesnye\\_pojury](http://www.botik.ru/park/rus/lesnye_pojury).
6. Prevention of forest fires // JSC PELENG : [website]. – Minsk. – URL : [peleng.by>newsuseful-info](http://peleng.by>newsuseful-info).
7. The Russian system of satellite monitoring of forest fires / Ershov D. V., Korovin G.N., Lupian E.A. [et al.] // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. Collection of scientific articles. – 2004. – Issue 1. – Pp. 47 – 57.
8. Comparison of the results of monitoring of wildfires in the Krasnoyarsk Territory by ISDM-Rosleskhos and CASCADE systems / S. V. Kobyzhakova // Scientific and analytical journal ‘Siberian Fire and Rescue Bulletin’. – 2016. – No. 1. – Pp. 45 – 48.
9. Overview of AVHRR equipment parameters. – URL : <https://lta.cr.usgs.gov/AVHRR>.
10. Official website of the MODIS project // NASA, USA. - URL: <http://modis.gsfc.nasa.gov/>.
11. Multi-zone scanning device of small resolution MSU-MR for the space information system ‘Meteor-M’. The principle of operation, evolution, prospects / N. P. Akimov, K. V. Badaev, Iu. M. Gektin [et al.] // Rocket and space instrumentation and information systems. – 2015. – T. 2. – Vol. 4. – P. 30 – 39.
12. BIRD Detection and Analysis of High temperature Events: First Results / B. Zhukov, K. Briess, E. Lorenz [et al.] // Proc. SPIE. – 2003. – Vol. 4886. – P. 160 – 171.
13. Space system for real-time monitoring of industrial and natural disasters Canopus-V with Canopus-V-IK / edited by L. A. Makridenko, S. N. Volkov, A. V. Gorbunov, R. S. Salikhov, S. I. Terekhov. – Moscow : VNIIEM Corporation JSC, 2017. – 130 p.
14. The first results of operation of the IR radiometer MSU-IK-SRM as part of ‘Canopus-V-IK’ / 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.
15. New generation IR radiometers based on multi-element radiation receivers / N. P. Akimov, Iu. M. Gektin, M. B. Smelianskii [et al.] // Mechatronics, automation, control, application. – 2007. – No. 5. – 52 p.
16. An advanced IR radiometer for operational monitoring of man-made and natural emergencies on the territory of Russia / N. P. Akimov, K. V. Badaev, Iu. M. Gektin [et al.] // Regional problems of remote sensing of the Earth (Materials of the III International Scientific Conference). – Krasnoyarsk, 2016. – Pp. 46 – 49.
17. Patent No. 2324151 C1 Russian Federation, IPC G01J 3/06. Multichannel scanning radiometer with a wide viewing angle : No. 2006132471/28 : application of 11.09.2006 : published on 10.05.2008 / N. P. Akimov, Iu. M. Gektin, M. B. Smelianskii, A. G. Frolov ; patent holder of the Russian Research Institute of Space Instrumentation.
18. Overview of the parameters of the TET-1 equipment. – URL : [ps://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellites/t/tet-1](https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellites/t/tet-1).
19. Overview of the parameters of the BIROS equipment. – URL : <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellitemissions/b/biros>.
20. Collection of methods for predicting possible accidents, catastrophes, natural disasters in emergency situations. Book 2. Methodology for assessing the consequences of forest fires / Ministry of Emergency Situations. – Moscow : VNII GOChS, 1994. – 42 p.
21. Instructions for the detection and extinguishing of forest fires: introduced by Order of the Federal Forestry Service of Russia dated 30.06.95 No. 100.
22. Vector method of synthesis of orbits and structures of satellite systems for a multi-band survey of the Earth / V. K. Saulskii // Space research. – 2016. – Vol. 54. – No. 4. – Pp. 334 – 346.
23. Analysis of satellite systems for periodic Earth survey / V. K. Saulskii // Space research. – 2017. – Vol. 55. – No. 4. – Pp. 290 – 304.
24. Choosing the structure of satellite systems for meteorology and detection of forest fire foci based on the vector model of the Earth survey / V. K. Saulskii // Space Research. – 2020. – Vol. 58. – No. 4. – Pp. 331 – 343.

25. Rational orbits for a multi-band view of the Earth from space / V. K. Saulskii // Matters of Electromechanics. VNIEM Proceedings. – Moscow : VNIEM Corporation JSC, 2015. – Vol. 145. – No. 2. – Pp. 42 – 56.
26. Vector method of analysis of satellite structures / A. V. Gorbunov, V. K. Saulskii // Matters of Electromechanics. VNIEM Proceedings. – Moscow : VNIEM Corporation JSC, 2015. – Vol. 147. – No. 4. – Pp. 18 – 28.
27. Application of the vector model of the Earth survey for the analysis of satellite images in orbits (where projections of the spacecraft orbit on the Earth's surface match every day). / A.V. Gorbunov, V. K. Saulskii // Matters of Electromechanics. VNIEM Proceedings. – Moscow : VNIEM Corporation JSC, 2016. – Vol. 153. – No. 4. – Pp. 29 – 46.
28. Vector model of the Earth survey and directions of its use / A.V. Gorbunov, V. K. Saulskii // Matters of Electromechanics. VNIEM Proceedings. – Moscow : VNIEM Corporation JSC, 2017. – Vol. 156. – No. 1. – Pp. 21 – 32.
29. Landsberg G. S. Optics / G. S. Landsberg. – 6th ed., stereotype. – Moscow : FIZMATGIZ, 2003. – 848 p.
30. Analysis of the structure of the constellation of satellites of the Meteor-M type / L. A. Makridenko, A. V. Gorbunov, I. Iu. Ilina [et al.] // Cosmonautics and rocket science. – 2020. – № 2 (113). – Pp. 5 – 21.
31. Analysis of the structure of multi-satellite constellation for early detection of small-sized forest fires / L. A. Makridenko, A. V. Gorbunov, I. Iu. Ilina [et al.] // Cosmonautics and rocket science. – 2020. – № 4 (115). – Pp. 5 – 20.
32. Sobol I. M. Monte Carlo Method / I. M. Sobol. – Moscow : NAUKA, 1968. – 64 p.
33. The method of optimizing the orbits and the structure of the satellite for periodic round-the-clock survey of the Earth / V. K. Saulskii // Exploration of the Earth from space. – 1987. – No. 1. – Pp. 111 – 121.
34. Rational orbits of satellites surveying the Earth independently of sunlight / S. D. Grishin, V. K. Saulskii, G. R. Uspenskii // Exploration of the Earth from space. – 1983. – No. 1. – Pp. 108 – 116.
35. Features of the integration of instruments with different swaths on board the earth satellite / A. A. Astashkin, V. K. Saulskii, G. R. Uspenskii // Exploration of the Earth from space. – 1981. – No. 4. – Pp. 66-69.

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

*Viktor Konstantinovich Saulskii, Doctor of Technical Sciences,  
Chief Specialist, tel.: +7 (495) 623-57-74,  
e-mail: ntk.vniem@bk.ru.  
(JSC «VNIEM Corporation»).*