



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

**А.А. Баранов, Д.А. Гришко,
Е.А. Рыльцова, О.Д. Гаранин,
А.Ф. Рзаев**

Перелёты между объектами
космического мусора в
окрестности геостационарной
орбиты

Статья доступна по лицензии
Creative Commons Attribution 4.0 International



Рекомендуемая форма библиографической ссылки

Перелёты между объектами космического мусора в окрестности геостационарной орбиты / А.А. Баранов [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 190. 27 с.
<https://doi.org/10.20948/prepr-2018-190>
<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-190>

Публикации по материалам препринта

A.A.Baranov, D.A.Grishko, O.I.Khukhrina, Danhe Chen, Optimal transfer schemes between space debris objects in geostationary orbit // ActaAstronautica, Vol. 169, April 2020, pp.23-31
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.01.001>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576520300011>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В. Келдыша
Российской академии наук**

**А.А. Баранов, Д.А. Гришко,
Е.А. Рыльцова, О.Д. Гаранин, А.Ф. Рзаев**

**Перелёты между объектами
космического мусора
в окрестности геостационарной орбиты**

Москва — 2018

Баранов А.А., Гришко Д.А., Рыльцова Е.А., Гаранин О.Д., Рзаев А.Ф.

Перелёты между объектами космического мусора в окрестности геостационарной орбиты

В работе рассматривается задача определения оптимальной схемы облёта объектов крупногабаритного космического мусора (ККМ) с целью их перевода из окрестности геостационарной орбиты (ГСО) на орбиту захоронения. Перелет от одного объекта ККМ к другому осуществляется с помощью специального космического аппарата (КА)-сборщика. Предполагается, что КА-сборщик подлетает к очередному объекту ККМ, манипулятором захватывает его и закрепляет на нем отделяемый модуль, обладающий двигательной установкой (ДУ). Данный модуль с помощью своей ДУ самостоятельно переводит объект ККМ на орбиту захоронения, которая находится выше ГСО.

Ключевые слова: геостационарная орбита, крупногабаритный космический мусор, КА-сборщик, thruster de-orbiting kit, орбита захоронения, защищаемая зона, портрет эволюции наклонений.

Andrey Anatolyevich Baranov, Dmitriy Aleksandrovich Grishko, Ekaterina Alexandrovna Ryltsova, Oleg Dmitrievich Garanin, Alisher Firdovsievich Rzaev

Flights between space debris objects in the vicinity of the geostationary orbit.

The paper regards the problem of finding the optimal sequence of transfers between large-size space debris objects aimed at their de-orbiting from the vicinity of geostationary orbit (GEO). A flight from one object to another is carried out by a special space vehicle (SV)-collector. It is supposed that an SV approaches a debris object, captures it using a robotic arm and installs a thruster de-orbiting kit on its surface. Using its own propulsion system this unit ensures the object's de-orbiting to the disposal orbit which is situated above GEO region.

Key words: geostationary orbit, large-size space debris, space vehicle - collector, thruster de-orbiting kit, disposal orbit, GEO safety zone, inclination evolution portrait.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках мероприятия 1.2 федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (Соглашение от 26 сентября 2017 года № 14.574.21.0146, уникальный идентификатор работ RFMEFI57417X0146).

Введение

Геостационарная орбита (ГСО) является уникальным природным феноменом, позволяющим обеспечить неподвижность космического аппарата (КА) относительно наблюдателя на Земле. Это достигается за счёт того, что находящийся на ней КА в идеале совершает один оборот в экваториальной плоскости за звёздные сутки. Радиус такой орбиты (42164 км) позволяет обеспечить видимость КА на большой территории, что предопределяет основное целевое применение ГСО – ретрансляцию сигналов. В настоящее время рабочие зоны на ГСО поделены между несколькими странами, что позволяет безопасно распределять КА по позициям – так называемым точкам стояния.

Объекты, находящиеся на ГСО, испытывают заметное влияние возмущений от нецентральности гравитационного поля Земли, гравитационных возмущений со стороны Луны и Солнца, приливных сил, а также сил, вызванных давлением света. При этом, в отличие от низких орбит, ГСО не подвержена влиянию остаточной атмосферы, что делает невозможным естественное сведение с орбиты находящихся на ней объектов после завершения их активного существования. К настоящему времени в окрестности ГСО скопилось достаточное количество пассивных объектов (нефункционирующие КА и разгонные блоки), столкновение которых с другими объектами или друг с другом может привести к заметному увеличению популяции фрагментов, что создаст риски дальнейшего существования всех КА, находящихся на этой орбите.

В соответствии со стандартом ISO 24113:2011 [1] область между радиусами 42164 ± 200 км и с широтным диапазоном $\pm 15^\circ$ относительно плоскости экватора является защищаемой зоной ГСО, а все современные КА в конце срока активного существования должны уводиться на орбиту захоронения (ОЗ). В соответствии со стандартом ISO 26872:2010 [2] ОЗ должна быть сформирована таким образом, чтобы объект космического мусора, переведенный на нее, не пересекал защищенную область (оставался выше) на протяжении не менее чем 100 лет с момента его увода на данную орбиту с учетом всех ее возможных возмущений [3, 4].

Потерянные в предыдущие годы КА, а также средства их доставки на ГСО по-прежнему остаются в защищаемой области, поэтому необходим их увод на ОЗ с использованием активного КА-сборщика. В данной статье предполагается, что активный КА совершает перелёты между объектами, имея на борту отделяемые модули (thruster de-orbiting kit, TDK), обладающие двигательной установкой (ДУ). После сближения с очередной целью активный КА манипуляторами захватывает её и закрепляет на ней отделяемый модуль. Данный модуль с помощью своей ДУ самостоятельно переводит объект ККМ на орбиту захоронения, которая находится выше ГСО.

Целью работы является исследование энергетических и временных затрат, необходимых для осуществления миссии увода крупных объектов на ГСО. Задачами работы являются:

- выработка принципов составления схем перелётов между объектами крупногабаритного космического мусора (ККМ) на ГСО, определение времён начала и конца перелётов;
- оценка параметров манёвров, обеспечивающих перелёты активного КА между объектами ККМ в защищаемой зоне ГСО;
- получение примерных характеристик КА-сборщика.

Эволюция орбит космического мусора вблизи ГСО

Для выбора стратегии облета объектов ККМ важно иметь представление об эволюции элементов орбит этих объектов. В таблице 1 приведены элементы орбит более ста объектов ККМ, взятые из спутникового каталога [5] на 18.11.2017, которые могут быть потенциальными кандидатами на перевод на орбиты захоронения.

Таблица 1

№	Номер NORAD	a , km	e	Ω , °	i , °
1.	20266	42065.5	0.002433	359.117	14.719
2.	19550	42098.5	0.002037	358.333	15.227
3.	19347	42616.0	0.002873	357.239	15.277
4.	19400	42078.5	0.001660	355.268	14.595
5.	19686	41812.0	0.001044	355.177	14.546
6.	19076	42204.0	0.001926	353.935	14.803
7.	18718	42000.0	0.006451	353.226	14.493
8.	18387	42216.5	0.002683	352.692	14.623
9.	18578	42074.5	0.001977	352.549	14.507
10.	18446	42164.0	0.002005	351.039	14.558
11.	19094	41924.5	0.001791	349.521	14.217
12.	17125	42152.0	0.000490	349.173	14.456
13.	17705	42273.0	0.002535	349.119	15.374
14.	18331	41849.0	0.001318	346.785	13.958
15.	16214	42058.0	0.001627	344.921	14.057
16.	19913	42065.5	0.002031	344.685	13.207
17.	15581	42402.0	0.002313	343.287	14.491
18.	14943	42624.5	0.001094	341.846	14.626
19.	16732	41852.0	0.001661	341.600	13.697
20.	15181	42165.0	0.001896	341.158	14.017
21.	14951	42397.5	0.001202	340.137	14.277
22.	13643	42409.0	0.004756	339.263	14.726
23.	17874	42142.0	0.003395	338.766	13.882
24.	14548	42168.0	0.004802	338.737	13.842
25.	15630	41891.0	0.001145	337.686	13.563
26.	14948	42271.0	0.001990	336.805	15.137
27.	17875	41881.0	0.001257	335.693	13.347
28.	13983	42217.0	0.002127	335.620	13.895

29.	14394	41942.5	0.001619	332.539	13.142
30.	13630	42129.5	0.000819	331.760	13.304
31.	15139	41837.0	0.002396	331.594	12.959
32.	13899	42622.0	0.002263	331.357	14.496
33.	14114	42151.0	0.001177	330.578	14.413
34.	14086	41928.0	0.001617	328.528	12.852
35.	14115	41886.0	0.000764	328.364	12.707
36.	14195	42119.0	0.000584	326.846	13.058
37.	14117	41959.0	0.003401	326.809	12.869
38.	11684	42608.0	0.001675	325.114	13.537
39.	12851	41952.5	0.000642	324.601	12.575
40.	12447	42246.0	0.000880	323.979	12.851
41.	12471	41861.0	0.002762	322.329	12.213
42.	14193	41787.0	0.001644	320.293	11.940
43.	17939	42101.5	0.004511	319.944	12.257
44.	17873	42183.0	0.002549	318.997	12.215
45.	13900	41861.5	0.000991	316.431	11.426
46.	11571	41875.5	0.000804	312.454	10.548
47.	17872	42171.5	0.001281	311.958	10.763
48.	3432	41811.5	0.010465	311.066	5.535
49.	11569	41829.0	0.000768	309.294	10.055
50.	11568	42092.5	0.001113	309.172	9.909
51.	7324	42045.0	0.002544	308.347	10.115
52.	11676	42196.0	0.001885	308.101	9.776
53.	11567	41954.0	0.005194	305.176	8.081
54.	20836	42140.0	0.001396	305.002	8.800
55.	38104	42146.0	0.001641	70.688	1.967
56.	34265	42231.0	0.000587	66.814	6.105
57.	33111	42157.0	0.003470	56.806	4.933
58.	28256	42197.5	0.002974	44.669	9.983
59.	29233	41953.5	0.005045	43.464	8.769
60.	27780	42184.0	0.001216	40.929	9.270
61.	28704	42005.0	0.001805	40.524	9.580
62.	28634	42149.5	0.002512	39.929	9.847
63.	28466	42201.0	0.000271	38.126	10.181
64.	28240	42033.5	0.002263	36.965	10.528
65.	28139	42148.5	0.001651	36.315	10.842
66.	26895	42134.0	0.001941	36.279	10.488
67.	28119	42219.0	0.023168	36.145	10.991
68.	26939	42159.0	0.002851	35.559	11.337
69.	27444	42441.5	0.001399	33.236	11.906
70.	26397	42192.0	0.001760	31.150	12.043
71.	26373	42123.0	0.027246	29.832	11.770
72.	26381	42392.0	0.000903	27.991	13.201
73.	25318	42219.0	0.002737	27.703	12.564
74.	26246	42358.0	0.001964	27.007	13.497
75.	26101	42022.0	0.000829	26.448	13.234
76.	23683	42162.0	0.001800	25.706	14.078

77.	25900	42203.5	0.010160	24.717	13.654
78.	24897	42237.0	0.036323	23.626	13.805
79.	23429	42010.0	0.002447	20.985	14.363
80.	25048	42337.0	0.001016	20.239	14.561
81.	23656	42191.0	0.002116	19.138	14.409
82.	25021	41940.0	0.002423	18.787	14.266
83.	23171	42396.5	0.001992	18.739	14.172
84.	24438	42157.5	0.000638	17.363	14.645
85.	23451	42213.0	0.000637	17.143	14.624
86.	23270	42215.0	0.000423	16.236	14.684
87.	23330	42193.5	0.001792	16.073	14.971
88.	23720	42160.0	0.003784	14.625	14.835
89.	22272	42214.0	0.000483	13.855	14.465
90.	22839	42132.5	0.001035	13.232	14.834
91.	22883	42099.0	0.000771	13.113	14.760
92.	23615	42092.5	0.000564	12.046	16.992
93.	23322	42179.5	0.000374	11.521	15.015
94.	22966	42383.5	0.003773	10.192	15.245
95.	22115	42289.5	0.001591	9.809	15.198
96.	22213	41915.5	0.001723	9.545	14.689
97.	21792	42627.0	0.000438	8.637	15.549
98.	21129	42196.5	0.001471	8.017	14.735
99.	21762	42317.0	0.000360	7.413	15.151
100.	21925	41929.0	0.002376	7.408	14.797
101.	22316	42206.5	0.006499	6.785	13.380
102.	21703	42261.5	0.000718	6.282	15.205
103.	21536	41973.0	0.001613	5.332	14.851
104.	21019	42231.0	0.002174	4.232	15.048
105.	20926	41995.0	0.003015	2.755	14.868
106.	20696	42130.5	0.002924	2.656	15.011
107.	21641	42130.0	0.004021	2.189	16.380
108.	20662	42090.0	0.001425	2.094	14.988
109.	20502	42223.0	0.003799	1.327	15.013

На рисунках 1, 2, 3 и 4 приведены графики изменения наклона, долготы восходящего узла (ДВУ), большой полуоси и эксцентриситета орбит этих объектов в зависимости от времени (по горизонтальной оси графиков на обоих рисунках отложено прошедшее с начала движения время в сутках, разделённое на 5).

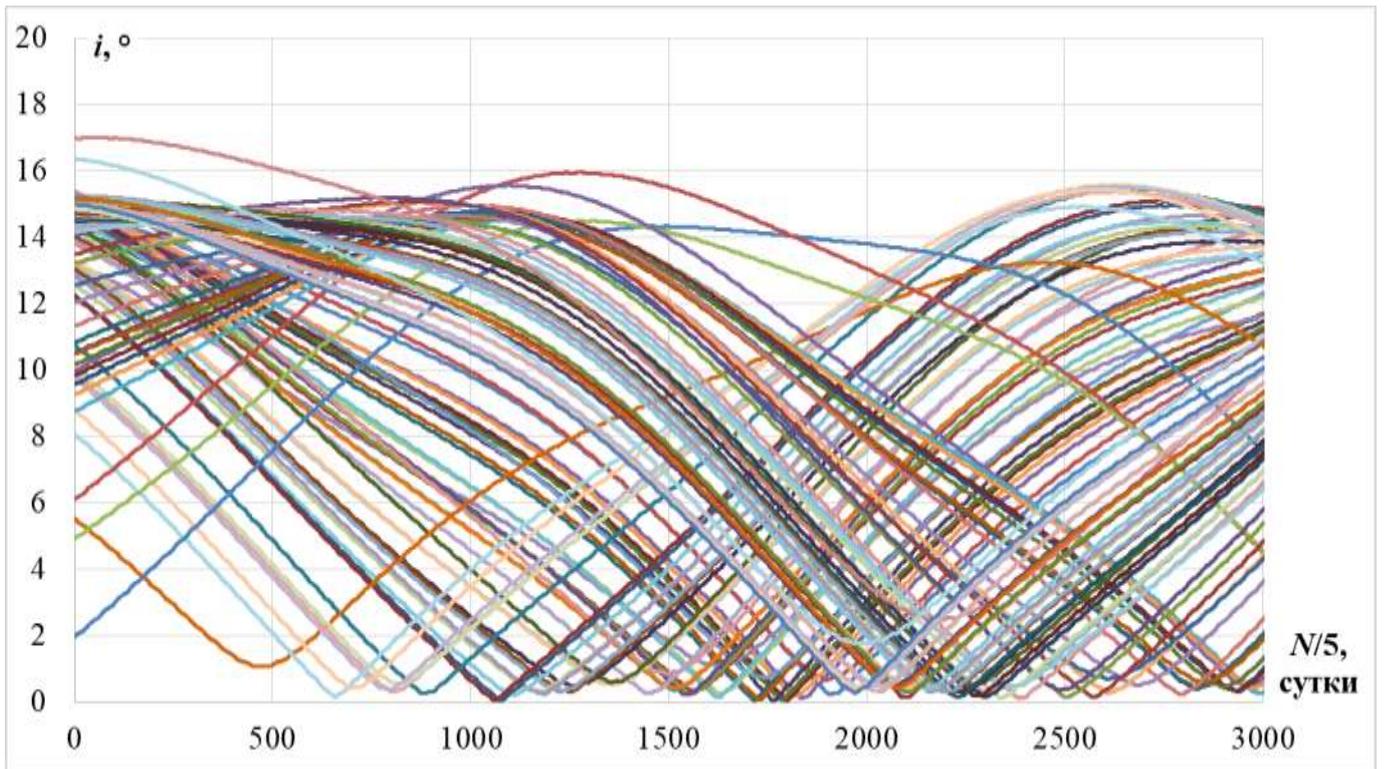


Рисунок 1. Изменение наклона орбит объектов ККМ в зависимости от времени

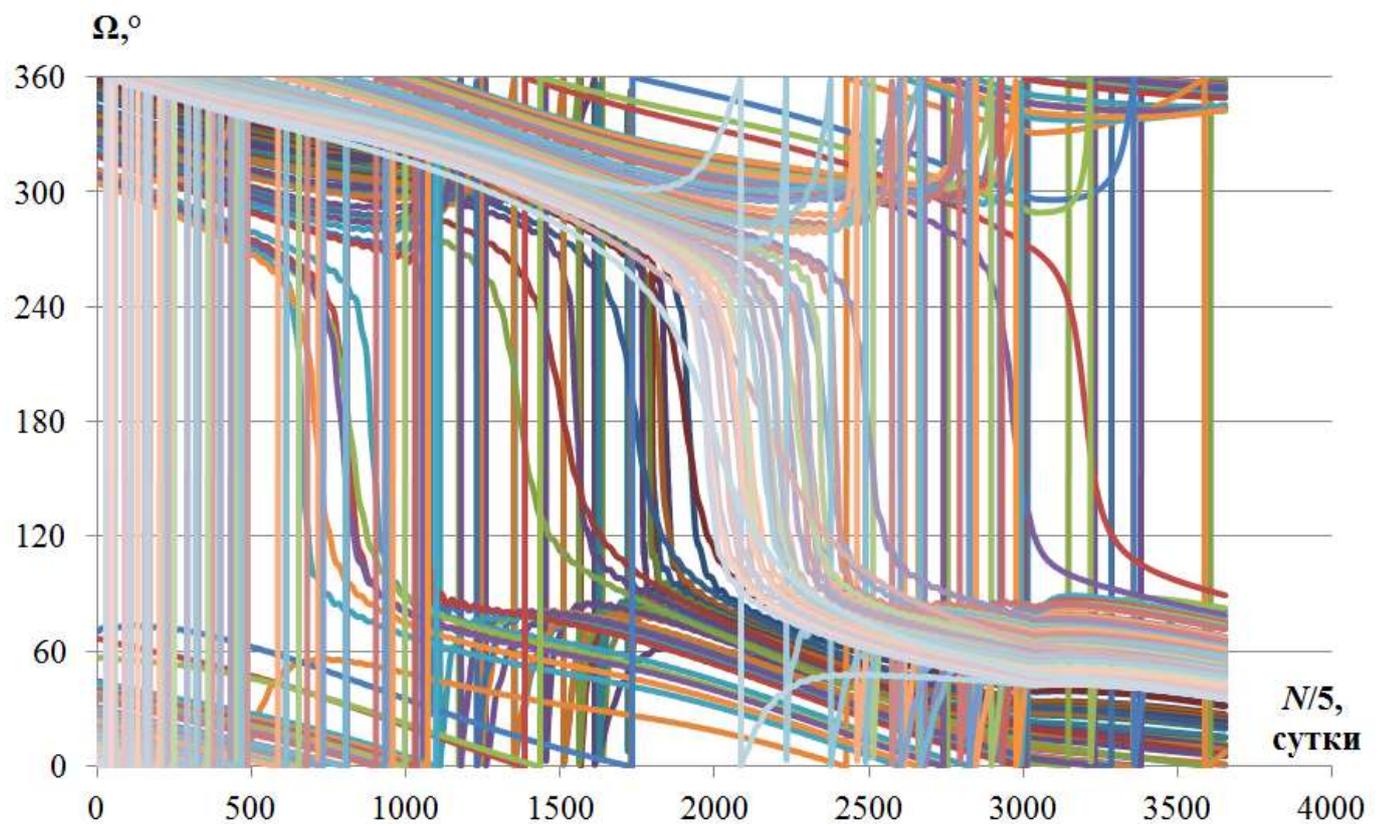


Рисунок 2. Изменение долготы восходящего узла орбит объектов ККМ в зависимости от времени

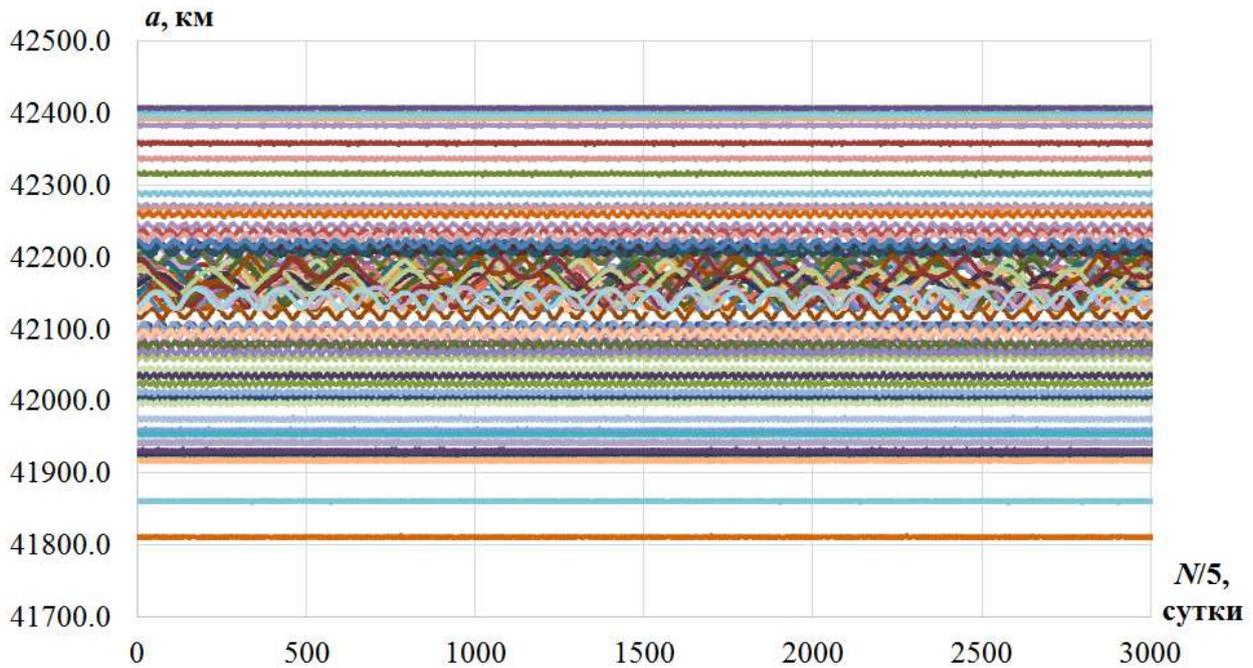


Рисунок 3. Изменение большой полуоси орбит объектов ККМ в зависимости от времени

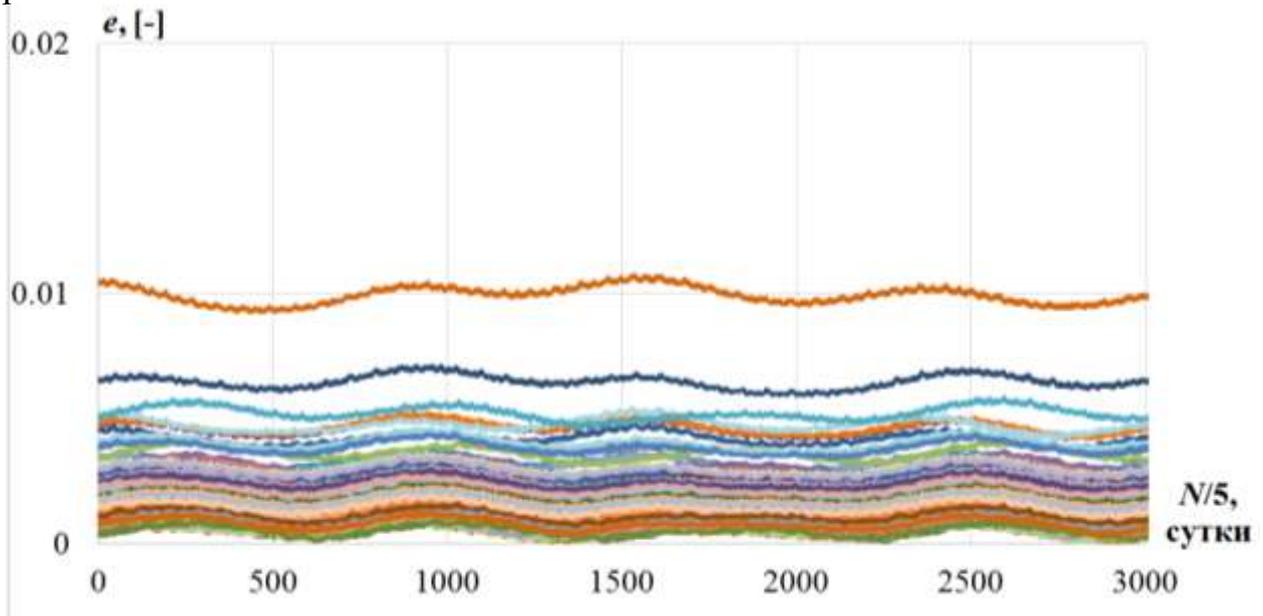


Рисунок 4. Изменение эксцентриситета орбит объектов ККМ в зависимости от времени

Потребуем дополнительно, чтобы орбиты выделенных объектов имели эксцентриситет не более 0.01, целиком располагались в защищаемой зоне ГСО или заходили в неё в области апогея / перигея. Таким условиям соответствуют 87 объектов, 79 из которых составляют разгонные блоки семейства "Д" [6].

Наибольший интерес представляют графики изменения наклона и ДВУ, так как поворот плоскости орбиты на несколько градусов требует существенных затрат суммарной характеристической скорости (СХС).

Как можно видеть на рисунке 1, существуют две группы объектов ККМ, в каждой из которых изменение наклона орбит происходит практически синхронно. На графике это выглядит как два пучка траекторий. При любом наклоне (из области существования), перелетая от самой левой траектории пучка до самой правой, за приемлемое время можно облететь все объекты группы, практически не меняя наклона.

В диапазонах времён, когда пучки траекторий пересекаются, можно, не меняя существенно наклонение, облететь значительное число объектов ККМ обеих групп. Такая возможность существует в диапазоне времен от 0 до примерно 3500 суток, когда наклонение орбит близко к 13° . Аналогичная возможность существует в диапазоне от 16000 до примерно 18500 суток, когда наклонение орбит близко к 12° .

Оптимально перелетать между орбитами, имеющими близкое к нулевому наклонению. В этом случае не столь велико влияние разницы в величине ДВУ орбит на СХС перелета. Однако орбиты объектов ККМ принимают минимальное наклонение в значительном диапазоне времён (от 5500 до 13000 суток). Этот оптимальный временной диапазон наступит примерно через 15 лет, а закончится через 35 лет.

Рисунок 2 показывает, что в начальный момент времени (и в конечный) по ДВУ орбиты объектов ККМ распределены практически равномерно в диапазоне примерно в 100° . Когда наклонение орбиты становится равным 0° , ДВУ орбиты меняется скачком. Перелетать целесообразно между орбитами, ДВУ которых практически совпадает. При близких к нулю наклонениях значение ДВУ не столь существенно влияет на СХС перелета.

Анализ графиков на рисунке 1 показывает, что для облета объектов ККМ с точки зрения экономии топлива целесообразно рассматривать два сценария перелета к следующему объекту ККМ:

1. когда орбита следующего объекта ККМ достигает минимального наклона;
2. когда наклоны двух орбит объектов ККМ совпадают.

В эти моменты времени наклонение орбит объектов ККМ достаточно мало.

Выделение групп ККМ, позволяющих эффективное удаление их объектов

Вопрос выбора последовательности облета объектов ККМ имеет первостепенное значение для повышения эффективности миссии. Оптимальный выбор последовательности облета позволяет при тех же ресурсах КА-сборщика облететь больше объектов ККМ и перевести их на орбиты захоронения. В первую очередь речь идет о минимизации затрат суммарной характеристической скорости на облет. Поскольку наиболее затратным является изменение ориентации плоскости орбиты, то перелетать оптимально, когда плоскости орбит практически совпадают.

Если осуществляется облет объектов, наклонение орбит которых составляет несколько градусов, то даже при совпадении наклонения орбиты могут иметь разную ДВУ (см. рисунок 2). Таким образом, оптимально облетать объекты КKM, орбиты которых лежат примерно в плоскости экватора или облетать объекты КKM, орбиты которых имеют близкое наклонение и небольшое отличие в ДВУ. Как было показано в предыдущем разделе, близкое к нулевому наклонение орбиты объектов КKM принимают на значительном временном интервале, примерно равном 20 годам (около 7500 суток). Можно будет облететь почти все выделенные объекты КKM. Однако КА-сборщик ни энергетически, ни по времени существования не обладает такими возможностями, следовательно, необходимо выделить более компактные подгруппы, которые можно облететь за меньшее время и с приемлемыми затратами СХС. Графики показывают, что потребуется последовательный запуск нескольких КА-сборщиков, чтобы перевести на орбиты захоронения значительное число объектов КKM.

Выбор последовательности облёта объектов КKM в области ГСО

В большинстве работ, посвященных близкой тематике, традиционно рассматривается облет объектов расположенных в плоскости одной орбиты. В этом случае имеется тривиальный последовательный облет объектов. Для низких орбит при изменении углового положения на орбите возникает уход долготы восходящего узла, однако этот эффект в данных работах, как правило, не учитывается [7]. Облет объектов КKM, расположенных на низких орбитах, имеющих существенное отличие ДВУ, был рассмотрен в работах Баранова и Гришко [8-12]. Особенностью орбит, находящихся в окрестности ГСО, является существенная эволюция их наклонения, поэтому описанные в упомянутых выше работах схемы облета объектов, наклонение орбит которых меняется незначительно, не применимы для ГСО.

Наиболее рациональной выглядит схема облета, когда специальный КА-сборщик располагается примерно в плоскости ГСО и перелетает к тому объекту, орбита которого в процессе эволюции принимает близкое к нулевому наклонение. Это и определяет в первом приближении порядок облета объектов КKM. КА-сборщик перелетает к тому объекту, орбита которого следующая по времени принимает близкое к нулевому наклонение (Рисунок 5). Если орбиты нескольких объектов практически одновременно принимают близкое к нулевому наклонение, то выбирается перелет, требующий меньших затрат СХС.

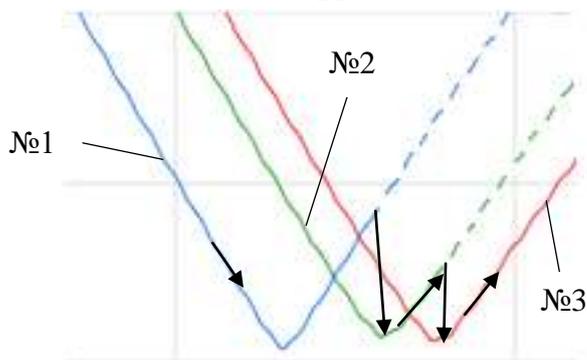


Рисунок 5. Схема перелёта при минимуме наклона целевой орбиты

Для используемой схемы увода объектов ККМ, когда применяются специальные модули, достаточно рассчитать СХС перелета от одного объекта к другому, чтобы оценить, сколько объектов ККМ можно перевести на орбиты захоронения при заданных запасах СХС у КА-сборщика и заданном времени его существования.

Вместе с тем рисунок 1 показывает, что пока наклонение орбиты следующего объекта ККМ приблизится к своему минимальному значению, наклонение орбиты предыдущего объекта ККМ (КА-сборщик находится на этой орбите) заметно увеличится (Рисунок 5). На коррекцию возникшего заметного отклонения по наклонению потребуются дополнительные затраты СХС. Таким образом, представляет интерес схема облета, когда перелет на новую орбиту происходит в момент пересечения линий на рисунке 1 – в момент, когда возрастающее наклонение орбиты предыдущего объекта становится равным убывающему наклонению орбиты следующего объекта (Рисунок 6). В этот момент требуется скорректировать только отклонение по ДВУ и, естественно, плоскостные элементы орбиты.

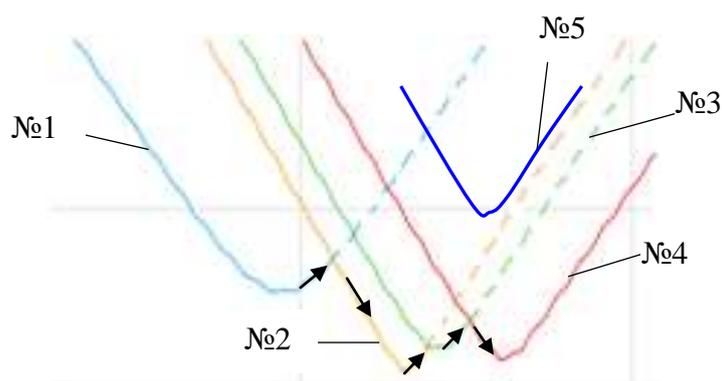


Рисунок 6. Схема перелёта в момент равенства наклонов

В общем случае надо сравнить обе схемы перелета (в момент минимального наклона и в момент равенства наклонов) и выбрать из них лучшую.

Расчет параметров орбит захоронения для ГСО

Наиболее полно описывает требования к орбитам захоронения КА в области ГСО стандарт ИСО 26872:2010 "Космические системы - Увод КА, эксплуатируемых на геосинхронной орбите" [2].

Рассмотрим далее основные положения из данного стандарта. Увеличение высоты перигея (в километрах) должно быть вычислено как

$$\Delta H = 235 + 1000 C_R A/m, \quad (1)$$

где C_R – поверхностный коэффициент отражения ($0 < C_R < 2$);

A/m – отношение площади к массе КА, выраженное в квадратных метрах на килограмм.

Минимальное значение C_R для расчета исходного прироста перигея должно быть не меньше, чем 1.5 (оценка сдержана, чтобы гарантировать адекватный прогноз, учитывая эффект действия солнечного излучения). Для использования значений, отличных от 1.5, должно быть представлено обоснование. Уравнение (1) было выведено как гарант того, что долгосрочные возмущения не будут причиной того, что КА попадет в защищаемую зону, составляющую 200 км от ГСО.

Минимальная высота перигея h_p , [км] должна быть вычислена по формуле:

$$h_{p,\min} = 36021 \text{ km} + (1000 C_R * A/m). \quad (2)$$

Эта формула исходит из значения высоты ГСО в 35 786 км и устанавливает защищенную область в 200 км вокруг ГСО, плюс 35 километров, для учета максимального снижения объектов из-за лунных, солнечных и геопотенциальных возмущений.

Орбита захоронения должна быть устойчивой; то есть перигей должен оставаться выше защищаемой области, по крайней мере, в течение 100 лет. Устойчивой орбита будет, если:

а) начальный перигей направлен на Солнце;

б) действия по уводу выполняются в самое благоприятное для этого время.

Примечание: оптимальная траектория будет немного отличаться от направления на Солнце из-за лунных возмущений.

На рисунке 7 представлен пример прогноза высоты перигея КА на 100 лет.

Орбиты захоронения являются устойчивыми, если заключительный эксцентриситет не превышает 0.005.

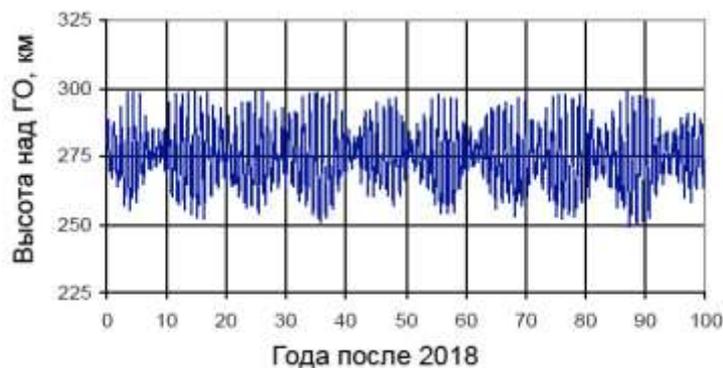


Рисунок 7. Пример прогноза высоты перигея на 100 лет

Изменение параметров орбиты КА на орбите захоронения в области ГСО зависит от конечных параметров орбиты после увода, характеристик отражения поверхности КА, вследствие чего для оценки конечной орбиты на соответствие требованиям, предъявляемым нормативными документами, целесообразно применять численную модель, учитывающую все возможные долговременные возмущающие факторы: притяжение Луны и Солнца, давление света, нецентральность гравитационного поля Земли и характеристики КА.

Для того, чтобы увеличить радиус орбиты ГСО на 235 км, необходимо примерно 8.6 м/с. Таким образом, всего 20 м/с хватит для перевода любого объекта ККМ из защищаемой зоны ГСО на устойчивую орбиту захоронения. Поскольку отделяемые модули будут оснащены двигателями малой тяги, а объекты ККМ могут иметь большую массу и габариты, для расчета параметров маневров перелета на орбиту захоронения можно воспользоваться алгоритмами, описанными в [13].

Формулы для расчета маневров перелета

Задача перелета от одного объекта космического мусора к другому является задачей встречи. Решение этой задачи достаточно подробно рассмотрено авторами в работах [14-16]. Однако объект ККМ пребывает в районе минимального значения наклона своей орбиты несколько дней, за которые разность фаз в момент прилета КА-сборщика в точку встречи может существенно меняться. Следовательно, можно выбрать момент встречи, когда разность фаз близка к оптимальной. Кроме того, за счет длительного интервала перелета использование небольшой трансверсальной составляющей импульса скорости в его начале позволяет и в момент равенства наклонов (пересечение линий графиков) и в момент минимального наклона орбиты цели получить фазовое отличие, при котором СХС оптимального решения задачи перехода будет равна СХС решения задачи встречи.

Таким образом, оценить энергетику перелета можно, не решая задачу встречи, а решая задачу перехода между орбитами, заданными на один момент времени. Это или момент равенства наклонов (пересечение линий графиков) или момент минимального наклона орбиты цели.

Трансверсальная ΔV_t и боковая ΔV_z составляющие импульса скорости определяются в соответствии с соотношениями (3) и (4):

$$\Delta V_t = V_0 \frac{\Delta a}{2a_0}, \quad (3)$$

$$\Delta V_z = 2V_0 \sin \frac{\Delta \gamma}{2}, \quad (4)$$

где Δa – разность больших полуосей начальной и конечной орбит, V_0 – скорость ККМ на начальной орбите, a_0 – большая полуось начальной орбиты, а $\Delta \gamma$ определяется в соответствии с (5):

$$\cos \Delta \gamma = \cos i_f \cos i_0 + \sin i_f \sin i_0 \cos \Delta \Omega, \quad (5)$$

где $\Delta \Omega$ – разность долгот восходящего узла двух орбит, i_0 – наклонение начальной орбиты, i_f – наклонение конечной орбиты.

Таким образом, общую величину маневра ΔV для обоих случаев можно определить по формуле (6):

$$\Delta V = \sqrt{\Delta V_t^2 + \Delta V_z^2}. \quad (6)$$

Конечно, для перелета с начальной орбиты на заданную орбиту требуется два импульса скорости. Необходимо корректировать также разность векторов эксцентриситета. Однако приведенные формулы дают достаточно точную оценку энергетики перелета, учитывая, на какой большой временной интервал прогнозировалось движение объектов ККМ.

Результаты расчета маневров перелета

Для вычисления ΔV необходимо знать орбиты КА-сборщика и орбиты уводимых объектов ККМ на моменты минимальных наклонений, а также в момент совпадения наклонений.

В таблице 1 приведены начальные условия (НУ) всех объектов ККМ, которые надо перевести на орбиты захоронения. Все НУ даны на 1 июля 2018 года и являются исходными данными для поиска моментов времени, оптимальных для маневрирования. В результате прогноза были вычислены пары НУ на момент времени, когда орбита второго из пары объектов ККМ (орбита цели) имеет минимальное наклонение. Данные НУ представлены в таблице 2. Также были выявлены пары НУ на момент времени, когда орбиты обоих объектов ККМ имеют одинаковые наклонения. Эти НУ представлены в таблице 3.

Таблица 2

Начальные условия для перелётов при минимуме наклона целевой орбиты

	48	53	53	54	54	52	52	50	50	51
Т, сутки	3290		3480		3985		4025		4040	
RAAN	54.092	176.007	100.505	192.534	98.016	160.799	143.144	177.607	168.303	184.009
ECC	0.009495	0.004443	0.004501	0.001081	0.001297	0.001731	0.001702	0.000939	0.001	0.002328
SMA	41808.585	41950.31	41949.99	42132.64	42138.78	42188.58	42193.64	42087.87	42089.91	42039.87
INC	2.55	0.152	0.505	0.415	1.182	0.351	0.392	0.287	0.295	0.557
АоР	322.028	190.198	269.873	174.98	295.718	231.416	249.025	218.242	229.219	206.637

	51	47	47	44	44	43	43	41	41	39
Т, сутки	4395		5300		5385		5550		5905	
RAAN	115.054	190.31	82.262	111.023	102.718	27.786	84.504	4.867	71.766	23.621
ECC	0.00239	0.001256	0.001021	0.002344	0.002277	0.00426	0.004127	0.002421	0.002323	0.000336
SMA	42041.19	42142.66	42155.09	42190.06	42184.23	42101	42096.32	41861.28	41862.75	41952.03
INC	0.922	0.244	1.964	0.01	0.177	0.013	0.358	0.2	0.763	0.314
АоР	285.785	221.472	351.504	317.526	326.916	37.422	344.967	69.791	6.717	123.487

	39	40	40	37	37	36	36	34	34	33
Т, сутки	5920		6110		6260		6300		6760	
RAAN	27.138	16.681	64.426	353.118	43.842	28.22	38.65	3.434	64.604	199.484
ECC	0.000315	0.000472	0.000411	0.003012	0.003007	0.000178	0.00006	0.001127	0.001239	0.000826
SMA	41954.26	42243.33	42243.98	41961.34	41959.62	42123.9	42130.09	41930.64	41928.81	42179.12
INC	0.318	0.232	0.495	0.301	0.401	0.313	0.33	0.46	1.057	0.578
АоР	116.042	86.947	26.777	89.144	45.116	116.299	73.781	85.223	31.474	254.501

	33	30	30	29	29	28	28	26	26	23
Т, сутки	6820		6835		7230		7485		7570	
RAAN	184.206	22.075	24.221	18.306	65.38	350.574	69.812	189.88	175.228	8.673
ECC	0.000852	0.000453	0.000449	0.001257	0.001479	0.001982	0.002166	0.001981	0.001951	0.003523
SMA	42174.12	42126.24	42126.06	41943.27	41943.75	42211.53	42204.45	42267.4	42267.64	42156.62
INC	0.619	0.519	0.519	0.54	1.068	0.252	0.597	0.833	0.913	0.348
АоР	273.474	77.575	80.182	84.45	41.416	113.914	42.929	282.627	297.163	109.583

	23	24	24	22	22	21	21	20	20	16
Т, сутки	7575		7715		7775		7790		8120	
RAAN	8.844	8.737	47.936	200.034	169.57	354.533	1.303	348.073	72.631	8.392
ECC	0.003434	0.004875	0.004988	0.004901	0.00492	0.0012	0.001246	0.001923	0.001903	0.002098
SMA	42156.45	42159.13	42157.25	42406.9	42406.93	42396.26	42395.82	42163.9	42171.63	42067.3
INC	0.35	0.397	0.544	0.211	0.245	0.244	0.245	0.338	0.767	1.08
АоР	109.832	109.348	72.296	278.164	309.987	128.428	125.669	137.183	57.826	131.026

	16	17	17	15	15	11	11	12	12	13
Т, сутки	8125		8145		8580		8635		8740	
RAAN	8.912	9.821	25.957	350.204	77.907	8.801	91.572	19.423	73.109	174.296
ECC	0.002039	0.002353	0.002388	0.001599	0.001462	0.00175	0.001659	0.000441	0.000441	0.00242
SMA	42065.73	42399.51	42400.94	42064.93	42060.64	41924.68	41922.82	42151.1	42156.9	42271.57
INC	1.086	0.131	0.135	0.249	1.082	0.044	0.162	0.061	0.27	0.722
АоР	129.559	122.857	108.071	145.567	71.665	144.776	64.895	144.241	100.147	334.081

	13	10	10	9	9	7	7	8	8	6
Т, сутки	8820		8930		8960		8980		9120	
RAAN	157.193	192.484	86.317	206.044	111.751	188.376	161.699	205.511	88.47	173.358
ECC	0.002406	0.001881	0.0018	0.001796	0.001741	0.00615	0.006132	0.002432	0.002444	0.001742
SMA	42272.15	42168.07	42166.1	42077.82	42081.27	42002.91	42002.97	42212.63	42209.95	42190.94
INC	0.827	0.005	0.265	0.031	0.099	0.103	0.132	0.01	0.34	0.172
АоР	354.501	324.153	75.515	321.405	56.584	330.665	358.324	316.837	75.882	358.99

	6	4	4	1	1	2	2	109	109	108
Т, сутки	9175		9545		9655		9845		9860	
RAAN	136.882	202.028	93.845	191.298	130.659	149.818	122.588	181.603	170.313	183.022
ECC	0.001757	0.001533	0.001508	0.002245	0.002248	0.001859	0.001824	0.003453	0.003475	0.001253
SMA	42198.84	42078.14	42083.46	42070.96	42065.73	42104.07	42099.1	42222.44	42221.59	42098.35
INC	0.274	0.119	0.932	0.231	0.288	0.741	1.072	0.275	0.277	0.419
АоР	36.726	336.226	96.305	352.895	58.55	39.242	67.475	5.144	15.086	12.578

	108	105	105	106	106	107	107	103	103	104
Т, сутки	9875		9995		10010		10185		10190	
RAAN	176.176	184.563	149.933	162.605	156.06	170.804	153.881	165.94	163.314	156.284
ECC	0.001302	0.002763	0.002813	0.002654	0.002675	0.003715	0.003602	0.001471	0.001409	0.001936
SMA	42097.82	41999.99	41994.6	42157.14	42157.54	42150.18	42142.96	41977.69	41975.83	42231.62
INC	0.423	0.441	0.494	0.407	0.408	1.739	1.842	0.464	0.469	0.312
АоР	21.026	9.894	45.195	29.674	37.447	18.869	34.988	40.161	41.880	40.202

	104	100	100	102	102	98	98	99	99	96
Т, сутки	10365		10390		10515		10555		10570	
RAAN	111.762	168.169	158.954	169.978	133.972	156.639	118.588	155.619	145.491	164.499
ECC	0.001983	0.002221	0.002126	0.000676	0.000519	0.001204	0.001198	0.000253	0.000135	0.001446
SMA	42225.23	41928.6	41932.99	42257.9	42259.69	42156.36	42155.23	42315.53	42317.16	41915.86
INC	0.609	0.488	0.489	0.394	0.546	0.13	0.164	0.28	0.294	0.416
АоР	90.655	38.95	47.346	54.456	84.376	50.669	89.091	94.129	95.927	44.537

	96	95	95	94	94	93	93	92	92	91
Т, сутки	10760		10790		10925		10940		10980	
RAAN	118.665	171.304	156.215	193.074	136.936	158.854	152.264	171.291	167.889	181.352
ECC	0.00154	0.001354	0.001338	0.003486	0.00354	0.000161	0.000195	0.000418	0.000362	0.000545
SMA	41917.5	42288.5	42289.72	42383.53	42382.49	42182.8	42182.69	42094.24	42100.37	42096.69
INC	0.669	0.365	0.393	0.303	0.34	0.388	0.398	2.457	2.476	0.29
АоР	97.223	40.283	52.089	12.592	72.887	51.963	74.264	49.341	36.041	38.656

	91	90	90	89	89	88	88	87	87	86
Т, сутки	11085		11150		11265		11320		11445	
RAAN	143.685	157.667	127.584	3.921	54	155.482	129.765	180.541	151.189	150.998
ECC	0.000528	0.000831	0.000894	0.000347	0.000323	0.003737	0.003722	0.001705	0.001826	0.000442
SMA	42109.81	42191.89	42201.12	42217.58	42205.21	42157.22	42160.68	42162.62	42167.92	42213.11
INC	0.337	0.307	0.397	0.144	0.288	0.302	0.363	0.499	0.558	0.183
АоР	80.261	63.213	98.980	233.919	174.070	66.865	93.145	41.473	74.215	83.761

	86	85	85	82	82	84	84	81	81	83
Т, сутки	11500		11510		11515		11690		11790	
RAAN	115.292	176.758	164.88	180.011	175.629	172.257	109.194	192.85	123.845	338.061
ECC	0.000476	0.000647	0.000754	0.002464	0.0025	0.000616	0.000634	0.002246	0.00235	0.002188
SMA	42208.21	42206.24	42208.21	41942.18	41941.81	42160.45	42174.65	42191.86	42180.93	42397.46
INC	0.265	0.13	0.134	0.249	0.253	0.203	0.436	0.1	0.215	0.467
АоР	127.654	127.654	127.724	52.755	57.189	61.789	118.990	39.936	112.612	256.981

	83	79	79	80	80	76	76	75	75	74
Т, сутки	11840		11920		12430		12530		12870	
RAAN	350.94	164.618	140.366	196.62	88.054	191.057	162.503	344.791	79.236	4.985
ECC	0.002269	0.002804	0.002706	0.001217	0.00132	0.002188	0.002264	0.001238	0.001193	0.00242
SMA	42395.76	42014.05	42013.54	42339.35	42338.22	42148.42	42151.96	42026.21	42022.71	42358.6
INC	0.487	0.387	0.498	0.117	1.05	0.345	0.394	0.14	0.679	0.137
АоР	246.209	76.202	101.555	46.003	166.181	65.28	96.522	285.818	196.192	260.825

	74	72	72	73	73	70	70	68	68	64
Т, сутки	13050		13055		13420		13965		14155	
RAAN	73.95	356.479	357.937	6.758	51.131	4.634	71.627	3.762	70.798	0.956
ECC	0.002385	0.001261	0.001304	0.003199	0.003037	0.002074	0.001787	0.002924	0.002791	0.002288
SMA	42358.82	42391.52	42393.78	42221.72	42213.71	42152.53	42166.55	42156.39	42143.62	42036.14
INC	0.4	0.268	0.273	0.69	1.001	0.496	1.234	0.219	0.464	0.42
АоР	196.984	288.525	284.635	265.403	229.82	284.313	225.42	292.835	228.933	304.533

	64	65	65	66	66	63	63	61	61	62
Т, сутки	14160		14320		14510		14675		14690	
RAAN	1.262	2.792	51.077	22.946	53.604	10.437	51.58	28.6	32.603	18.11
ECC	0.002266	0.001653	0.001596	0.001859	0.001915	0.000392	0.000219	0.001734	0.001726	0.00245
SMA	42035.96	42174.63	42154.53	42138.85	42148.09	42206.32	42193.58	42003.91	42003.81	42138.69
INC	0.424	0.386	0.505	0.581	0.805	0.43	0.596	0.334	0.338	0.303
АоР	304.585	298.151	258.656	280.626	256.949	295.807	254.308	287.616	283.585	293.91

	62	58	58	60
Т, сутки	14790		14880	
RAAN	47.78	194.907	167.263	1.2
ECC	0.00251	0.003023	0.002998	0.001159
SMA	42141.99	42193.13	42192.12	42135.2
INC	0.455	0.442	0.529	0.41
АоР	263.473	115.79	148.29	321.082

Таблица 3

Начальные условия для перелётов в момент равенства наклонов

	48	53	53	54	54	52	52	50	50	47	47	44	44	43
Т, сутки	2735		3455		3735		3970		4215		4860		5325	
RAAN	37.333	265.678	103.399	202.635	123.137	229.36	168.983	205.899	114.092	239.089	93.697	267.088	100.674	293.315
ECC	0.009255	0.004394	0.004529	0.001025	0.001107	0.001514	0.001721	0.001032	0.000943	0.001177	0.001207	0.002512	0.002329	0.004276
SMA	41810.63	41953.61	41954.43	42137.61	42144.22	42197.94	42187.92	42090.17	42088.88	42160.06	42183.37	42149.61	42188.13	42096.88
INC	1.441		0.437		0.667		0.354		0.540		0.979		0.088	
АоР	327.189	88.548	265.884	166.821	256.492	152.495	220.668	189.471	286.382	162.912	329.139	153.054	326.576	131.492
	43	41	41	39	39	37	37	40	40	36	36	34	34	30
Т, сутки	5495		5710		6010		6015		6055		6415		6560	
RAAN	76.261	340.256	57.446	321.886	43.906	327.1	327.922	43.79	55.879	322.574	58.948	30.162	49.493	331.04
ECC	0.004167	0.002464	0.002413	0.000437	0.000286	0.002985	0.002992	0.000375	0.000368	0.000114	0.000112	0.001223	0.001209	0.000396
SMA	42103.37	41860.91	41861.37	41953.85	41951.32	41956.94	41958.84	42240.21	42239.43	42126.46	42121.7	41929.91	41927.36	42147.02
INC	0.254		0.407		0.446		0.396		0.427		0.546		0.708	
АоР	352.695	96.321	21.265	166.131	89.69	116.892	115.315	64.719	36.003	179.36	55.294	61.945	42.984	139.599
	30	29	29	28	28	23	23	22	22	21	21	20	20	17
Т, сутки	6940		6980		7455		7620		7770		7890		7965	
RAAN	41.652	36.474	44.158	305.565	65.736	332.912	22.197	247.475	172.065	352.247	52.221	33.739	52.1	298.335
ECC	0.000539	0.001425	0.001264	0.001866	0.002177	0.003542	0.003472	0.004956	0.004863	0.001154	0.001247	0.001937	0.00188	0.00239
SMA	42134.75	41941.16	41944.23	42215.79	42205.82	42172.09	42150.78	42406.3	42407.49	42397.69	42397.79	42170.02	42171.6	42401.03
INC	0.659		0.684		0.503		0.380		0.244		0.363		0.438	
АоР	62.338	67.133	57.683	158.111	45.226	141.769	95.699	228.044	307.485	133.304	69.743	92.446	73.817	189.872

	17	15	15	11	11	12	12	10	10	9	9	8	8	6
Т, сутки	8225		8365		8605		8740		8885		8960		9075	
RAAN	65.348	35.987	66.062	281.187	69.477	328.567	73.109	281.116	96.847	248.603	111.751	283.403	95.862	210.954
ECC	0.00228	0.001677	0.001601	0.001722	0.00162	0.000427	0.000441	0.001871	0.001797	0.001797	0.001741	0.002498	0.002419	0.001801
SMA	42402.99	42057.85	42058.28	41927.15	41927.65	42150.79	42156.9	42166.98	42165.86	42072.79	42081.27	42209.18	42214.37	42187.06
INC	0.319		0.558		0.100		0.253		0.145		0.081		0.218	
АоР	67.411	103.088	78.003	223.637	86.103	194.719	100.147	234.58	66.674	278.553	56.584	238.184	70.352	320.744

	6	4	4	1	1	109	109	106	106	102	102	98	98	95
Т, сутки	9135		9395		9710		9970		10170		10325		10680	
RAAN	157.17	243.139	102.642	243.049	115.861	228.5	132.245	171.253	120.151	229.103	192.233	248.515	98.125	198.294
ECC	0.001714	0.001484	0.001448	0.002225	0.002211	0.003502	0.003542	0.002678	0.002727	0.00062	0.000593	0.001321	0.001266	0.001382
SMA	42192.69	42079.93	42083.45	42070.84	42072.47	42214.49	42214.64	42155.85	42154.39	42260.93	42263.34	42159.58	42139.15	42289.09
INC	0.182		0.525		0.449		0.423		0.684		0.455		0.463	
АоР	17.292	292.799	81.827	298.004	71.804	315.392	56.149	21.438	76.142	350.743	27.932	317.632	110.521	10.106

	95	94	94	91	91	89	89	88	88	86	86	85	85	81
Т, сутки	10750		10930		11005		11270		11295		11455		11610	
RAAN	175.997	213.461	135.314	207.113	170.53	285.509	55.383	152.737	139.858	234.487	144.134	217.318	120.01	235.508
ECC	0.001396	0.003528	0.003559	0.000588	0.000629	0.000315	0.000362	0.003695	0.003731	0.00034	0.000536	0.000757	0.000675	0.002212
SMA	42287.91	42382.45	42381.32	42101.25	42100.98	42203.37	42203.89	42158.7	42159.18	42208.59	42211.89	42204.66	42216.15	42195.92
INC	0.368		0.347		0.319		0.305		0.311		0.194		0.271	
АоР	35.908	354.011	73.405	9.437	49.620	297.186	177.125	70.528	83.314	1.545	90.188	90.188	136.926	357.045

	81	80	80	76	76	75	75	74	74	72	72	70	70	68
Т, сутки	11840		12225		12285		12710		12990		13315		13675	
RAAN	102.826	248.911	91.729	239.222	226.422	288.213	68.01	297.984	61.303	340.3	62.554	343.571	49.667	304.079
ECC	0.002347	0.001231	0.001425	0.002161	0.002166	0.001171	0.001301	0.0024	0.002541	0.001403	0.001275	0.002272	0.002036	0.003073
SMA	42176.48	42337.53	42334.69	42163.9	42157.94	42023.29	42021.71	42357.73	42358.17	42391.79	42392.52	42158.26	42134.41	42186.98
INC	0.276		0.611		0.521		0.364		0.332		0.596		0.735	
АoP	133.816	351.78	158.882	12.078	26.341	337.182	204.551	325.416	211.04	298.659	226.988	298.889	241.798	346.509

	68	65	65	63	63	61	61	62	62	58
Т, сутки	14120		14365		14505		14625		14790	
RAAN	65.361	354.035	55.057	331.439	8.858	327.214	7.246	353.04	47.78	194.907
ECC	0.002879	0.001645	0.001533	0.000381	0.000387	0.001755	0.001753	0.002433	0.00251	0.003023
SMA	42145.3	42178.4	42148.43	42197.38	42207.36	42004.86	42008.81	42142.46	42141.99	42193.13
INC	0.412		0.574		0.441		0.358		0.449	
АoP	233.11	308.757	256.44	332.757	297.959	347.991	306.512	316.933	263.473	115.79

По полученным начальным условиям для первой и второй схем перелета определялись параметры маневров для каждого перелета в отдельности. В таблицах 4 и 5 приведены номера объектов (из таблицы 1), с орбиты которого (первый столбец) и на орбиту которого (второй столбец) осуществляется перелет. Величина корректируемой разницы в ДВУ (ст. 3). Наклонения орбит (ст. 4 и ст. 5). Угол между плоскостями орбит $\Delta\gamma$ (ст. 6). Аргумент широты линии пересечения плоскостей орбит (ст. 7). Корректируемая разность больших полуосей орбит (ст. 8). Трансверсальная (ст. 9) и боковая (ст. 10) составляющие и полная величина (ст. 10) импульса скорости.

В таблицах 6 и 7 приведены интегральные характеристики для облета групп по 15 объектов, т.к. это оптимальное число отделяемых модулей на одном КА-сборнике.

Таблица 4

Характеристики перелетов при минимуме наклонения целевой орбиты

Переход	$\Delta\Omega, ^\circ$	$i_0, ^\circ$	$i_b, ^\circ$	$\Delta\gamma, ^\circ$	$\varphi_z, ^\circ$	$\Delta a, \text{км}$	$\Delta V_t, \text{м/с}$	$\Delta V_z, \text{м/с}$	$\Delta V, \text{м/с}$
48 53	121.915	2.550	0.152	2.63	177.19	141.72	5.17	141.28	141.37
53 54	92.029	0.505	0.415	0.66	141.41	182.65	6.66	35.67	36.29
54 52	62.783	1.182	0.351	1.07	163.01	49.80	1.82	57.30	57.33
52 50	34.463	0.392	0.287	0.22	133.73	-105.77	-3.86	12.06	12.66
50 51	15.706	0.295	0.557	0.28	147.99	-50.04	-1.82	15.26	15.37
51 47	75.256	0.922	0.244	0.89	164.65	101.47	3.70	47.84	47.98
47 44	28.761	1.964	0.010	1.96	179.86	34.97	1.27	104.90	104.90
44 43	-74.932	0.177	0.013	0.17	4.14	-83.23	-3.03	9.34	9.82
43 41	-79.637	0.358	0.200	0.38	31.42	-235.04	-8.57	20.25	21.98
41 39	-48.145	0.763	0.314	0.60	22.91	89.29	3.25	32.24	32.40
39 40	-10.457	0.318	0.232	0.10	25.11	289.07	10.54	5.32	11.81
40 37	71.308	0.495	0.301	0.49	35.58	-282.64	-10.30	26.29	28.24
37 36	-15.622	0.401	0.313	0.13	40.25	164.28	5.99	7.00	9.21
36 34	-35.216	0.330	0.460	0.27	80.20	-199.45	-7.27	14.44	16.17
34 33	134.880	1.057	0.578	1.52	164.38	250.30	9.12	81.60	82.11
33 30	-162.131	0.619	0.519	1.12	8.14	-47.89	-1.75	60.32	60.34
30 29	-5.915	0.519	0.540	0.06	71.96	-182.79	-6.66	3.14	7.37
29 28	74.806	1.068	0.252	1.03	13.64	267.78	9.76	55.32	56.17
28 26	120.068	0.597	0.833	1.24	144.60	62.96	2.29	66.76	66.80
26 23	-166.555	0.913	0.348	1.25	3.70	-111.02	-4.05	67.28	67.40
23 24	-0.107	0.350	0.397	0.05	0.90	2.68	0.10	2.52	2.52
24 22	152.098	0.544	0.211	0.74	172.30	249.65	9.10	39.55	40.58
22 21	175.037	0.245	0.244	0.49	2.48	-10.67	-0.39	26.21	26.21
21 20	13.230	0.245	0.338	0.11	42.63	-231.92	-8.45	6.13	10.44
20 16	-64.239	0.767	1.080	1.02	72.99	-104.33	-3.80	54.57	54.70
16 17	0.909	1.086	0.131	0.96	179.88	333.78	12.17	51.24	52.66
17 15	35.753	0.135	0.249	0.16	65.25	-336.01	-12.25	8.60	14.96

15	11	-69.106	1.082	0.044	1.07	2.21	-135.95	-4.96	57.25	57.46
11	12	-72.149	0.162	0.061	0.15	22.06	228.28	8.32	8.30	11.75
12	13	101.187	0.270	0.722	0.82	120.07	114.67	4.18	43.91	44.11
13	10	35.291	0.827	0.005	0.82	179.80	-104.08	-3.79	44.15	44.31
10	9	119.727	0.265	0.031	0.28	174.52	-88.29	-3.22	15.11	15.45
9	7	76.625	0.099	0.103	0.13	126.88	-78.36	-2.86	6.72	7.30
7	8	43.812	0.132	0.010	0.12	176.82	209.66	7.64	6.71	10.17
8	6	84.888	0.340	0.172	0.37	152.18	-19.01	-0.69	19.70	19.71
6	4	65.146	0.274	0.119	0.25	154.26	-120.69	-4.40	13.34	14.05
4	1	97.453	0.932	0.231	0.99	166.61	-12.50	-0.46	53.05	53.05
1	2	19.159	0.288	0.741	0.48	149.45	38.34	1.40	25.67	25.70
2	109	59.015	1.072	0.275	0.96	165.78	123.34	4.50	51.50	51.69
109	108	12.709	0.277	0.419	0.16	145.02	-123.24	-4.49	8.63	9.73
108	105	8.387	0.423	0.441	0.07	101.67	-97.84	-3.57	3.52	5.01
105	106	12.672	0.494	0.407	0.13	137.35	162.55	5.93	7.07	9.22
106	107	14.744	0.408	1.739	1.35	160.84	-7.36	-0.27	72.34	72.34
107	103	12.059	1.842	0.464	1.39	176.01	-165.27	-6.02	74.66	74.90
103	104	-7.030	0.469	0.312	0.16	13.48	255.79	9.32	8.79	12.82
104	100	56.407	0.609	0.488	0.53	129.83	-296.63	-10.81	28.40	30.39
100	102	11.024	0.489	0.394	0.13	143.62	324.90	11.84	6.82	13.66
102	98	22.667	0.546	0.130	0.43	173.29	-103.33	-3.77	23.02	23.32
98	99	37.031	0.164	0.280	0.18	109.44	160.29	5.84	9.59	11.23
99	96	19.008	0.294	0.416	0.17	126.24	-401.30	-14.63	9.01	17.18
96	95	52.639	0.669	0.365	0.53	147.04	371.00	13.52	28.61	31.65
95	94	36.859	0.393	0.303	0.24	129.64	93.81	3.42	12.66	13.12
94	93	21.918	0.340	0.388	0.15	97.85	-199.69	-7.28	7.84	10.70
93	92	19.027	0.398	2.457	2.08	157.41	-88.45	-3.22	111.85	111.89
92	91	13.463	2.476	0.290	2.20	178.24	-3.68	-0.13	117.76	117.76
91	90	13.982	0.337	0.307	0.08	117.79	82.08	2.99	4.50	5.40
90	89	-123.663	0.397	0.144	0.49	14.11	16.46	0.60	26.38	26.38
89	88	101.482	0.288	0.302	0.46	139.63	-47.99	-1.75	24.51	24.58
88	87	50.776	0.363	0.499	0.39	97.00	1.94	0.07	20.90	20.90
87	86	-0.191	0.558	0.183	0.38	0.09	45.19	1.65	20.12	20.19
86	85	61.466	0.265	0.130	0.23	150.63	-1.97	-0.07	12.49	12.49
85	82	15.131	0.134	0.249	0.12	148.57	-266.03	-9.70	6.69	11.78
82	84	-3.372	0.253	0.203	0.05	13.34	218.64	7.97	2.78	8.44
84	81	83.656	0.436	0.100	0.44	166.84	17.22	0.63	23.41	23.42
81	83	145.784	0.215	0.467	0.66	23.60	216.54	7.89	35.20	36.07
83	79	173.678	0.487	0.387	0.87	177.20	-381.71	-13.91	46.82	48.84
79	80	56.254	0.498	0.117	0.44	167.34	325.81	11.88	23.81	26.61
80	76	103.003	1.050	0.345	1.18	163.40	-189.80	-6.92	63.13	63.51
76	75	177.712	0.394	0.140	0.53	0.60	-125.75	-4.58	28.65	29.01
75	74	-74.251	0.679	0.137	0.66	11.61	335.90	12.24	35.15	37.22

74	72	77.471	0.400	0.268	0.43	37.43	32.70	1.19	23.10	23.13
72	73	8.821	0.273	0.690	0.42	165.49	-172.05	-6.27	22.66	23.51
73	70	-46.497	1.001	0.496	0.75	28.61	-61.18	-2.23	40.31	40.37
70	68	-67.865	1.234	0.219	1.17	9.99	-10.16	-0.37	62.73	62.73
68	64	-69.842	0.464	0.420	0.51	51.00	-107.48	-3.92	27.22	27.50
64	65	1.530	0.424	0.386	0.04	164.88	138.68	5.06	2.12	5.48
65	66	-28.131	0.505	0.581	0.27	88.46	-15.67	-0.57	14.70	14.71
66	63	-43.167	0.805	0.430	0.57	30.91	58.23	2.12	30.73	30.80
63	61	-22.980	0.596	0.334	0.32	24.32	-189.67	-6.91	16.99	18.34
61	62	-14.493	0.338	0.303	0.09	59.51	134.88	4.92	4.72	6.82
62	58	147.127	0.455	0.442	0.86	163.81	51.14	1.86	46.16	46.20
58	60	-166.063	0.529	0.410	0.93	6.08	-56.92	-2.07	50.01	50.05

Таблица 5

Характеристики перелетов в момент равенства наклонов

Переходы	$\Delta\Omega, ^\circ$	$i, ^\circ$	$\Delta\gamma, ^\circ$	$\varphi_z, ^\circ$	$\Delta a, \text{км}$	$\Delta V_t, \text{м/с}$	$\Delta V_z, \text{м/с}$	$\Delta V, \text{м/с}$	
48	53	131.655	0.025	2.628	24.18	142.98	5.21	141.03	141.13
53	54	99.236	0.008	0.666	139.62	183.18	6.68	35.73	36.35
54	52	106.223	0.012	1.067	143.11	53.72	1.96	57.25	57.29
52	50	36.916	0.006	0.224	108.46	-97.75	-3.56	12.01	12.53
50	47	124.997	0.009	0.957	152.50	71.19	2.60	51.36	51.42
47	44	173.391	0.017	1.954	176.70	-33.76	-1.23	104.84	104.85
44	43	167.359	0.002	0.174	6.32	-91.25	-3.33	9.33	9.91
43	41	96.005	0.004	0.377	42.00	-242.45	-8.84	20.22	22.07
41	39	95.560	0.007	0.603	42.22	92.47	3.37	32.35	32.52
39	37	76.806	0.008	0.554	128.40	5.61	0.20	29.73	29.74
37	40	75.868	0.007	0.486	127.93	281.37	10.26	26.09	28.04
40	36	93.305	0.007	0.620	136.65	-112.97	-4.12	33.29	33.54
36	34	-28.786	0.010	0.271	75.61	-191.79	-6.99	14.55	16.15
34	30	78.453	0.012	0.895	129.22	219.66	8.01	48.02	48.68
30	29	-5.178	0.011	0.059	87.41	-193.59	-7.06	3.19	7.75
29	28	98.593	0.012	1.036	40.71	271.55	9.90	55.61	56.49
28	23	92.824	0.009	0.728	43.59	-33.73	-1.23	39.06	39.08
23	22	134.722	0.007	0.701	22.64	255.52	9.32	37.64	38.78
22	21	179.818	0.004	0.488	0.09	-9.79	-0.36	26.19	26.19
21	20	-18.482	0.006	0.116	80.76	-227.77	-8.30	6.25	10.39
20	17	113.765	0.008	0.733	33.12	229.43	8.37	39.33	40.21
17	15	-29.361	0.006	0.162	75.32	-345.14	-12.58	8.68	15.29
15	11	144.875	0.010	1.064	17.56	-131.14	-4.78	57.10	57.30
11	12	100.910	0.002	0.154	39.55	223.14	8.14	8.28	11.61
12	10	151.993	0.004	0.490	14.00	10.08	0.37	26.29	26.30
10	9	151.756	0.003	0.280	165.88	-93.07	-3.39	15.04	15.42
9	8	171.652	0.001	0.161	175.83	127.92	4.66	8.62	9.80

8	6	115.092	0.004	0.367	147.55	-27.32	-1.00	19.70	19.72
6	4	85.969	0.003	0.247	132.98	-112.76	-4.11	13.28	13.90
4	1	140.407	0.009	0.988	160.20	-12.61	-0.46	53.02	53.02
1	109	112.639	0.008	0.746	146.32	142.02	5.18	40.06	40.39
109	106	39.008	0.007	0.282	109.50	-58.79	-2.14	15.16	15.31
106	102	108.952	0.012	1.113	144.47	106.54	3.88	59.75	59.87
102	98	56.282	0.008	0.429	118.14	-103.77	-3.78	23.03	23.34
98	95	100.169	0.008	0.709	140.08	149.95	5.47	38.07	38.46
95	94	37.464	0.006	0.236	108.73	94.53	3.45	12.67	13.13
94	91	71.799	0.006	0.407	125.90	-280.06	-10.21	21.84	24.11
91	89	114.979	0.006	0.537	147.49	102.39	3.73	28.83	29.07
89	88	97.354	0.005	0.457	138.68	-45.18	-1.65	24.54	24.60
88	86	94.629	0.005	0.456	137.31	49.41	1.80	24.50	24.56
86	85	73.184	0.003	0.231	126.59	-7.23	-0.26	12.41	12.41
85	81	115.498	0.005	0.458	147.75	-20.23	-0.74	24.60	24.61
81	80	146.085	0.005	0.528	163.04	161.05	5.87	28.33	28.94
80	76	147.493	0.011	1.172	163.75	-170.79	-6.23	62.90	63.21
76	75	61.791	0.009	0.535	120.89	-134.65	-4.91	28.71	29.13
75	74	130.026	0.006	0.660	24.99	336.02	12.25	35.41	37.47
74	72	81.003	0.006	0.431	49.50	33.62	1.23	23.14	23.17
72	70	78.983	0.010	0.757	50.51	-234.25	-8.54	40.65	41.53
70	68	105.588	0.013	1.171	37.21	52.57	1.92	62.83	62.86
68	65	71.326	0.007	0.480	54.34	33.10	1.21	25.78	25.81
65	63	83.618	0.010	0.765	48.19	48.95	1.78	41.07	41.11
63	61	41.644	0.008	0.313	69.18	-202.51	-7.38	16.81	18.36
61	62	14.206	0.006	0.088	82.90	133.65	4.87	4.74	6.80
62	58	147.127	0.008	0.860	163.56	51.14	1.86	46.17	46.21

Таблица 6

Перелеты между 15 объектами (минимум наклонения)

Первый и последний объект	Время t_1	Время t_2	Длительность, сутки	Количество объектов	СХС, м/с
48 → 34	3290	6300	3010	15	581.1
33 → 12	6760	8635	1875	15	569.85
13 → 103	8740	10185	1445	15	445.64
104 → 87	10190	11320	1130	15	470.53
86 → 68	11445	13965	2520	15	475.43
64 → 60	14155	14880	725	8	187.7
			10705	83	2730.25

Таблица 7

Перелеты между 15 объектами (совпадение наклонений)

Первый и последний объект	Время t_1	Время t_2	Длительность, сутки	Количество объектов	СХС, м/с
48 → 30	2735	6560	3825	15	666.01
29 → 4	6940	9135	2195	15	432.81
1 → 76	9395	12225	2830	15	459.28
75 → 58	12285	14790	2505	10	327.89
			11355	55	1885.99

Анализ полученных результатов

Анализ полученных результатов показывает, что предпочтительной схемой облета является перелет к объекту ККМ, когда его орбита имеет минимальное наклонение. Данный вариант требует запасов СХС около 2730 м/с и позволяет облететь за 10705 суток 83 объекта ККМ. Требуется шесть КА-сборщиков.

Вариант перелета в момент совпадения наклонений требует 1885 м/с СХС, но позволяет за 11355 суток облететь только 55 объектов ККМ, для этого необходимо четыре КА-сборщика.

Затраты на перелет к следующему объекту примерно одинаковы для обеих схем и составляют в среднем 32.9 м/с и 34.3 м/с соответственно.

Полученные данные можно использовать при проектировании миссий увода объектов ККМ, в которых могут участвовать сразу несколько КА-сборщиков. За счет полученных данных можно выделить интервалы времени, когда работа КА-сборщика по уводу объектов ККМ на орбиты захоронения будет наиболее эффективна с учетом имеющихся ограничений по времени функционирования, количеству топлива, числу специальных отделяемых модулей и самих КА-сборщиков. Полученные данные можно использовать при проектировании КА-сборщика, а также при расчете числа модулей на борту КА-сборщика.

Выводы

1. На ГСО было выделено 87 объектов ККМ, требующих перевода на орбиты захоронения.
2. Была проанализирована эволюция элементов орбит этих объектов.
3. На основе анализа эволюции элементов орбит этих объектов была определена предпочтительная стратегия облета объектов ККМ, которая предполагает, что перелет к очередному объекту ККМ осуществляется, когда наклонение его орбиты минимально.

4. Рассчитана суммарная характеристическая скорость, требуемая для облета всех выделенных объектов ККМ.
5. Предоставлена возможность для определения числа КА-сборщиков, требующихся для выполнения этой миссии, и характеристик этих КА.

Список литературы

1. ISO 24113:2011(E). Space systems — Space debris mitigation requirements. — Impl. 2011 – 05 – 15. — Geneva : ISO Central Secretariat, 2011. — 13 p.
2. ISO 26872:2010(E). Space systems — Disposal of satellites operating at geosynchronous altitude. — Impl. 2010 – 09 – 15. — Geneva : ISO Central Secretariat, 2010. — 53 p.
3. Inter-Agency Space Debris Co-ordination Committee, IADC Space Debris Mitigation Guidelines, IADC-02-01, 2007 [Интернет ресурс]: [http:// www.iadc-online.org](http://www.iadc-online.org) (дата обращения 25.12.2017)
4. Support to the IADC Space Debris Mitigation Guidelines / Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, 2007 [Интернет ресурс]: <https://www.iadc-online.org/Documents/IADC-0406%20Support%20to%20IADC%20Guidelines%20rev5.5.pdf> (дата обращения 25.12.2017).
5. Satellite Catalogue. [Интернет ресурс]: <http://www.celestrak.com/satcat/search.asp> (дата обращения 18.11.2017).
6. Overview of Russia's space launcher fleet [Интернет ресурс]: http://www.russianspaceweb.com/rockets_launchers.html (дата обращения 30.07. 2018).
7. Райкунов Г.Г. Баллистическое обеспечение обслуживания системы летательных аппаратов, движущихся по круговой орбите, М., Издательство ОАО «Институт подготовки кадров машиностроения и приборостроения», 2002, 102.
8. Баранов А.А., Гришко Д.А., Майорова В.И. Исследование затрат характеристической скорости, необходимой для обслуживания и восполнения спутниковых систем на круговых орбитах // Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, № 3 (15), с. 26. [Интернет ресурс]: <http://engjournal.ru/articles/642/642.pdf> (дата обращения 01.08.2018).
9. Баранов А.А., Гришко Д.А., Медведевских В.В., Лапшин В.В. Диагональное решение задачи облёта объектов крупногабаритного космического мусора на солнечно-синхронных орбитах // Космические исследования. 2016. Т.54. №3. С. 242-250.

10. Baranov A.A., Grishko D.A., Razoumny Y.N., Li Jun. Flyby of large-size space debris objects and their transition to the disposal orbits in LEO // *Advances in Space Research*, Vol. 59, 2017, pp. 3011–3022.
11. Baranov A.A., Grishko D.A., Razoumny Y.N. Large-size space debris flyby in low Earth orbits // *Cosmic Research*, Vol. 55, Issue 5, 2017, pp. 361-370.
12. Baranov A.A., Grishko D.A. Optimization of Flyby Schemes in the Framework of ADR Mission in LEO // *Advances in Astronautical Sciences*. Volume 161, 2017, pp. 519-526.
13. Баранов А.А., де Прадо А.Ф.Б., Разумный В.Ю., Баранов А.А., Оптимальные переходы с малой тягой между близкими околокруговыми компланарными орбитами // *Космические исследования*. 2011. Т. 49. № 3. С. 278-288.
14. Баранов А.А. О геометрическом решении задачи встречи на близких почти круговых орбитах // *Космические исследования*. 1989. Т. 27. № 6. С. 808-816.
15. Баранов А.А., Терехова Е.О. Оптимальная четырехимпульсная встреча на компланарных почтикруговых орбитах // *Космические исследования*. 1995. Т. 33. № 4. С. 420-425.
16. Баранов А.А., Ролдугин Д.С. Шестиимпульсные маневры встречи КА на околокруговых некомпланарных орбитах // *Космические исследования*, 2012, т. 50, № 6, с. 472-479.

Оглавление

Введение	3
Эволюция орбит космического мусора вблизи ГСО	4
Выделение групп КKM, позволяющих эффективное удаление их объектов	9
Выбор последовательности облёта объектов КKM в области ГСО	10
Расчет параметров орбит захоронения для ГСО	12
Формулы для расчета маневров перелета	13
Результаты расчета маневров перелета	14
Анализ полученных результатов	25
Выводы	25
Список литературы	26