7. Spatio-temporal structure of the wave packets generated by the solar terminator / E. L. Afraimovich, I. K. Edemskiy, S. V. Voeykov et al. // Advances in Space Research. 2009. Vol. 44, no 7. P. 824–835.

8. The MHD nature of night-time MSTIDs excited by the solar terminator / E. L. Afraimovich, I. K. Edemskiy, A. S. Leonovich et al. // Geophys. Res. Letters. 2009. Vol. 36. L15106. doi:10.1029/2009GL039803.36.

9. Сбои функционирования спутниковых навигационных систем GPS-ГЛОНАСС, обусловленные мощным радиоизлучением солнца во время солнечных вспышек 6, 13 декабря 2006 г. и 28 октября 2003 г. / Э. Л. Афраймович, Н. С. Гаврилюк, В. В. Демьянов и др. // Космические исследования. 2009. Т. 47, № 2. С. 146–157.

10. Effects of ionosphere super-bubble on the GPS positioning performance depending on the orientation relative to geomagnetic field / V. V. Demyanov, Yu. V. Yasyukevich, A. B. Ishin et al. // GPS solutions. 2012. Vol. 16, no. 2. P. 181–189.

References

1. *Global'naya sputnikovaya radionavigatsionnaya sistema GLONASS* (The Global Satellite Radio Navigation System GLONASS). Ed. Kharisov V. N., Perov A. I., Boldin V. A. Moscow, IPRZhR, 1998, 400 p.

2. Calais E., Minster J. B. *Geophys. Res. Let*. 1995, vol. 22, p. 1045–1048.

3. Afraimovich E. L., Palamartchouk K. S., Perevalova N. P. *Acta Geod. Geoph. Hung*. 1997, vol. 32, no. 3–4, p. 469–479. Abstract.

4. Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Voeikov S. V. et al. *Solnechno-Zemnaya phisika*. 2011, vol. 18, p. 24–39.

5. Afraimovich E. L., Perevalova N. P. *GPS-monitoring verkhney atmosfery Zemli* (GPS monitoring of the Earth's upper atmosphere). Irkutsk, 2006, 480 p.

6. Kunitsyn V. E., Tereshchenko E. D., Andreeva E. S. *Radiotomografiya ionosfery* (Ionospheric radio tomography). Moscow, Nauka, 2007.

7. Afraimovich E. L., Edemskiy I. K., Voeykov S. V., Yasukevich Yu. V., Zhivetiev I. V. *Advances in Space Research*. 2009, vol. 44, no. 7, p. 824–835.

8. Afraimovich E. L., Edemskiy I. K., Leonovich A. S., Leonovich L. A., Voeykov S. V., Yasyukevich Yu. V. *Geophys. Res. Letters*. 2009, vol. 36, L15106. doi:10.1029/2009GL039803.36.

9. Afraimovich E. L., Demyanov V. V., Gavrilyuk N. S., Ishin A. B., Smolkov G. Ya. *Cosmic Research*. 2009, vol. 47, no. 2, p. 126–137.

10. Demyanov V. V., Yasyukevich Yu. V., Ishin A. B., Astafyeva E. I., Jin S. *GPS solutions*. 2012, vol. 16, no. 2, p. 181–189.

© Ясюкевич Ю. В., Перевалова Н. П., Демьянов В. В., Едемский И. К., Маркидонова А. А., 2013

УДК 629.78

АНАЛИЗ ВЫПОЛНЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ МЕЖАГЕНТСКОГО КООРДИНАЦИОННОГО КОМИТЕТА ПО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ ОБРАЗОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Ю. Л. Булынин, И. Л. Созонова

ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина 52
E-mail: bulinin@iss-reshetnev.ru

Рассматриваются требования межагентского документа «Руководящие принципы организации работ по снижению техногенного засорения космического пространства» и обсуждается возможность их выполнения.

Проведенный в статье анализ долгосрочной эволюции орбит спутников систем ГЛОНАСС и GPS показал, что минимизация эксцентриситета на момент окончания активного функционирования наиболее простой и эффективный путь для предотвращения столкновений в области средневысотных орбит. В статье показано, что для гарантированной безопасности действующей орбитальной группировки системы ГЛОНАСС, высота орбиты «захоронения» должна отличаться от номинальной не менее, чем на 450 км при эксцентриситете не более 0,0004.

Из приведенных в статье статистических данных следует, что с 1999 по 2011 гг. практически половина спутников была уведена на орбиту, соответствующую требованиям «Руководящих принципов МККМ по предупреждению образования космического мусора».

На примере увода КА Экспресс-А3 продемонстрирована возможность увода на орбиту «захоронения» с ГСО отечественных КА, находящихся на западной границе зоны видимости российских станций слежения.

Ключевые слова: космический мусор, космический объект, оберегаемые районы, область низковысотных орбит, область геостационарной орбиты, область средневысотных орбит, орбита «захоронения».

ANALYSIS OF THE REQUIREMENTS PERFERMANCE OF INTERAGANCY COORDINATION COMMITTEE ON DEBRIS PREVENTION

Yu. L. Bulynin, I. L. Sozonova

JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems"
52 Lenin str., Zhelenogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia. E-mail: bulinin@iss-reshetnev.ru

The authors consider the requirements of the interagency document "Guidelines for the activity management on the decrease of the space pollution" and discuss the possibility of their fulfillment.

The analysis of the long-term evolution of the GLONASS and GPS satellites orbits made in the article shows that the minimization of the eccentricity at the end of the active functioning is the easiest and the most effective way for collision prevention in the area of medium earth orbit. In the article it is shown that for guaranteed safety of the acting orbital group of the GLONASS system the height of the disposal orbit should be different from the nominal orbit at least at 450 km at the eccentricity value not exceeding 0,0004.

According to the data provided in the article in the period from 1999 to 2011 almost the half of the satellites were transferred to the orbit meeting the requirements of the "Support to the IADC Spaces Debris Mitigation Guidelines".

The sample of the "Express-A3" satellite illustrates the possibility of the transfer of the satellites located at the western border of the Russian tracker stations visibility zone from the GEO to the disposal orbit.

Keywords: space debris, extraterrestrial object, protected regions, area of low circular orbit, area of geostationary orbit, area of middle circular orbit, disposal orbit.

Устав Межагентского координационного комитета по предупреждению образования космического мусора (МККМ) Inter-Agency Coordinating Space Debris (IADC), как самостоятельной организации, был принят в 1993 году. Сегодня МККМ – авторитетный международный технический эксперт, который тщательно исследует и прогнозирует последствия различных сценариев развития космической деятельности и формулирует свои рекомендации на основе консенсуса между специалистами различных государств.

Комитетом разработан документ под названием «Руководящие принципы МККМ по предупреждению образования космического мусора», учитывающий общее воздействие космических полетов на окружающую среду. При этом особое внимание уделяется следующим аспектам:

– ограничение образования мусора при штатных операциях;

– сведение к минимуму возможностей разрушения на орбите;

– удаление с орбиты после прекращения программы полета;

– предупреждение столкновений на орбите.

В настоящее время определено два оберегаемых района. Район А – район низкой околоземной орбиты – сферический район от поверхности Земли до высоты 2000 км. И район геостационарной орбиты. Рассматривается вопрос о введении третьего оберегаемого района – область средневысотных орбит систем ГЛОНАСС, GPS и GALILEO.

Орбитальная обстановка в области средневысотных орбит. Для оценки орбитальной обстановки в области средневысотных орбит проанализированы элементы орбит космических объектов системы ГЛОНАСС, запущенных в период с 1982 по 2011 гг., и космических объектов системы GPS, запущенных в период с 1978 по 2009 гг. [1].

На рис. 2–4 приведены эксцентриситеты орбит КО системы ГЛОНАСС и системы GPS, а так же высоты перигеев орбит КО системы GPS относительно номинальной высоты системы ГЛОНАСС.

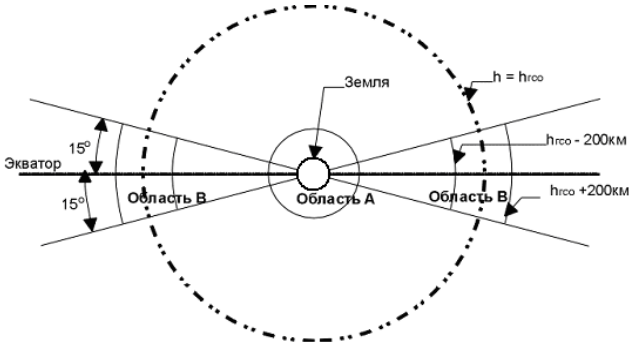

Рис. 1. Оберегаемые районы

Из рис. 2 видно, что фактически почти все орбиты космических объектов (КО) системы ГЛОНАСС имеют малые эксцентриситеты до 0,004. Максимальное значение эксцентриситета – 0,007.

Эксцентриситеты орбит КО системы GPS существенно больше эксцентриситетов орбит КО системы ГЛОНАСС. Максимальное значение эксцентриситета орбиты КО системы GPS – 0,04 (см. рис. 3).

Как видно из рис. 4, высоты перигея двух КО системы GPS находятся уже ниже номинальной высоты системы ГЛОНАСС. С годами тенденция сближения будет взаимной. КА ГЛОНАСС будут стремиться к орбите GPS своими апогеями, а GPS к орбите ГЛОНАСС своими перигеями. И это стремление будет тем медленнее, чем меньший эксцентриситет будут иметь КА на момент окончания своей активной жизни.

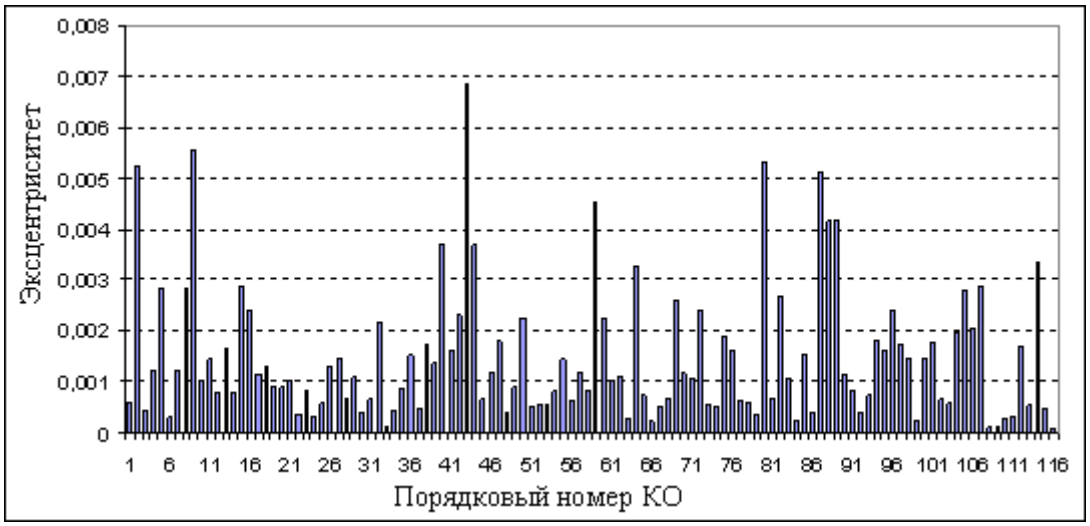

Рис. 2. Эксцентриситеты орбит КО системы ГЛОНАСС

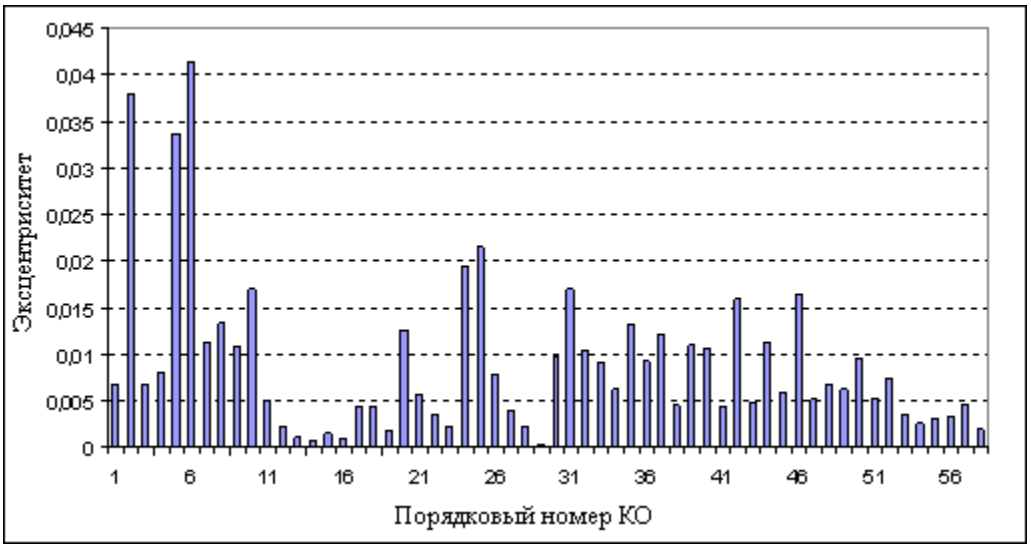

Рис. 3. Эксцентриситеты орбит КО системы GPS

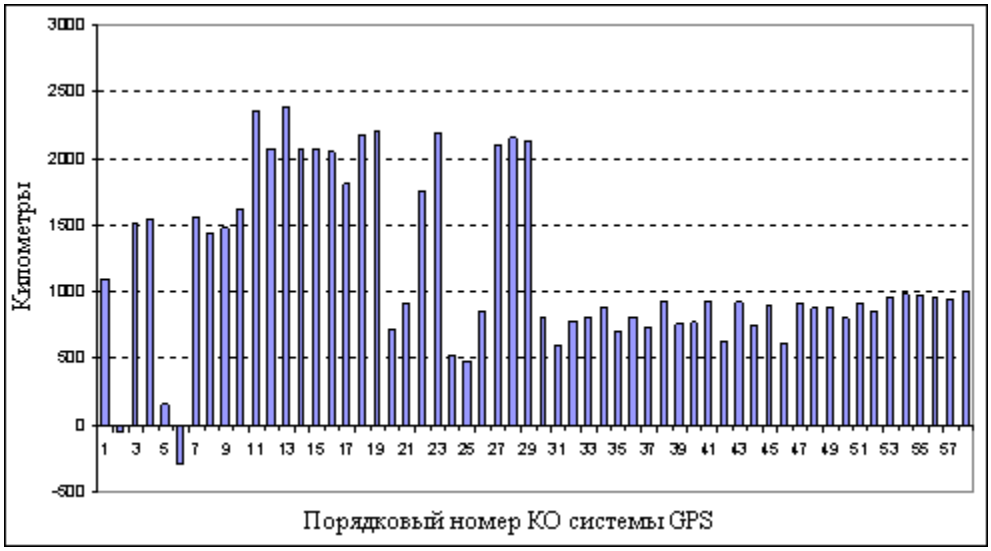

Рис. 4. Высота перигея орбит КО системы GPS относительно номинальной высоты системы ГЛОНАСС

По предварительным расчетам окончание САС с эксцентриситетом на уровне 0,001–0,002 позволит исключить возможность взаимного сближения в течение 300–400 лет. Таким образом, минимизация эксцентриситета на момент окончания активного функционирования наиболее простой и эффективный путь для предотвращения столкновений в области средневысотных орбит.

При оценке риска столкновения особое внимание следует уделять определению возможного диапазона высот, на которых могут находиться спутники системы ГЛОНАСС на этапе ввода в систему и в процессе штатной эксплуатации. Вновь запущенные спутники на этапе ввода в систему могут находиться на орбитах, высота которых может отличаться от номинальной на ± 440 км. В процессе штатной эксплуатации основное влияние на отличие высоты орбиты от номинальной оказывает эксцентриситет. Фактический эксцентриситет большинства спутников системы ГЛОНАСС, в том числе и закончивших эксплуатацию, находится на уровне 0,004 и менее, что соответствует отличию высоты орбиты от номинальной не более чем на ±130 км.

Проведенные расчеты показывают, что, для гарантированной безопасности действующей орбитальной группировки системы ГЛОНАСС, высота орбиты «захоронения» должна отличаться от номинальной не менее чем на 450 км при эксцентриситете не более 0,0004 [2].

Выполнение требований межагентского координационного комитета по предупреждению образования космического мусора. На ежегодных сессиях межагентского координационного комитета по предупреждению образования космического мусора обсуждаются результаты выполнения требований «Руководящих принципов МККМ по предупреждению образования космического мусора». На сессии 2012 года Европейским космическим агентством были представлены сведения по тем спутникам, которые с 1999 по 2011 год включительно прекратили свое активное существование (табл. 1). Можно отметить, что почти половина спутников была выведена на орбиту дрейфа, соответствующую требованиям «Руководящих принципов МККМ по предупреждению образования космического мусора». С каждым годом процент выведенных на безопасную орбиту «захоронения» космических объектов увеличивается.

Для примера рассмотрим ситуацию, сложившуюся в 2010 г. На ГСО были запущены 29 новых КА, а 19 КА были выведены из эксплуатации.

Из них:

11 КА были уведены с орбиты в соответствии с правилами МККМ:

- TDRS-1 (83026B, USA, 357 km x 515 km);
- Satcom C-3 (92060B, USA, 826 km x 1056 km);
- Thaicom 1 (93078B, Thailand, 302 km x 317 km);
- Brazilsat B1 (94049A, Brazil, 282 km x 298 km);
- PAS 4 (95040A, USA, 803 km x 1011 km);
- Nahuel 1A (97002B, Argentina, 241 km x 265 km);
- BSAT-1A (97016B, Japan, 309 km x 345 km);
- Intelsat VIII F-2 (97031A, Intelsat, 500 km x 738 km);
- Eutelsat W2 (98056A, Eutelsat, 281 km x 294 km);
- Insat 4CR (07037A, India, 275 km x 299 km);
- Rascom QAF 1 (07063A, Mauritius, 313 km x 372 km);

4 КА не были захоронены должным образом:

- Thaicom 2 (94065B, Thailand, 192 km x 198 km);
- Galaxy 9 (96033A, USA, 178 km x 242 km);
- Insat 2E (99016A, India, 147 km x 205 km);
- Yamal-100 No.2 (99047B, Russia, 71 km x 95 km);

4 КА были оставлены на либрационных орбитах:

- Turksat 3;
- Cosmos-2240;
- Beidou DW2 (Compass G2);
- Galaxy 15.

Следует отметить, что космические аппараты производства ОАО «ИСС» успешно уводились с 1987 по 1993 гг., еще до образования межагентского координационного комитета по предупреждению образования космического мусора (табл. 2).

Для оценки возможности выполнения требований межагентского координационного комитета по предупреждению образования космического мусора по уводу космических аппаратов с геостационарной орбиты были проанализированы запасы рабочего тела на космических аппаратах производства ОАО «ИСС», находящихся на ГСО (табл. 3).

У двух спутников запасы топлива на увод не предусмотрены. Два спутника находятся за гарантийным сроком, но запасы на увод имеются. У остальных спутников запасы на увод предусмотрены [3].

Таблица 1

Результаты увода КА с орбиты с 1999 по 2011 гг.

	`99	`00	`01	`02	`03	`04	`05	`06	`07	`08	`09	`10	`11	Итого
Оставлены на L1	5	3	5	1	–	2	1	2	1	2	3	4	1	26
Оставлены на L2	1	1	2	1	1	1	1	1	–	1	–	–	–	10
Оставлены на L1/L2	–	2	–	–	–	–	1	–	–	1	–	–	–	4
Орбита дрейфа не соответствует требованиям	4	2	6	5	7	5	5	7	1	1	6	4	2	51
Орбита дрейфа соответствует требованиям	5	3	2	4	8	5	9	9	11	6	12	11	13	89
Итого	15	11	15	11	16	13	19	19	13	11	21	19	16	180

Таблица 2

Результаты увода космических аппаратов производства ОАО «ИСС»

Дата увода	Межд. номер	Спутник	Высота над ГСО после увода, км
13.03.87	1984-090-A	Экран	1100 км
20.08.87	1983-088-A	Радуга	600 км
06.11.87	1985-107-A	Радуга	1400 км
20.01.88	1986-038-A	Экран	900 км
26.11.88	1984-063-A	Радуга	1200 км
23.01.89	1982-113-A	Радуга	800 км
22.12.90	1988-036-A	Экран	1200км
01.12.91	1986-007-A	Радуга	400 км
12.12.91	1987-028-A	Радуга	1300 км
23.06.92	1991-046-A	Горизонт	900км
25.06.92	1987-040-A	Горизонт	1400км
23.12.92	1984-090-A	Экран	1200 км
21.09.93	1986-082-A	Радуга	1200 км

Таблица 3

Анализ выполнения требований МККМ по уводу с ГСО

	Название	Международный номер	Дата запуска
Спутники 1- 2 за гарантийным сроком. Запасы р.т. на увод не предусмотрены			
1	COSMOS 2371	00036A	05.07.2000
2	RADUGA 1-8	09010A	2009
Спутники 3-4 за гарантийным сроком. Запасы р.т. на увод есть			
3	EXPRESS-2A	00013A	12.03.2000
4	EXPRESS-4A	02029A	12.06.2002
Запасы р.т. на увод предусмотрены			
5	EXPRESS-AM1	04015A	30.10.2004
6	EXPRESS-AM2	05010A	30.03.2005
7	EXPRESS-AM3	05023A	24.06.2005
8	EXPRESS-AM22	03060A	29.12.2003
9	RADUGA 1M-1	07058A	08.12.2007
10	EXPRESS-AM33	08003A	28.01.2008
11	EXPRESS-AM44	09007A	11.02.2009
12	RADUGA 1M-2	10002A	28.02.2010
13	COSMOS 2473	2011-048A	20.09.2011
14	AMOS-5	2011-074-A	11.12.2011
15	LUCH-5A	2011-074-B	11.12.2011

Пример увода космического аппарата с геостационарной орбиты. Примером успешного увода КА с ГСО может служить увод КА Экспресс-А3, осуществленный в июне – августе 2009 г. В процессе эксплуатации КА находился в точке 11º з. д. на западной границе зоны видимости российских станций слежения. При применении схемы прямого увода КА с орбиты на необходимую высоту, КА оказывался вне зоны видимости российских станций слежения уже во время проведения маневра увода, что не позволяло провести завершающие операции со спутником.

Программа увода предполагала первоначальное понижение высоты орбиты и дрейф в восточном направлении с последующим поднятием высоты. При этом гарантировалось нахождение КА в течение необходимого времени после окончания маневра увода в ЗРВ ЦКС «Владимир».

Программа увода Экспресс-А3 (рис. 5). Проведение коррекции длительностью 24 часа с целью смещения КА на Восток со скоростью около 1 град/сутки.

1. Пассивный дрейф на Восток в течение 50 суток до долготы (36–38) град. в. д.

2. Проведение коррекции длительностью 144 часа с целью увода КА на высоту примерно (380–400) км над ГСО. Скорость смещения КА на Запад составила около 5 град/сутки.

3. Продолжительность пребывания КА в ЗРВ ЦКС «Владимир» составила 9–10 суток после окончания коррекции увода.

Результаты увода Экспресс-А3. Из рис. 6 видно как изменялась высота орбиты КА Экспресс-А3 относительно высоты геостационарной орбиты в процессе маневра.

На рис. 7 приведен прогноз изменения высоты апогея и перигея КА Экспресс-А3 относительно высоты ГСО до 2049 года.

Из рис. 7 видно, что высоты апогея и перигея превышают требуемую по международным нормам высоту увода спутника 250 км и составляют более 400 км.

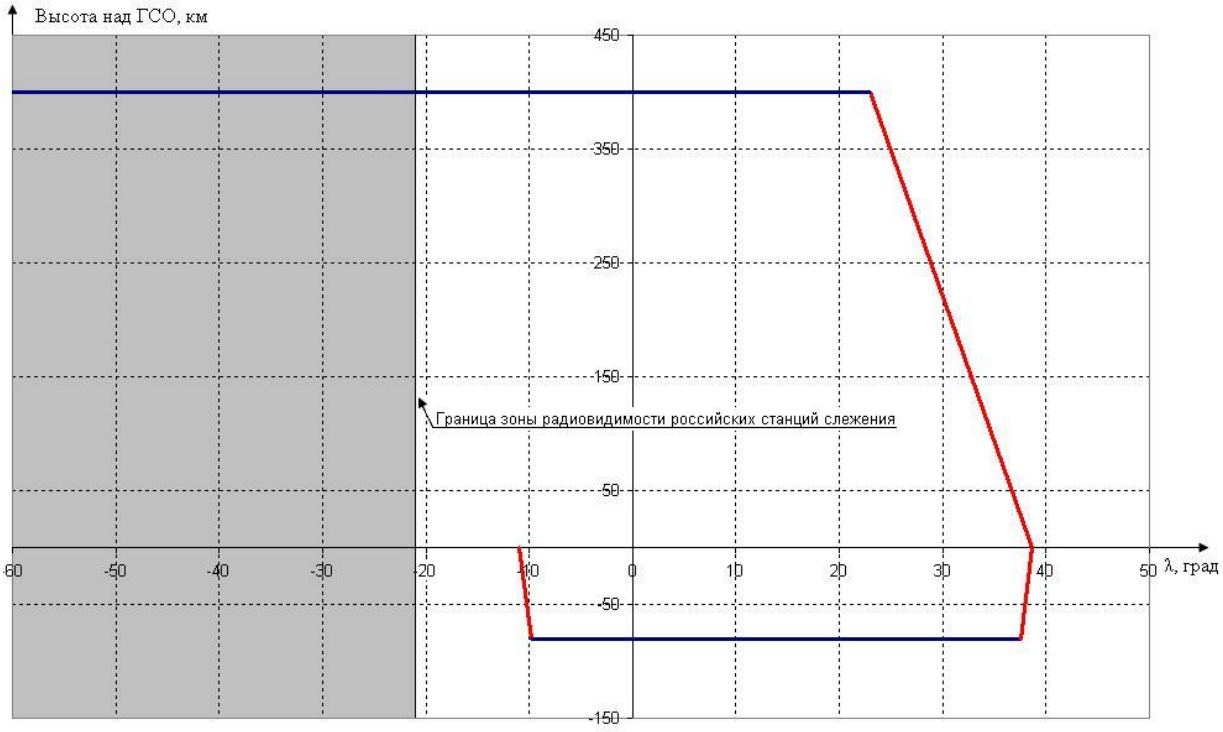

Рис. 5. Фактически реализованная схема увода КА Экспресс-А3

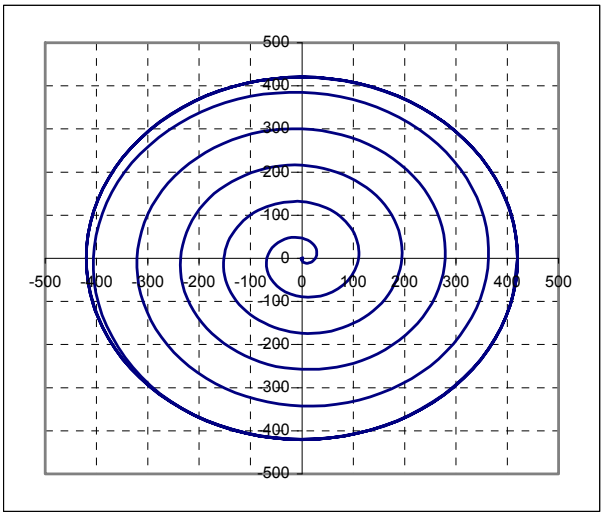

Рис. 6. Изменение высоты орбиты Экспресс-А3 относительно высоты геостационарной орбиты в процессе маневра увода

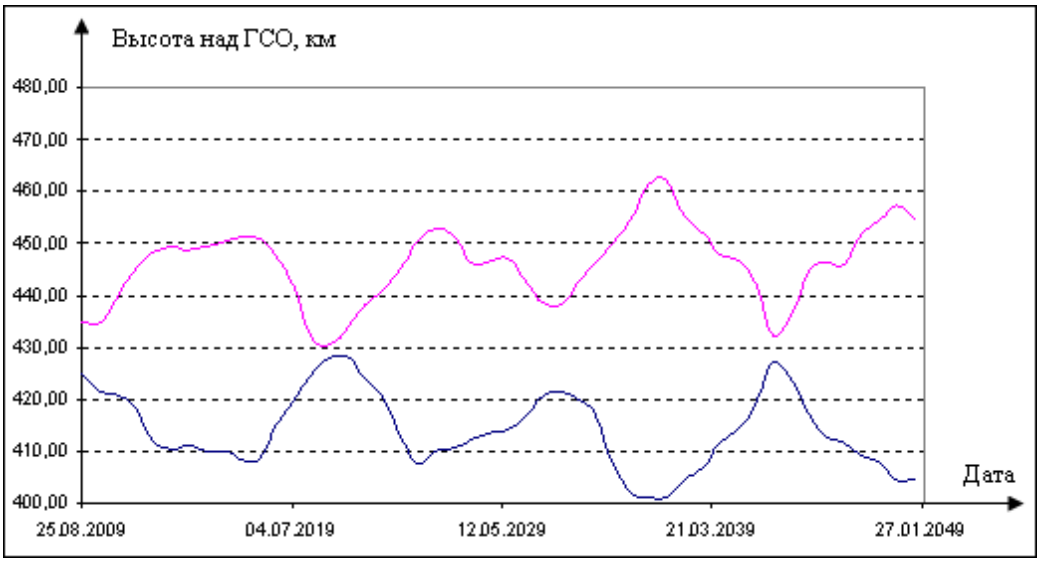

Рис. 7. Эволюция превышения над ГСО высоты перигея и апогея КА Экспресс-А3 после увода

Выводы.

1. Проведенный анализ показал, что минимизация эксцентриситета на момент окончания активного функционирования наиболее простой и эффективный путь для предотвращения столкновений в области средневысотных орбит.

2. Для гарантированной безопасности действующей орбитальной группировки системы ГЛОНАСС, высота орбиты «захоронения» должна отличаться от номинальной не менее, чем на 450 км при эксцентриситете не более 0,0004.

3. С 1999 по 2011 гг. практически половина спутников была уведена на орбиту, соответствующую требованиям «Руководящих принципов МККМ по предупреждению образования космического мусора». С каждым годом процент выведенных на безопасную орбиту «захоронения» космических объектов увеличивается.

4. На примере увода КА Экспресс-А3 продемонстрирована возможность увода на орбиту «захоронения» с ГСО отечественных КА, находящихся на западной границе зоны видимости российских станций слежения.

Библиографические ссылки

1. Проблема техногенного засорения космического пространства и основные направления ее решения / В. А. Бартенев, Ю. Л. Булынин, Д. Д. Гречкосеева, Д. Н. Утьманов // Системный анализ, управление и навигация : тез. докл. 10 междунар. науч. конф. М. : Изд-во МАИ, 2005. С. 110–111.

2. Measures undertaken by the Russian federation for mitigating artificial space debris pollution / V. Davidov, S. Kulik, M. Mikhailov et al. // Proceedings of the 4th European Conference on Space Debris, 18–20 April 2005, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany. P. 53–58.

3. Булынин Ю. Л., Гречкосеев А. К. Исследование проблемы коллокации спутников на геостационарной орбите решения // Системный анализ, управление и навигация : тез. докл. 16 междунар. науч. конф. М. : Изд-во МАИ, 2011. С. 70–71.

References

1. Bartenev V. A., Bulynin Yu. L., Grechkoseeva D. D., Utmanov D. N. *10 mezhdunar. nauch. konf. "Sistemnii analiz, upravlenie i navigaciya*" (Theses. Reports. 10 int. Scientific. Conf. "System analysis, management and navigation"). Moscow, Izdatelstvo MAI, 2005, p. 110–111.

2. Davidov V., Kulik S., Mikhailov M., Chekalin S., Yakovlev M., Bulinin Yu. Measures undertaken by the Russian federation for mitigating artificial space debris pollution. Proceedings of the 4th European Conference on Space Debris, 18–20 April 2005, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany, p. 53–58.

3. Bulynin Yu. L., Grechkoseev A. K. *16 mezhdunar. Nauch. Konf. "Sistemnii analiz, upravlenie i navigaciya*" (Theses. Reports. 16 int. Scientific. Conf. "System analysis, management and navigation"). Moscow, Izdatelstvo MAI, 2011, p. 70–71.

© Булынин Ю. Л., Созонова И. Л., 2013