

**ДВУХРЕЖИМНЫЙ СПОСОБ НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
И АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**Д. Г. Цируль^{1*}, В. И. Ермолаев²¹Конструкторское бюро «Арсенал» имени М. В. Фрунзе
Российская Федерация, 195009, г. Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 1-3²Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова
Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1

*E-mail: derek53@ya.ru

В настоящее время космические аппараты дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) нашли широкое практическое применение для решения различных социально-экономических задач, таких как получение информации с районов чрезвычайных ситуаций или районов со слабо развитой наземной инфраструктурой. Существенным недостатком современных КА ДЗЗ является низкая оперативность получения информации с заданного района земной поверхности. Существующие способы снижения периодичности наблюдения заданного района земной поверхности предполагают значительное наращивание численного состава орбитальных группировок КА ДЗЗ. Однако данный способ требует значительных экономических затрат. Предложен двухрежимный способ наблюдения земной поверхности. Данный способ предусматривает использование в процессе функционирования КА ДЗЗ режима глобального наблюдения и режима регионального наблюдения. Переход из одного режима наблюдения в другой предлагается осуществлять за счет изменения периода обращения КА вокруг Земли путем изменения большей полуоси рабочей орбиты с помощью маршевой двигательной установки. В рамках проводимых исследований была разработана методика определения основных параметров орбит глобального и регионального наблюдения. Для обеспечения прохождения трассы КА ДЗЗ через заданный район земной поверхности рассматривался вопрос фазирования при переходе в режим регионального наблюдения. В результате чего была разработана методика определения временных и энергетических затрат на изменение режима наблюдения. Исходя из необходимости математически описать взаимосвязь рабочей точки, принадлежащей орбите фазирования, с географическими координатами заданного района земной поверхности, была разработана методика расчета трасс КА ДЗЗ, функционирующих с применением двухрежимного способа наблюдения. Вышеперечисленные методики являются составными частями математической модели, описывающей двухрежимный способ наблюдения, которая послужит основой для формирования требований к перспективным двигателям, а также к двигательным и энергетическим установкам космических аппаратов. Сравнение двухрежимного способа наблюдения с известными способами повышения оперативности получения информации с заданных регионов показывает, что использование двухрежимного способа позволяет существенно снизить периодичность обзора при относительно небольших экономических и приемлемых энергетических затратах.

Ключевые слова: двухрежимный способ наблюдения земной поверхности, повышение оперативности получения информации, дистанционное зондирование Земли.

Sibirskii Gosudarstvennyi Aerokosmicheskii Universitet
imeni Akademika M. F. Reshetneva. Vestnik
Vol. 18, No. 1, P. 176–186**THE DUAL-MODE METHOD FOR MONITORING THE EARTH'S SURFACE AND THE ANALYSIS
OF POSSIBLE USAGE IN THE OPERATION OF SPACECRAFT EARTH REMOTE SENSING**D. G. Tsurul^{1*}, V. I. Ermolaev²¹Design Bureau "Arsenal" M. V. Frunze
1-3, Komsomola Str., Saint-Petersburg, 195009, Russian Federation²Baltic State Technical University "Voenmeh" D. F. Ustinov
1, 1 Krasnoarmeiskay Str., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation

*E-mail: derek53@ya.ru

At the moment the Earth's remote sensing spacecrafts (ERS SC) have found a wide practical application for solving different social and economical objectives, such as getting the information from emergency areas or areas with a low developed ground infrastructure. The major disadvantage of modern ERS SCs is a low efficiency of getting the

information from the specified areas of the ground. The existing ways to decrease supervision frequency for a specified ground surface area suppose a vast increase of ERS SC group's number. However, this way requires large economic costs. The authors have proposed a dual-mode method for monitoring the Earth's surface. This way foresees to use a mode of global supervision and a mode of regional supervision while in ERC SC operation. The transfer from one mode to another is proposed to be performed by the period change of SC's circuit of Earth with changing the bigger semi-axis of working orbit using a service propulsion system. In the frames of performed researches a method was created to define the main orbit parameters for global and regional supervisions. To ensure an ERS SC to pass a way through the defined area of the Earth's surface, we considered phasing when transferring to the mode of regional supervision. As the result, it was developed a definition method of time and financial costs for the supervision mode changing. As it was required to describe mathematically the interconnection of working point, referring to the phasing orbit, with the geographical coordinates of the defined ground area, the authors have developed the method to calculate the ERS SC ways, operating with the application of the dual-mode method for monitoring. The mentioned above methods are the integral parts of the mathematic model, describing the dual-mode method for monitoring, which will become a basis for forming the requirements to the future engines and power plants of spacecrafts. The comparing of the two-mode supervision way with other known ways of increasing the efficiency of getting information from defined regions shows that the application of the dual-mode method allows to decrease essentially the period of survey frequencies with relatively low economic costs and acceptable power consumption.

Keywords: the dual-mode method for monitoring the Earth's surface, increasing the efficiency of getting information, remote sensing of the Earth.

Введение. Проводимые в процессе развития ракетно-космической техники исследования направлены не только на изучение и освоение дальнего космического пространства, но и на улучшение наземной инфраструктуры за счет использования космических аппаратов различного назначения в околоземном космическом пространстве. Широко используются спутники связи, метеорологические КА, аппараты, решающие вопросы геодезии, и т. д. Но все же одной из наиболее важных областей практического применения космических аппаратов остается дистанционное зондирование Земли [1]. КА ДЗЗ применяют для решения различных социально-экономических задач. Существенным недостатком современных орбитальных группировок данного класса является низкая оперативность получения информации с заданного района земной поверхности [2]. Уменьшение периодичности обзора в ближайшей перспективе предполагается за счет существенного наращивания количества КА ДЗЗ в составе орбитальных группировок. Однако такой подход требует значительных экономических затрат. В связи с этим возникает необходимость разработки новых способов повышения оперативности получения информации с заданного района поверхности Земли при ограниченных экономических затратах [3]. Для решения данной задачи, в первую очередь, необходимо произвести анализ принципов орбитального функционирования космических аппаратов [4–6].

Суть двухрежимного способа наблюдения. В результате проведенных исследований установлено, что КА ДЗЗ решают два типа задач: плановые задачи глобальной съемки земной поверхности и оперативные задачи съемки отдельных регионов [7]. В связи с этим был предложен двухрежимный способ наблюдения земной поверхности [3]. Данный способ предусматривает использование в процессе функционирования КА ДЗЗ двух режимов наблюдения земной поверхности: режима глобального наблюдения и режима регионального наблюдения.

Под режимом глобального наблюдения (РГН) понимается плановая периодическая съемка всей или

значительной части поверхности Земли. Данный режим используется существующими КА ДЗЗ.

Под режимом регионального наблюдения (РРН) понимается оперативная съемка заданного района на поверхности Земли с малой периодичностью. Данный режим целесообразно использовать при возникновении чрезвычайных ситуаций или при решении социально-экономических задач в регионах со слаборазвитой наземной инфраструктурой.

Переход из одного режима наблюдения в другой предлагается осуществлять за счет изменения периода обращения КА вокруг Земли путем изменения большей полуоси рабочей орбиты с помощью маршевой двигательной установки КА [8; 9].

Основным режимом наблюдения является режим глобального наблюдения. Данный режим реализуется за счет нахождения КА ДЗЗ на кратной геосинхронной орбите с периодом обращения, обеспечивающим ежесуточное смещение трассы полета на величину ширины полосы обзора КА ДЗЗ. При возникновении необходимости наблюдения заданного района земной поверхности с низкой периодичностью аппарат переводят в режим регионального наблюдения. Для этого осуществляется переход с кратной геосинхронной орбиты на близкую компланарную суточно-синхронную орбиту, обеспечивающую ежесуточное повторение трассы [7].

Такой подход позволяет снизить периодичность получения оперативной информации при ограниченном количестве КА в составе орбитальной группировки и одновременно сохранить возможность глобального обзора земной поверхности, необходимую для решения плановых задач.

Методика определения основных параметров орбит. Для исследования предложенного двухрежимного способа наблюдения земной поверхности были установлены параметры рабочих орбит, обеспечивающие реализацию указанных режимов наблюдения, и проведено оценивание снижения периодичности обзора. В процессе проведения исследований рассматривались следующие параметры землеобзора, представленные на рис. 1:

- $\gamma_{об}$ – угол обзора КА;
- $\Psi_{об}$ – геоцентрический угол обзора КА;
- B – ширина полосы обзора;
- σ – минимальный угол возвышения КА над горизонтом.

Данные параметры землеобзора связаны между собой следующими соотношениями:

$$\gamma_{об} = \arcsin\left(\frac{R_3 \cos \sigma}{R_3 + H}\right), \quad (1)$$

$$\Psi_{об} = \frac{\pi}{2} - \gamma_{об} - \sigma, \quad (2)$$

$$B = 2\Psi_{об} R_3, \quad (3)$$

где R_3 – радиус Земли; H – высота орбиты КА.

При использовании данных соотношений значение минимального угла возвышения КА над местным горизонтом, определяемое типом используемой бортовой аппаратуры дистанционного зондирования, принималось в качестве исходной величины, а высота орбиты КА являлась искомым параметром.

Функционирование КА ДЗЗ в РРН предполагает максимально оперативное получение информации о заданном районе. Наиболее частое прохождение трассы аппарата через заданный район может быть обеспечено за счет использования суточно-синхронных орбит. Суточно-синхронными называются орбиты, для которых цикличность трассы КА составляет сутки. Для таких орбит количество витков, совершаемых КА в течение звездных суток, должно быть целым числом [7]. Данный параметр называют также кратностью орбиты. Кратность орбиты определяется соотношением

$$n_p = \frac{T_3}{T_p}, \quad (4)$$

где T_3 – звездные сутки; T_p – период обращения КА по орбите регионального наблюдения.

Используя формулу для определения периода обращения КА, можно получить следующее выражение для высоты орбиты регионального наблюдения:

$$H_p = \sqrt[3]{\frac{K_3 T_3^2}{4\pi^2 n_p^2} - R_3}, \quad (5)$$

где K_3 – гравитационный параметр Земли.

Проведенный анализ трасс полета показал, что при использовании околополярных орбит, в том числе солнечно-синхронных, можно обеспечить обзор любого района, лежащего в заданном диапазоне широт на поверхности Земли, дважды в сутки. Для этого необходимо определить положение оптимальной рабочей точки на орбите регионального наблюдения. При этом наблюдение заданного региона осуществляется на восходящих и нисходящих витках орбиты.

Таким образом, для околополярных орбит выражение для периодичности обзора в РРН можно представить следующим образом:

$$T_{OP} = \frac{1}{N}, \quad (6)$$

где N – количество КА в орбитальной группировке.

В табл. 1 приведены основные параметры орбит регионального наблюдения и значения периодичностей обзора заданного района земной поверхности при использовании одного КА в составе орбитальной группировки в диапазоне высот 200–1850 км.

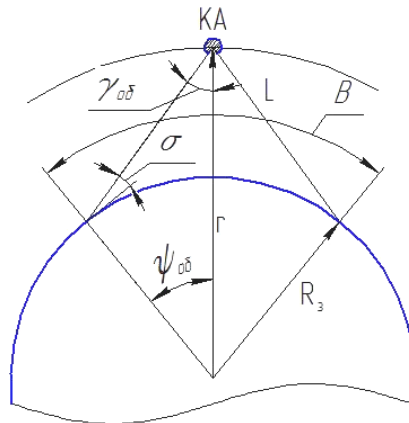


Рис. 1. Параметры землеобзора КА

Таблица 1

Основные параметры круговых орбит регионального наблюдения

Число витков орбиты в сутки	n_p	12	13	14	15	16
Период обращения	T_p , с	7180	6628	6155	5744	5386
Межвитковое расстояние	$\Delta\lambda_{м.в}$, град	30	27,7	25,7	24	22,5
Высота орбиты	H_p , км	1673	1255	887,7	561,4	269,4
Периодичность обзора	T_{OP} , сут	1	1	1	1	1

С учетом достигнутого уровня развития целевых систем дистанционного зондирования Земли, аэродинамического сопротивления атмосферы и полученных значений периодичности обзора, для РРН наиболее предпочтительными являются орбиты высотой 561,4 и 887,7 км.

Функционирование КА ДЗЗ в РГН предполагает периодическое зондирование всей или значительной части поверхности Земли. Для глобального обзора земной поверхности КА должен находиться на орбите, обеспечивающей суточное смещение трассы КА в восточном или западном направлении на ширину полосы обзора. Суточное смещение трассы КА имеет место в случае, когда отношение звездных суток к периоду обращения по орбите не является целым числом:

$$n_{\Gamma} = \frac{T_3}{T_{\Gamma}} \tag{7}$$

Для обеспечения примыкания полос обзора величина суточного смещения трассы КА должна быть равной геоцентрическому углу обзора КА. При использовании смещения трассы КА в западном направлении имеем

$$\Delta\lambda_{\text{сут}} = 2\psi_{\text{об.}\Gamma}, \tag{8}$$

где $\psi_{\text{об.}\Gamma}$ – геоцентрический угол обзора с орбиты глобального наблюдения.

Суточное смещение трассы связано с межвитковым смещением трассы соотношением

$$\Delta\lambda_{\text{сут}} = (1 - \{n_{\Gamma}\}) \Delta\lambda_{\text{м.в}}, \tag{9}$$

где $\{n_{\Gamma}\}$ – дробная часть значения n_{Γ} .

Зависимость межвиткового смещения трассы и числа витков орбиты за сутки описывается соотношением

$$\Delta\lambda_{\text{м.в}} = \frac{2\pi}{n_{\Gamma}} \tag{10}$$

Запишем очевидное равенство:

$$1 - \{n_{\Gamma}\} = ([n_{\Gamma}] + 1) - n_{\Gamma}, \tag{11}$$

где $[n_{\Gamma}]$ – целая часть значения n_{Γ} .

Используя выражения (7)–(11), получаем формулу для определения требуемого значения n_{Γ} :

$$n_{\Gamma} = \frac{[n_{\Gamma}] + 1}{\frac{\psi_{\text{об.}\Gamma}}{\pi} + 1} \tag{12}$$

Для обеспечения суточного смещения трассы КА по долготе в восточном направлении должно выполняться условие

$$\Delta\lambda_{\text{сут}} = \Delta\lambda_{\text{м.в}} - 2\psi_{\text{об.}\Gamma} \tag{13}$$

Аналогично получаем формулу для определения требуемого значения n_{Γ} при смещении трассы в восточном направлении:

$$n_{\Gamma} = \frac{[n_{\Gamma}]}{1 - \frac{\psi_{\text{об.}\Gamma}}{\pi}} \tag{14}$$

Используя выражение для периода обращения по орбите

$$T_{\Gamma} = 2\pi \sqrt{\frac{(H_{\Gamma} + R_3)^3}{K_3}}, \tag{15}$$

из решения трансцендентных уравнений (12) и (14) получаем значения высот орбит глобального наблюдения H_{Γ} для заданных целых чисел $[n_{\Gamma}]$.

Периодичность обзора в РГН можно определить по формуле:

$$T_{\text{ог}} = \frac{\Delta\lambda_{\text{м.в}}}{2\psi_{\text{об.}\Gamma} N} \tag{16}$$

В табл. 2 и 3 приведены параметры орбит глобального наблюдения для западного и восточного смещения трассы КА в диапазоне высот 200–1850 км, полученные при помощи выведенных соотношений. При проведении расчетов значение минимального угла возвышения КА над горизонтом принималось равным $\sigma = 65^\circ$. Значения периодичностей обзора приведены для случая использования в составе орбитальной группировки одного КА.

Таблица 2

Основные параметры круговых орбит глобального наблюдения для западного смещения трассы

Межвитковый сдвиг	$\Delta\lambda_{\text{м.в}}$, град	31	28,4	26,22	24,3	22,64
Число витков орбиты в сутки	n_{Γ}	11,62	12,67	13,73	14,81	15,9
Высота орбиты	H_{Γ} , км	1847	1387	982	621,7	298,7
Периодичность обзора	$T_{\text{ог}}$, сут	2,6	3,0	3,7	5,2	9,5

Таблица 3

Основные параметры круговых орбит глобального наблюдения для восточного смещения трассы

Межвитковый сдвиг	$\Delta\lambda_{\text{м.в}}$, град	29,15	27,07	25,3	23	22,4
Число витков орбиты в сутки	n_{Γ}	12,35	13,3	14,24	15,7	16,09
Высота орбиты	H_{Γ} , км	1522	1142	807,6	510,8	245,2
Периодичность обзора	$T_{\text{ог}}$, сут	2,9	3,4	4,3	6,0	11,3

Из представленных таблиц видно, что РГН обеспечивает глобальность обзора, но имеет низкую оперативность получения информации, а РРН обеспечивает высокую оперативность получения информации с заданного района на поверхности Земли, но не обеспечивает обзор всей земной поверхности. В связи с этим целесообразно использовать сочетание данных режимов в процессе функционирования КА ДЗЗ.

Исследование временных и энергетических затрат на изменение режима наблюдения. В связи с тем, что более жесткие требования к оперативности предъявляются при переходе из РГН в РРН, во время проведения исследований рассматривался именно этот случай.

Возможные способы изменения режима наблюдения можно разделить на два вида [10]:

- изменение режима наблюдения без использования орбиты фазирования;
- изменение режима наблюдения с использованием орбиты фазирования.

На рис. 2 изображен способ изменения режима наблюдения без использования орбиты фазирования. Суть данного способа заключается в том, что при поступлении команды на переход из РГН в РРН космический аппарат остается на ОГН (участок КА₀–КА₁) до наступления такого взаимного положения между КА и рабочей точкой (РТ) на ОРН, когда гомановский переход с ОГН на ОРН (участок КА₁–КА₂, РТ₂) обеспечит попадание КА в требуемую рабочую точку на ОРН.

Математически данный способ можно описать следующей системой уравнений:

$$\varphi_{РТ} - \varphi_{КА} = \varphi_{СМ}, \quad (17)$$

$$\varphi_{КА} = t_{\Phi} \cdot \omega_{Г} + \pi, \quad (18)$$

$$\varphi_{РТ} = \omega_{Р} (t_{\Phi} + t_{\Pi}), \quad (19)$$

$$t_{\Pi} = \pi \sqrt{\frac{(r_{Г} + r_{Р})^3}{8K_3}}, \quad (20)$$

где $\varphi_{КА}$ – угловое перемещение КА за время изменения режима наблюдения; $\varphi_{РТ}$ – угловое перемещение рабочей точки на ОРН за время изменения режима наблюдения; $\varphi_{СМ}$ – угол между КА и рабочей точкой в начальный момент времени; $\omega_{Г}$ – угловая скорость вращения КА по ОГН; $\omega_{Р}$ – угловая скорость вращения рабочей точки по ОРН; t_{Φ} – время фазирования (ожидание начала маневра) на ОГН; t_{Π} – время выполнения маневра (гомановского перелета).

Подставляя соотношения (18)–(20) в (17), получаем выражение для определения времени фазирования на ОГН:

$$t_{\Phi} = \frac{\pi \left(1 - \sqrt{\frac{(r_{Г} + r_{Р})^3}{8r_{Р}^3}} \right) + \varphi_{СМ}}{\sqrt{K_3} \left(\frac{1}{r_{Р}^{3/2}} - \frac{1}{r_{Г}^{3/2}} \right)}. \quad (21)$$

Время изменения режима наблюдения (ИРН) представляет собой сумму:

$$t_{ИРН} = t_{\Phi} + t_{\Pi}. \quad (22)$$

Суммарное импульсное приращение скорости на изменение режима наблюдения без использования орбиты фазирования представляет собой сумму импульсных приращений скоростей на активных участках:

$$\Delta V_{\Sigma} = \Delta V_1 + \Delta V_2. \quad (23)$$

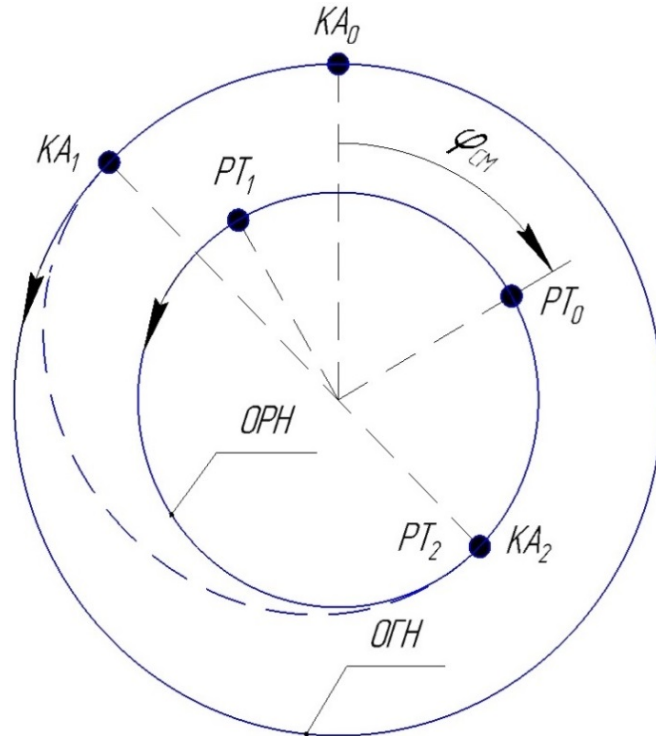


Рис. 2. Изменение режима наблюдения без использования орбиты фазирования

Выражения для импульсных приращений скоростей на активных участках можно представить следующим образом [4]:

$$\Delta V_1 = \sqrt{\frac{K_3}{r_\Gamma}} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{2r_p}{r_\Gamma + r_p}} \right), \quad (24)$$

$$\Delta V_2 = \sqrt{\frac{K_3}{r_p}} \cdot \left(\sqrt{\frac{2r_\Gamma}{r_\Gamma + r_p}} - 1 \right). \quad (25)$$

На рис. 3 изображен способ изменения режима наблюдения с использованием орбиты фазирования. При использовании данного способа в момент поступления команды на переход из РГН в РРН космический аппарат совершает перелет по гомановской схеме с ОГН на орбиту фазирования (участок КА₀–КА₁). На орбите фазирования КА находится (участок КА₁–КА₂) до наступления такого взаимного положения между КА и рабочей точкой на ОРН, когда гомановский переход с ОГН на ОРН (участок КА₂–КА₃, РТ₃) обеспечит попадание КА в требуемую рабочую точку.

Математически данный способ можно описать следующей системой уравнений:

$$\varphi_{РТ} - \varphi_{КА} = \varphi_{СМ}, \quad (26)$$

$$\varphi_{КА} = \pi + t_\Phi \cdot \omega_\Phi + \pi, \quad (27)$$

$$\varphi_{РТ} = \omega_p (t_{П1} + t_\Phi + t_{П2}), \quad (28)$$

$$t_{П1} = \pi \sqrt{\frac{(r_\Gamma + r_\Phi)^3}{8K_3}}, \quad (29)$$

$$t_{П2} = \pi \sqrt{\frac{(r_\Phi + r_p)^3}{8K_3}}, \quad (30)$$

где $t_{П1}$ – время перелета с ОГН на орбиту фазирования; $t_{П2}$ – время перелета с орбиты фазирования на ОРН; r_Φ – радиус орбиты фазирования.

Подставляя соотношения (27)–(30) в (26), получаем выражение для времени фазирования на орбите фазирования:

$$t_\Phi = \frac{\varphi_{СМ} + 2\pi - \frac{\pi}{r_p^{3/2}} \left(\sqrt{\frac{(r_\Gamma + r_\Phi)^3}{8}} + \sqrt{\frac{(r_\Phi + r_p)^3}{8}} \right)}{\sqrt{K_3} \left(\frac{1}{r_p^{3/2}} - \frac{1}{r_\Phi^{3/2}} \right)}. \quad (31)$$

Время изменения режима наблюдения при использовании орбиты фазирования представляет собой сумму:

$$t_{ИРН} = t_{П1} + t_\Phi + t_{П2}. \quad (32)$$

Двухимпульсный компланарный перелет между круговыми орбитами осуществляется по полуэллипсу Гомана. Перелет требует изменения скорости в перигее и апогее этого полуэллипса. В случае использования орбиты фазирования таких перелета будет два [11].

Суммарное импульсное приращение скорости на изменение режима наблюдения при использовании орбиты фазирования представляет собой сумму:

$$\Delta V_\Sigma = \Delta V_0 + \Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3. \quad (33)$$

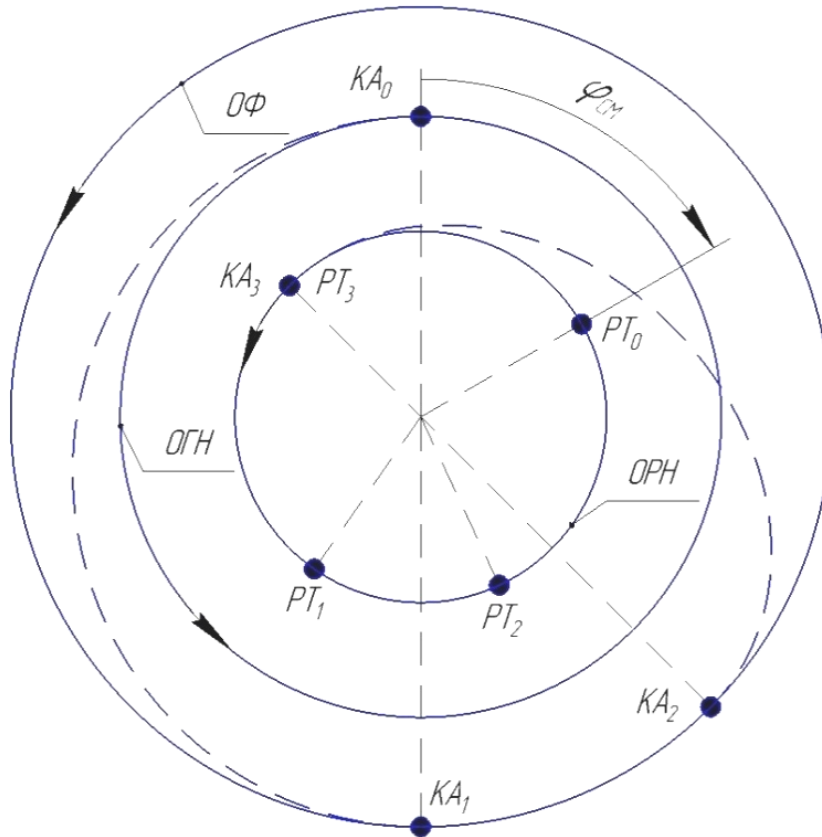


Рис. 3. Изменение режима наблюдения с использованием орбиты фазирования

Выражения для импульсных приращений скоростей на активных участках можно представить следующим образом:

$$\Delta V_0 = \sqrt{\frac{K_3}{r_\Gamma}} \cdot \left(\sqrt{\frac{2r_\Phi}{r_\Phi + r_\Gamma}} - 1 \right), \quad (34)$$

$$\Delta V_1 = \sqrt{\frac{K_3}{r_\Phi}} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{2r_\Gamma}{r_\Phi + r_\Gamma}} \right), \quad (35)$$

$$\Delta V_2 = \sqrt{\frac{K_3}{r_\Phi}} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{2r_p}{r_\Phi + r_p}} \right), \quad (36)$$

$$\Delta V_3 = \sqrt{\frac{K_3}{r_p}} \cdot \left(\sqrt{\frac{2r_\Phi}{r_\Phi + r_p}} - 1 \right). \quad (37)$$

С учетом достигнутого уровня развития целевой аппаратуры ДЗЗ, предпочтительным является использование орбиты глобального наблюдения высотой 621,7 км и орбиты регионального наблюдения высотой 561,4 км. В связи с этим расчеты проводились для случая использования данных орбит [12].

На рис. 4 представлена зависимость времени изменения режима наблюдения от угла между КА и рабочей точкой в начальный момент времени при изменении режима наблюдения без использования орбиты фазирования.

Из представленной зависимости видно, что при использовании первого способа время изменения режима наблюдения существенно зависит от начального углового смещения между КА и РТ на ОРН. Это обусловлено близостью высот ОГН и ОРН.

На рис. 5 представлена зависимость времени изменения режима наблюдения от разности высот между орбитой фазирования и ОГН.

Из представленной зависимости видно, что использование орбиты фазирования позволяет существенно снизить время изменения режима наблюдения.

На рис. 6 представлена зависимость времени изменения режима наблюдения от суммарного импульсного приращения скорости для случая использования орбиты фазирования.

Данная зависимость показывает, что для существенного снижения времени изменения режима наблюдения требуются относительно небольшие энергетические затраты.

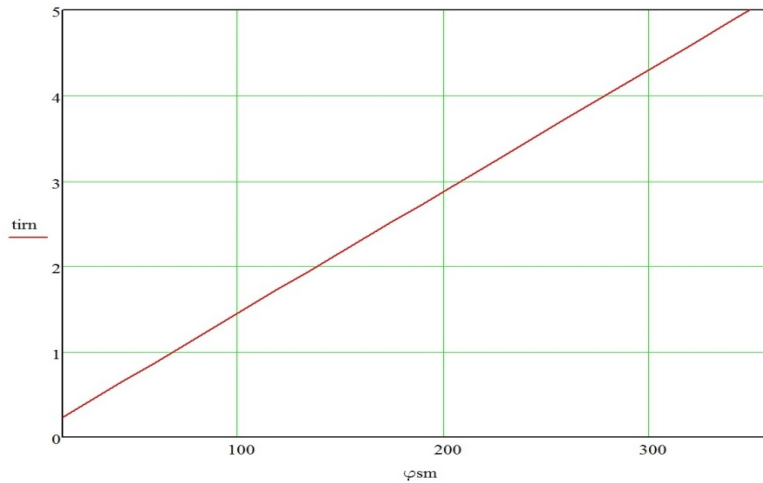


Рис. 4. Зависимость $t_{ИРН}$ от $\varphi_{см}$

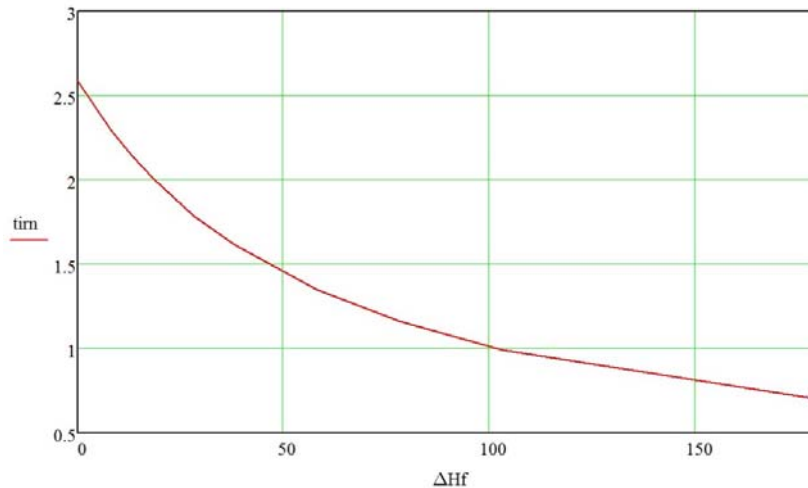


Рис. 5. Зависимость $t_{ИРН}$ от $\Delta H_{\Phi-\Gamma}$

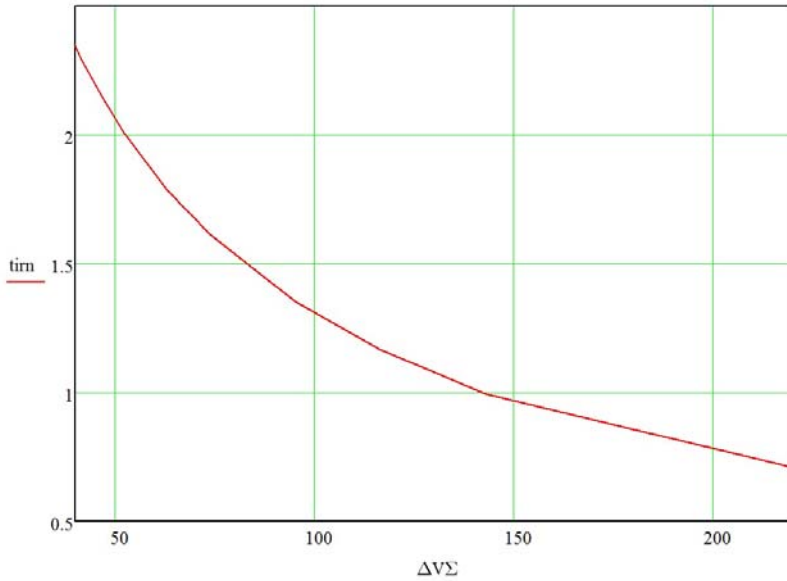


Рис. 6. Зависимость $t_{иpн}$ от ΔV_{Σ}

Методика расчета трасс КА ДЗЗ для описанных режимов наблюдения. Данная методика позволяет произвести сравнительный анализ периодичности наблюдения заданного района земной поверхности КА ДЗЗ, функционирующего в режимах глобального и регионального наблюдения [13].

Математически данную методику можно описать уравнениями.

$$\sin \varphi = \sin i \cdot \sin u, \quad (38)$$

$$\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda - \omega_3 \cdot \frac{u}{\omega_{КА}}, \quad (39)$$

$$\Delta\lambda = \begin{cases} \arcsin\left(\frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} i}\right), & \text{при } 0 \leq u \leq \frac{\pi}{2}, \\ \pi - \arcsin\left(\frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} i}\right), & \text{при } \frac{\pi}{2} \leq u \leq \frac{3\pi}{2}, \\ 2\pi + \arcsin\left(\frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} i}\right), & \text{при } \frac{3\pi}{2} \leq u \leq 2\pi, \end{cases} \quad (40)$$

где φ – широта подспутниковой точки; λ – долгота подспутниковой точки; λ_0 – начальная долгота подспутниковой точки; $\Delta\lambda$ – изменение долготы подспутниковой точки; i – наклонение орбиты; u – аргумент широты; ω_3 – угловая скорость вращения Земли; $\omega_{КА}$ – угловая скорость вращения КА.

Представленная методика расчета трасс КА ДЗЗ является частью математической модели, описывающей двухрежимный способ наблюдения земной поверхности. На следующем этапе исследования будет описана взаимосвязь рабочей точки, принадлежащей орбите регионального наблюдения, и географических координат заданного района земной поверхности, что позволит усовершенствовать методику определения временных и энергетических затрат на изменение режима наблюдения.

В результате, математическая модель, описывающая двухрежимный способ наблюдения земной поверхности, позволит сформировать требования к перспективным двигателям и энергетическим установкам КА ДЗЗ, что даст возможность увеличить эффективность их использования.

С помощью разработанной методики были определены трассы КА ДЗЗ, функционирующего в различных режимах наблюдения. На рис. 7 представлена трасса КА ДЗЗ, функционирующего в режиме глобального наблюдения, движущегося по круговой околополярной кратной геосинхронной орбите высотой 510,8 км и наклонением 83,6 град. Для рассмотренного случая цикл замыкания трассы составляет более 5 суток, в течение которых заданный район земной поверхности попадет в полосу обзора КА ДЗЗ в лучшем случае два раза: на одном восходящем и на одном нисходящем витках. Таким образом, периодичность обзора заданного района земной поверхности составит минимум 2,5 суток.

На рис. 7 представлена трасса КА ДЗЗ с суточным смещением трассы в восточном направлении.

На рис. 8 представлена трасса КА ДЗЗ, функционирующего в режиме регионального наблюдения. В этом режиме используется околополярная круговая суточно-синхронная орбита высотой 561,4 км и наклонением 83,6 град, обеспечивающая отсутствие ежесуточного сдвига трассы. Трасса аппарата, движущегося по такой орбите, повторяется приблизительно через сутки, точнее через период вращения Земли вокруг своей оси относительно восходящего узла орбиты. В результате периодичность обзора заданного района снижается в 3–6 раз по сравнению с периодичностью обзора заданного района аппаратом, функционирующим в режиме глобального наблюдения.

При помощи фазирования в процессе перехода представляется возможным наблюдение интересных объектов заданного района преимущественно в надиr, что обеспечивает высокое качество получаемой информации.

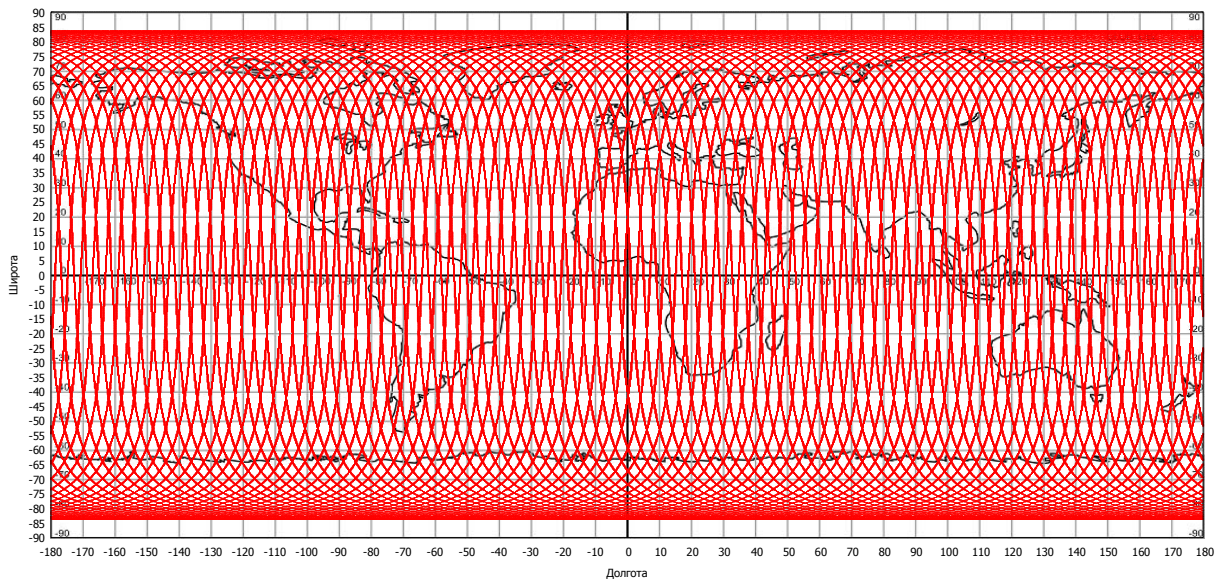


Рис. 7. Трасса КА ДЗЗ, функционирующего в режиме глобального наблюдения

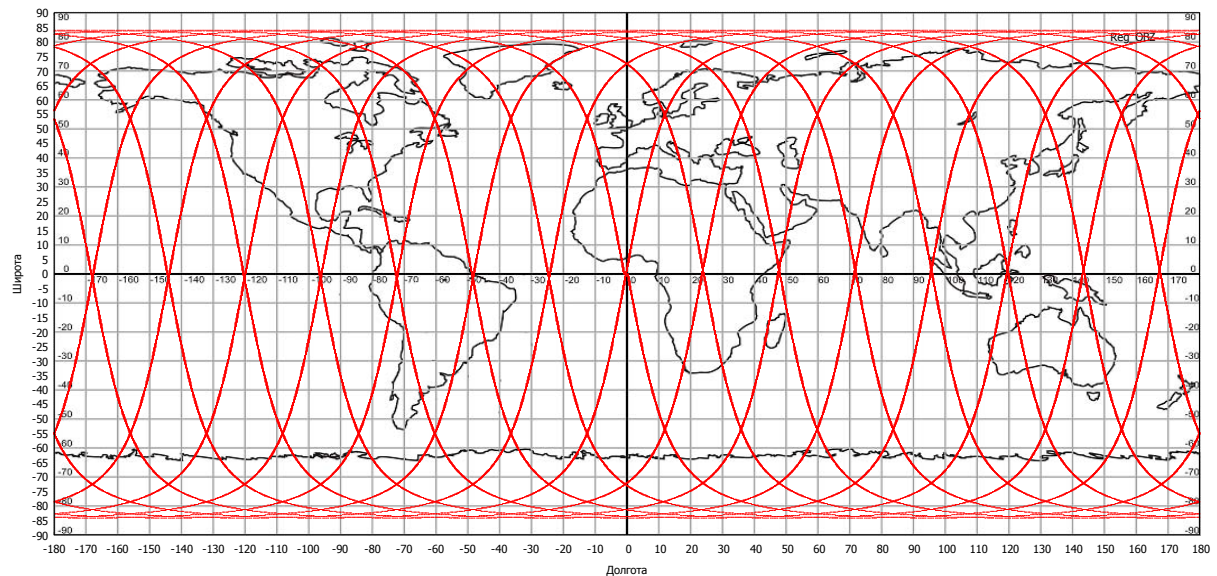


Рис. 8. Трасса аппарата, функционирующего в режиме регионального наблюдения

Из сравнения приведенных трасс также видно, что в режиме регионального наблюдения не обеспечивается глобальность обзора земной поверхности. В связи с этим после наблюдения заданного района в течение требуемого времени необходимо перевести КА ДЗЗ на исходную кратную геосинхронную орбиту, обеспечивающую реализацию режима глобального наблюдения.

Также хотелось бы отметить, что при использовании в составе орбитальной группировки более одного КА ДЗЗ, способного осуществлять переходы между режимами наблюдения, представляется возможным уменьшить периодичность обзора заданного района земной поверхности до нескольких часов, что на данный момент является недостижимым для орбитальных группировок, в составе которых функционирует менее десяти КА ДЗЗ.

Анализ возможности применения. Средняя разность высот между соседними орбитами глобального и регионального наблюдения составляет 70 км [3]. Величина суммарного импульсного приращения ско-

рости для изменения режима наблюдения составляет величину порядка 40–70 м/с.

Данные величины свидетельствуют об относительно невысоких энергетических затратах на использование предложенного двухрежимного способа наблюдения. В свою очередь, экономические затраты на создание группировки, функционирующей с применением предложенного двухрежимного способа наблюдения, значительно меньше, чем экономические затраты, связанные с вариантом увеличения количественного состава существующих орбитальных группировок.

Реализация данного способа целесообразна, прежде всего, для малых и средних КА (масса КА не превышает 3 т), для которых увеличение маневренных возможностей не ограничено жесткими требованиями к их массовым характеристикам, обусловленным возможностями средств выведения [14]. В процессе исследования были рассмотрены характеристики космических аппаратов наблюдения, представленных в [15]. Краткий перечень рассмотренных аппаратов приведен в табл. 4.

Краткий перечень рассмотренных КА ДЗЗ

Название КА		Масса КА, кг	Масса специального комплекса, кг	Масса топлива, кг	Суммарный запас характеристической скорости, м/с
RapidEye		154	43	12	202
TanDEM-X		1341,3	400	120	234,3
TerraSAR-X		1293,5	394	78	155,5
Sentinel-2		1180	230	130	291,8
Eros-B		290	40	60	579,5
Серия КА	Ofeq-1	225	36	15	172,4
	Ofeq-10	400	45	70	480,9
TECSAR		300	100	40	357,75
Cartosat-2		680	120	69	267,5
«Канопус-В»		400	110	10	213,7
THEOS		720	120	80	294,5
Kompsat-1		470	100	73	421,9

Масса специального комплекса КА ДЗЗ малого и среднего класса составляет от 36 до 500 кг. Масса платформ, способных обеспечить нормальное функционирование подобных специальных комплексов, варьируется от 100 до 2000 кг. Анализ данных, представленных в табл. 4, позволяет судить о возможности применения двухрежимного способа наблюдения земной поверхности при функционировании существующих и перспективных КА ДЗЗ малого и среднего классов.

Среднее значение запаса характеристической скорости рассмотренных существующих КА ДЗЗ составляет 310 м/с. Данная величина обусловлена необходимостью проводить штатные коррекции орбиты с применением ДУ для поддержания ориентированного положения. При функционировании КА ДЗЗ с применением двухрежимного способа наблюдения целесообразно иметь возможность совершать переход в РРН с возвращением в РГН хотя бы один раз в 6 месяцев в течение всего срока активного существования. Таким образом, необходимое увеличение запаса характеристической скорости составляет величину порядка 300–400 м/с. Для существующих малых и средних КА ДЗЗ увеличение запаса топлива, обеспечивающее необходимое увеличение запаса характеристической скорости, приведет к увеличению массы КА на 15–20 % и к незначительным конструктивным доработкам. Также хотелось бы отметить, что применение двухрежимного способа наблюдения позволит значительно увеличить как эффективность использования двигательных установок КА ДЗЗ, так и эффективность орбитальных группировок дистанционного зондирования Земли.

Заключение. В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Использование двухрежимного способа наблюдения земной поверхности позволяет обеспечить сочетание глобальности наблюдения земной поверхности с высокой оперативностью получения информации о заданных районах земной поверхности в определенные временные интервалы.

2. В режиме регионального наблюдения достигается снижение периодичности обзора требуемого района с 3–6 суток до 1 суток при использовании в составе орбитальной группировки одного КА ДЗЗ.

3. Сравнение двухрежимного способа наблюдения земной поверхности с известными способами повышения оперативности получения информации с заданных регионов показывает, что использование двухрежимного способа позволяет существенно снизить периодичность обзора при относительно небольших экономических затратах.

4. Математическая модель двухрежимного способа наблюдения земной поверхности является математической основой для формирования требований к перспективным двигателям и энергетическим установкам КА ДЗЗ.

Библиографические ссылки

1. Лебедев А. А., Нестеренко О. П. Космические системы наблюдения. Синтез и моделирование. М. : Машиностроение, 1991. 225 с.
2. Инженерный справочник по космической технике / под ред. А. В. Солодова. М. : Воениздат, 1977. 362 с.
3. Ермолаев В. И., Цируль Д. Г. Исследование оптимальных режимов наблюдения и параметров рабочих орбит космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Инновационный арсенал молодежи : тр. V науч.-техн. конф. / ФГУП «КБ «Арсенал» ; Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2014. С. 109–114.
4. Gill E. Description of Keplerian Relative Motion in an Orbital Reference Frame / DLR/German Space Operations Center. TN 02-02. Oberpfaffenhofen. Germany, 2002. P. 1–7.
5. Battin R. An Introduction to the Mathematics and Methods of Astrodynamics / American Institute of Aeronautics and Astronautics. Reston, VA, 1999. 796 p.
6. Brouwer D., and Clemence G. Methods of Celestial Mechanics / New York : Academic Press, 1961. 610 p.

7. Скребушевский Б. С. Формирование орбит космических аппаратов. М. : Машиностроение, 1990. 256 с.
8. Власов С. А., Мамон П. А. Теория полёта космических аппаратов / Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского. СПб., 2003. 346 с.
9. Inalhan G., Tillerson M., and How J. P. Relative Dynamics and Control of Spacecraft Formations in Eccentric Orbits // *Journal of Guidance, Control and Dynamics*. 2002. Vol. 25, No. 1. P. 48–59.
10. Ермолаев В. И. Методы оптимизации параметров группового способа транспортного обеспечения систем космических аппаратов // *Космонавтика – XXI век* : сб. тр. Междунар. НТК. М. ; Калининград, 1991. С. 35–39.
11. Алексеев К. Б., Бебенин Г. Г., Ярошевский В. А. Маневрирование космических аппаратов. М. : Машиностроение, 1970. 416 с.
12. Ермолаев В. И., Цируль Д. Г. Исследование временных и энергетических затрат на изменение режима наблюдения КА ДЗЗ // *Инновационный арсенал молодежи* : тр. VI науч.-техн. конф. / ФГУП «КБ «Арсенал» ; Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2015. С. 115–121.
13. Ермолаев В. И., Цируль Д. Г. Методика расчета трасс космических аппаратов дистанционного зондирования Земли для двухрежимного способа наблюдения земной поверхности // *Инновационный арсенал молодежи* : тр. VII науч.-техн. конф. / ФГУП «КБ «Арсенал» ; Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2016. С. 89–94.
14. Баринов Н. К., Бурдаев М. Н., Мамон П. А. Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов. М. : Машиностроение, 1975. 270 с.
15. Дистанционное зондирование Земли : справ. пособие : в 3 кн. / В. Н. Блинов [и др.] // Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. 930 с.

References

1. Lebedev A. A., Nesterenko O. P. *Kosmicheskie sistemy nablyudeniya. Sintez i modelirovanie* [Space monitoring systems. Synthesis and simulation]. Moscow. Mashinostroyenie Publ., 1991, 225 p.
2. *Inzhenernyy spravochnik po kosmicheskoy tekhnike*. [Engineer guidebook on space-system engineering]. Ed. A. V. Solodova. Moscow, Voenizdat Publ., 1977, 362 p.
3. Ermolaev V. I., Tsiurul D. G. [Research of optimal monitoring modes and working orbits parameters for the Earth remote sensing crafts]. *Innovatsionnyy arsenal molodezhi: trudy pyatoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Innovative Arsenal Youth: Proc. 5th Scientific and Technical Conference]. St. Petersburg, 2014, P. 109–114 (In Russ.).
4. Gill E. Description of Keplerian Relative Motion in an Orbital Reference Frame. *DLR/German Space*

Operations Center. TN 02-02, Oberpfaffenhofen, Germany, 2002, P. 1–7.

5. Battin R. *An Introduction to the Mathematics and Methods of Astrodynamics*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA, 1999, 796 p.
6. Brouwer D., Clemence G. *Methods of Celestial Mechanics*. Academic Press, New York, 1961, 610 p.
7. Skrebushavskiy B. S. *Formirovanie orbit kosmicheskikh apparatov* [Orbits forming for spacecrafts]. Moscow, Mashinostroyenie Publ., 1990, 256 p.
8. Vlasov S. A., Mamon P. A. *Teoriya poleta kosmicheskikh apparatov* [The theory of spacecrafts missions]. St. Petersburg, Voenno-kosmicheskaya akademiya im. A. F. Mozhayskogo Publ., 2003, 346 p.
9. Inalhan, G., Tillerson, M., How, J. P. Relative Dynamics and Control of Spacecraft Formations in Eccentric Orbits. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*. 2002, Vol. 25, No. 1, P. 48–59.
10. Ermolaev V. I. [Optimization methods for parameters of a group way transport-ware of spacecrafts systems]. *Sbornik trudov mezhdunarodnoy NTK "Kosmonavtika – XXI vek"* [List of proceedings of STC "Cosmonavtika – XXI century". Moscow–Kaliningrad, 1991, P. 35–39 (In Russ.).
11. Alekseyev K. B., Bebenin G. G., Yaroshevskiy V. A. *Manevrirovaniye kosmicheskikh apparatov* [Maneuvering of spacecrafts]. Moscow, Mashinostroyenie Publ., 1970, 416 p.
12. Ermolaev V. I., Tsiurul D. G. [Research of time and energy costs for the changing of ERS SC monitoring mode change]. *Innovatsionnyy arsenal molodezhi: trudy shestoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* Innovative Arsenal Youth: Proc. 6th Scientific and Technical Conference]. St. Petersburg, 2015, P. 115–121 (In Russ.).
13. Ermolaev V. I., Tsiurul D. G. [Calculation method for the ways of the Earth remote sensing spacecrafts for the dual-mode method for monitoring the Earth's surface] *Innovatsionnyy arsenal molodezhi: trudy sed'moy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Innovative Arsenal Youth: Proc. 7th Scientific and Technical Conference]. St. Petersburg, 2016, P. 89–94 (In Russ.).
14. Barinov N. K., Burdaev M. N., Mamon P. A. *Dinamika i printsipy postroeniya orbital'nykh sistem kosmicheskikh apparatov* [Dynamics and principals of orbit systems construction for spacecrafts]. Moscow, Mashinostroyenie Publ., 1975, 270 p.
15. Blinov V. N., Ivanov N. N. *Distantionnoe zondirovanie Zemli: spravochnoe posobie: v 3 knigakh* [Remote sensing of the Earth: handbook: in 3 books]. Омск, ОмSTU Publ., 2013, 930 p.