

Е.П. МИНАКОВ, Б.В. СОКОЛОВ
**ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗМЕЩЕНИЯ И
ВАРИАНТОВ ПРИМЕНЕНИЯ МОНОБЛОЧНЫХ
СТАЦИОНАРНЫХ НАЗЕМНЫХ СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ
АСТЕРОИДОВ**

Минаков Е.П., Соколов Б.В. Исследования характеристик размещения и вариантов применения моноблочных стационарных наземных средств поражения астероидов.

Аннотация. Представлены математические модели и результаты исследования характеристик трех вариантов размещения стартовых комплексов моноблочных стационарных наземных средств поражения астероидов, отличающихся друг от друга геоцентрическими координатами точек стояния, их количеством, а также вероятностями поражения астероидов для трех способов применения указанных средств: поражение астероидов на нисходящих участках траекторий движения специальных головных частей, их поражение на восходящих или нисходящих участках траекторий, при варьировании азимутов пусков рассматриваемых средств.

Ключевые слова: средство наземного базирования для поражения астероидов, специальная головная часть, область воздействия, характеристики размещения стартовых комплексов, способ поражения астероидов.

1. Введение. Падение на Землю астероидов типа Апофиса и таких метеоритов, как Тунгусский или Челябинский, ставят под угрозу существование человечества. В России и за рубежом предложено множество способов защиты Земли от астероидов, в числе которых [1-6] их контактное разрушение или отклонение их с орбит соударения с Землей, а также дистанционное воздействие на них в тех же целях. Работы в этом направлении ведутся в Государственном ракетном центре имени академика Макеева совместно с Уральским и Сибирским филиалами Российской академии наук, научно-производственном объединении имени С. А. Лавочкина, научно-исследовательском центре имени Г.Н. Бабакина, научно-производственном объединении «Молния» и в ряде других организаций [7-8]. Проведенные исследования показали, что один из способов устранения астероидной угрозы — поражение астероидов путем подрыва зарядов, доставляемых ракетами-перехватчиками [8, 9]. Считается, что в качестве указанных средств поражения могут выступать межконтинентальные баллистические ракеты, в частности тяжелая двухступенчатая жидкостная ампулированная межконтинентальная баллистическая ракета SS-18 Mod.1,2,3 Satan (по классификации НАТО), оснащенная ядерной головной частью и запускаемая из шахт.

Перечисленные обстоятельства актуализируют проблематику технико-экономического обоснования возможности практического применения тех или иных способов применения наземных средств

поражения астероидов (СПА), к которым, помимо указанных, могут быть отнесены существующие и специально разработанные ракеты космического назначения (РКН), а также межконтинентальные баллистические ракеты, оснащенные специальными головными частями (СГЧ) [6-10]. Общими достоинствами указанных средств являются удобство их развертывания и эксплуатации, всегда высокая степень готовности и контроля их состояния, а также многочисленность этих средств. Основным их недостатком является возможность уничтожения астероидов только в непосредственной близости от Земли на расстоянии менее 2000 км, в результате чего могут возникнуть последствия двух типов: неконтролируемое падение частей астероида на поверхность Земли и радиационное заражение, «повреждение» озонового слоя атмосферы в случае применения ядерных СГЧ.

В тоже время падение на Землю челябинского метеорита выявило проблему, заключающуюся в практической непредсказуемости времени и траектории движения астероидов и метеоритов [11-16]. При этом сложной технической задачей является попадание СГЧ в астероид с максимальным линейным размером («диаметром»), летящим со скоростью более 12 км/с, когда «догнать» его не представляется возможным. Следовательно, воздействие на астероид должно происходить либо на «встречных курсах», что очень трудно обеспечить, либо в так называемых узловых точках (УТ) при очень высоких относительных скоростях движения и практически мгновенно [17-18].

Указанная проблема может быть решена созданием эффективно функционирующей системы контроля за астероидами и метеоритами, с одной стороны, а с другой стороны — расположением на поверхности Земли ракет-перехватчиков таким образом и в таком количестве, чтобы поразить любой движущийся к Земле объект за минимально возможное время при минимальной информации о параметрах его движения, то есть созданием наземного эшелона глобальной защиты Земли от астероидов и метеоритов. Очевидно, что система поражения астероидов НБ должна включать в себя совокупность стартовых комплексов (СК) наземного базирования (НБ) с готовыми к применению СПА, размещенными на поверхности Земли таким образом, чтобы зоны воздействия СГЧ полностью перекрывали заданный рубеж поражения астероидов (РПА). Важнейшими в настоящее время являются оценки характеристик размещения СК и применения СПА: их числа и положения на поверхности Земли, а также вероятностей поражения астероидов и метеоритов,

базирующиеся на строгих математических моделях, рассмотрению которых посвящена предлагаемая статья.

2. Модели и результаты оценивания характеристик размещения однотипных стационарных моноблочных СПА НБ. Приведенные в статье математические модели получены в предположении, что (рисунок 1):

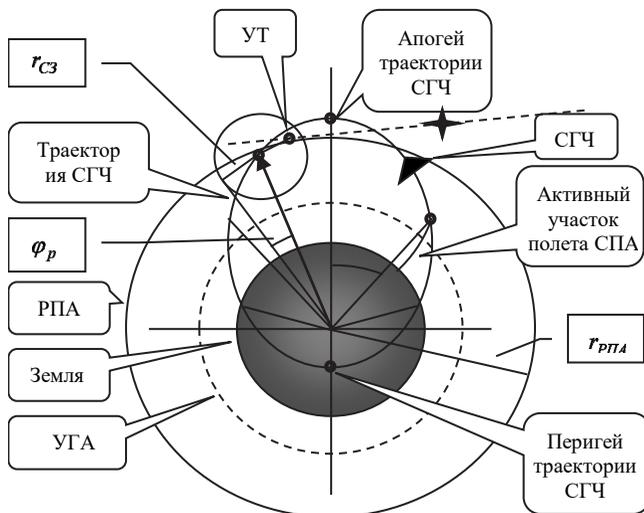


Рис. 1. Кинематические элементы применения СПА НБ (вид в плоскости движения СГЧ)

1) моделью поверхности Земли является сфера радиуса $R_3 = 6371 \text{ км}$;

2) РПА представляет собой сферу заданного радиуса — $r_{РПА}$ с центром, совпадающим с центром Земли;

3) все СПА обладают одинаковыми техническими характеристиками, имеют стационарное НБ и одно СПА доставляет на РПА только одну СГЧ;

4) зона воздействия СГЧ по астероиду имеет форму шара радиуса — $r_{СЗ}$;

5) параметры траекторий всех СПА (СГЧ) одинаковы и не зависят от азимута пуска СПА;

6) движение СГЧ описывается кеплеровской теорией, аппроксимируется эллипсом и происходит по возвратным траекториям;

7) движение астероидов аппроксимируется отрезками прямых линий;

8) воздействие на астероиды осуществляется выше условной границы атмосферы (УГА);

9) на относительную скорость движения СГЧ и астероида в момент воздействия на него СГЧ ограничений не наложено;

10) точность выведения СГЧ в УТ обеспечивается радиусом воздействия СГЧ.

Угловой размер области воздействия СГЧ на РПА определяется по формуле (рисунок 1):

$$\phi_p = \arcsin(r_{C3} / r_{РПА}). \quad (1)$$

Угловое расстояние между точками задеирования СГЧ в одной плоскости при создании полосы сплошного воздействия по астероидам на РПА определяется углом β_p (рисунок 2) по правилу Непера [14]:

$$\cos \beta_p = \cos \varphi_p / \cos \alpha_p. \quad (2)$$

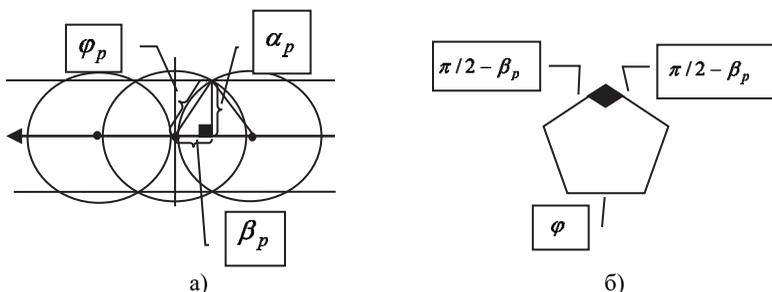


Рис. 2. Связь между угловыми величинами области сплошного воздействия:
 а) угловые величины в плоскости движения СГЧ; б) пятиугольник Непера для определения углов β_p и α_p

Число СПА НБ, обеспечивающих одну плоскость сплошного воздействия (рисунок 3, а), определяется зависимостью:

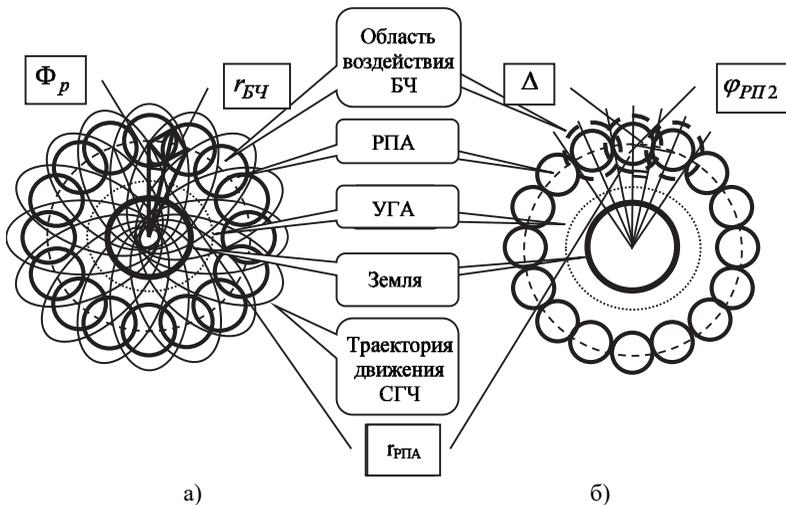


Рис. 3. Схема расположения траекторий движения и областей воздействия БЧ: а) в плоскости РПА; б) в плоскости экватора Земли

$$N_n = E[\pi / \beta_p] + 1. \quad (3)$$

Уточненное угловое расстояние между точками задействия СГЧ в одной плоскости определяется по формуле:

$$\beta_p^* = \pi / N_n. \quad (4)$$

Угловой размер ширины полосы сплошного воздействия СГЧ в одной плоскости — α_p может быть вычислен по формуле:

$$\cos \alpha_p^* = \cos \varphi_p / \cos \beta_p^*. \quad (5)$$

Вероятность поражения астероида в случае независимого применения СПА НБ в каждой плоскости принимает значения [3]:

$$P_1 = \begin{cases} p, & \text{когда области поражения СГЧ не пересекаются,} \\ 1 - (1 - p)^2, & \text{когда области поражения СГЧ пересекаются,} \end{cases} \quad (6)$$

где p — вероятность успешного выполнения цикла подготовки и применения СПА НБ, включающая в себя вероятность точного предсказания времени пересечения РПА астероидом.

Число плоскостей сплошного воздействия СГЧ вычисляется в соответствии с зависимостью (рисунок 3.б):

$$M_n = E[\pi / \alpha_p^*] + 1. \quad (7)$$

Потребное число СПА НБ (СК), обеспечивающих сплошную область воздействия по астероидам, может быть вычислено по формуле:

$$Q = N_n M_n. \quad (8)$$

Для обеспечения сплошной области воздействия СК должны располагаться в одной из плоскостей, проходящих через центр Земли, а пуски СПА НБ — осуществляться с соответствующими азимутами.

3. Исследования вариантов размещения одностипных стационарных моноблочных СПА НБ. Возможны различные варианты размещения СК СПА НБ:

- 1) в плоскостях, проходящих через ось мира — SS^1 (рисунок 4);
- 2) с любой требуемой ориентацией линии пересечения плоскостей размещения СК СПА НБ;
- 3) с заданным расположением СК в соседних плоскостях;
- 4) с произвольным расположением СК в соседних плоскостях.

В первом варианте одним из способов применения СПА НБ является их пуск с одинаковыми азимутами, равными 0^0 . При этом разность между широтами двух соседних СПА НБ определяется зависимостью:

$$\Delta\Psi = \Psi_i - \Psi_{i-1} = 2\beta_p^* = const, \quad (9)$$

а между долготами плоскостей:

$$\Delta\lambda = \lambda_i - \lambda_{i-1} = 2\alpha_p^* = const. \quad (10)$$

Эффективность поражения астероида оценивается по вероятности — P воздействия, которая в случае независимости применения [15] СПА, может быть оценена зависимостью (рисунок 5):

$$P = \begin{cases} P_1, & \text{для областей однократного воздействия} \\ 1 - (1 - P_1)^2, & \text{для областей двухкратного воздействия} \\ 1 - (1 - P_1)^3, & \text{для областей трехкратного воздействия} \\ 1 - (1 - P_1)^{M_n}, & \text{для областей } M_n \text{-кратного воздействия} \end{cases}. \quad (11)$$

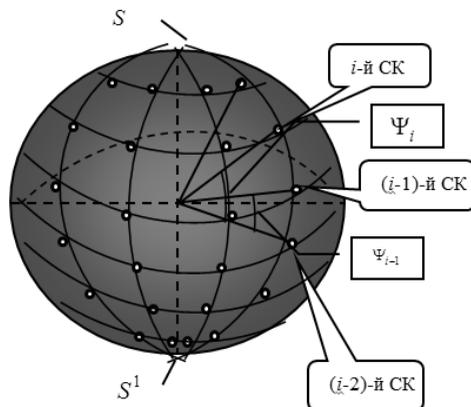


Рис. 4. Размещение СК в плоскостях, проходящих через ось мира

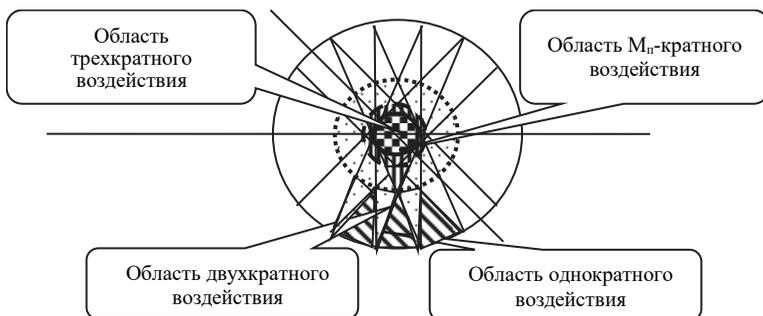


Рис. 5. Схема пересечения полос воздействия СГЧ (вид на плоскость экватора)

Для оценивания Q для рассмотренной возможной схемы расположения СК были приняты исходные данные: $p = 0,8$; $r_{CЗ} = 5, 10, 15$ км; $H_{РПА} = 200, 400, 500$ км. Результаты моделирования характеристик размещения СПА для каждого варианта исходных данных представлены в таблицах 1-3.

Таблица 1. Результаты оценивания величин N_n , M_n , Q , p_{\min} , p_{\max} , $\Delta\Psi$, $\Delta\lambda$ для $p = 0,8$; $H_{РПА} = 200$ км

$r_{CЗ}$, км	N_n	M_n	Q	p_{\min}	p_{\max}	$\Delta\Psi$, град	$\Delta\lambda$, град
5	6081	5625	34205625	0,8	1	0,0592105	0,0640083
10	3041	2813	8554333	0,8	1	0,1184211	0,1280168
15	1580	2808	4436640	0,8	1	0,2279924	0,1282427

Таблица 2. Результаты оценивания величин N_n , M_n , Q , p_{\min} , p_{\max} , $\Delta\Psi$, $\Delta\lambda$ для $p = 0,8$; $H_{РПА} = 400$ км

r_{C3} , км	N_n	M_n	Q	p_{\min}	p_{\max}	$\Delta\Psi$, град	$\Delta\lambda$, град
5	6505	5625	36590625	0,8	1	0,0553506	0,0640059
10	3253	2813	9150689	0,8	1	0,1107011	0,1280119
15	1644	2809	4617996	0,8	1	0,2191114	0,1281962

Таблица 3. Результаты оценивания величин N_n , M_n , Q , p_{\min} , p_{\max} , $\Delta\Psi$, $\Delta\lambda$ для $p = 0,8$; $H_{РПА} = 600$ км

r_{C3} , км	N_n	M_n	Q	p_{\min}	p_{\max}	$\Delta\Psi$, град	$\Delta\lambda$, град
5	6982	5625	39273750	0,8	1	0,0515685	0,0640012
10	3492	2813	9822996	0,8	1	0,1031223	0,1280143
15	1710	2809	4803390	0,8	1	0,2106495	0,1281642

Полученные результаты сведены в гистограммы зависимостей Q от r_{C3} (рисунок 6).

Основным достоинством этого способа размещения СК и применения СПА НБ является необходимость знания только времени и ориентировочного места пересечения астероидом РПА, что позволяет гибко, оперативно и с высокой вероятностью их уничтожить. В то же время из полученных данных видно, что число СК с моноблочными СГЧ чрезвычайно велико. По ним можно оценить расстояние между СК по широте — ΔL_u и по долготе — ΔL_δ :

$$\Delta L_u = \Delta\Psi R_3; \Delta L_\delta = \Delta\lambda R_3. \quad (12)$$

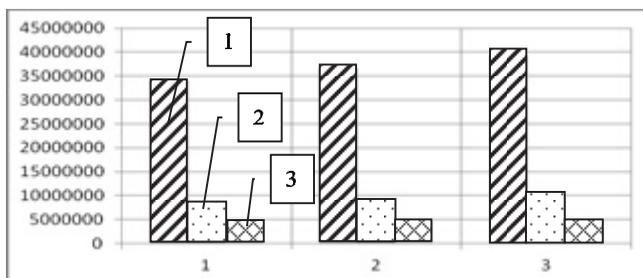


Рис. 6. Гистограммы зависимостей Q от r_{C3} (для каждого варианта исходных данных: $H_{РПА} = 200$ км (1), $H_{РПА} = 400$ км (2), $H_{РПА} = 600$ км (3))

Соответствующие гистограммы представлены на рисунке 7.

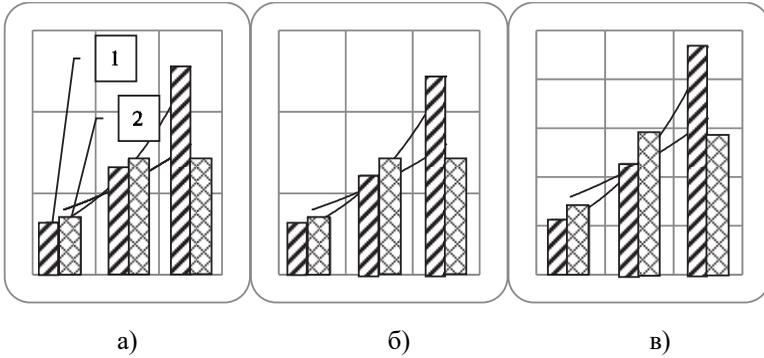


Рис. 7. Гистограммы зависимостей ΔL_u (1) и ΔL_0 (2) от r_{C3}
 а) $H_{РПА} = 200$ км ; б) $H_{РПА} = 400$ км ; в) $H_{РПА} = 500$ км

На рисунке 7 цифра 1 соответствует ΔL_u , цифра 2 — ΔL_0 .

Величина Q может быть уменьшена за счет сокращения числа СК, для СПА которых полосы сплошного воздействия взаимно перекрываются в приполярных областях. Для этого в $M_n - 1$ плоскости воздействия СГЧ число СК может быть сокращено до величины:

$$N_{n1} = E[(\pi - 2\alpha_p^*) / \beta_p] + 1. \quad (13)$$

Общее число СК определяется тогда зависимостью:

$$Q_1 = N_n + (M_n - 1)N_{n1}, \quad (14)$$

что обеспечивает вероятность:

$$p_{\min} = p \leq P \leq p_{\max} = P_1. \quad (15)$$

Технически реализуем вариант поражения астероидов на РПА как на нисходящих, так и на восходящих участках траекторий движения СГЧ [1, 4], что также приводит к сокращению числа СК в одной плоскости до величины, определяемой зависимостью:

$$N_{n2} = E[\pi / (2\beta_p^*)] + 1. \quad (16)$$

В этом случае выражение аналогичное (3) примет вид

$$N_{n3} = E[(\pi - 2\alpha_p^*) / (2\beta_p)] + 1. \quad (17)$$

Общее число СК — Q_2 определяется тогда определяется по (14) при $N_n := N_{n2}$, $N_{n1} := N_{n3}$, а вероятность поражения астероида рассчитывается по формуле (15).

Результаты оценивания величин N_{n1} , Q_1 , N_{n2} , N_{n3} и Q_2 приведены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты оценивания величин N_{n1} , Q_1 , N_{n2} , N_{n3} и Q_2

r_{C3} , км	$H_{РПА}$, км	N_{n1}	Q_1	W_1	N_{n2}	N_{n3}	Q_2	W_2
5	200	3038	8545897	100,00	1521	1519	4272949	49,99
10	200	1578	4431026	48,20	790	789	2215513	50,00
15	200	1518	2135829	77,33	761	759	1067915	49,99
5	400	3250	9142253	100,00	1627	1625	4571127	49,99
10	400	1642	4612380	49,59	822	821	2306190	50,00
15	400	1624	2284971	100,00	814	812	1142486	49,99
5	600	3489	9814560	100,00	1746	1745	4908686	49,98
10	600	1708	4797774	51,15	855	854	2398887	50,00
15	600	1744	2452067	100,00	874	872	1226034	49,99

В этой же таблице приведены показатели сокращения числа СК $W_1 = (Q - Q_1)/Q$ и $W_2 = (Q_1 - Q_2)/Q_1$, выраженные в процентах. Предлагаемые последние два способа обеспечивают вероятность поражения астероида либо 0,8, либо 0,98.

Как видно из полученных данных, обладая практически теми же достоинствами, что и первый способ размещения СПА НБ, способ исключения СК для поражения астероидов в приполярных областях и на восходящих и нисходящих участках траекторий движения СГЧ позволяют существенно понизить их число, которое, однако, остается неприемлемо большим.

Технически реализуем способ поражения астероидов на РПА как на нисходящих, так и на восходящих участках траекторий движения СГЧ при азимутах пуска СПА, равных либо 0^0 , либо 180^0 , что приводит к сокращению числа СК в одной плоскости до величины, определяемой зависимостью:

$$N_{n4} = E[\pi / (4\beta_p^*)] + 1. \quad (18)$$

В этом случае выражение аналогичное (3) примет вид:

$$N_{n5} = E[(\pi - 2\alpha_p^*) / (4\beta_p)] + 1. \quad (19)$$

Общее число СК — Q_3 определяется тогда определяется по (14) при $N_n := N_{n4}$, $N_{n1} := N_{n5}$, а вероятность поражения астероида оценивается по (15).

Результаты оценивания величин N_{n4} , N_{n5} , Q_3 и W_3 приведены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты оценивания величин N_{n4} , N_{n5} , Q_3 , W_3 , M_{n4} , Q_4 и W_4

r_{C3} , км	$H_{РПА}$ км	N_{n4}	N_{n5}	Q_3	W_3	M_{n4}	Q_4	W_4
5	200	761	760	2137881	49,96	704	535041	74,97
10	200	395	395	1109160	49,93	702	277290	75,00
15	200	381	380	534661	49,93	352	133761	74,98
5	400	814	813	2286970	49,96	704	572353	74,97
10	400	411	411	1154499	49,93	703	288933	74,97
15	400	407	406	571243	50,00	352	142913	74,98
5	600	873	873	2455749	49,97	704	614592	74,97
10	600	428	427	1199444	49,99	703	300182	74,97
15	600	437	436	613017	50,00	352	153473	74,96

Как видно из полученных данных, незначительное усложнение полетного задания СПА НБ дает положительные эффекты:

- 1) существенное сокращение (до приемлемых значений) числа СК;
- 2) повышение вероятности поражения астероидов за счет пусков СГЧ в одни и те же области РПА как при азимуте в 0^0 , так и с азимутом 180^0 и вычисляемой по формулам:

$$P_1 = \begin{cases} 1 - (1 - p)^2, & \text{когда области поражения СГЧ не пересекаются,} \\ 1 - (1 - p)^4, & \text{когда области поражения СГЧ пересекаются.} \end{cases} \quad (20)$$

Возможность сокращения СК заложена в варьировании азимутами пусков СПА, что, однако, приводит к усложнению подготовки соответствующих полетных заданий. Пусть существует возможность пусков СПА с любым азимутом в диапазоне от 0^0 до 360^0 (рисунок 8).

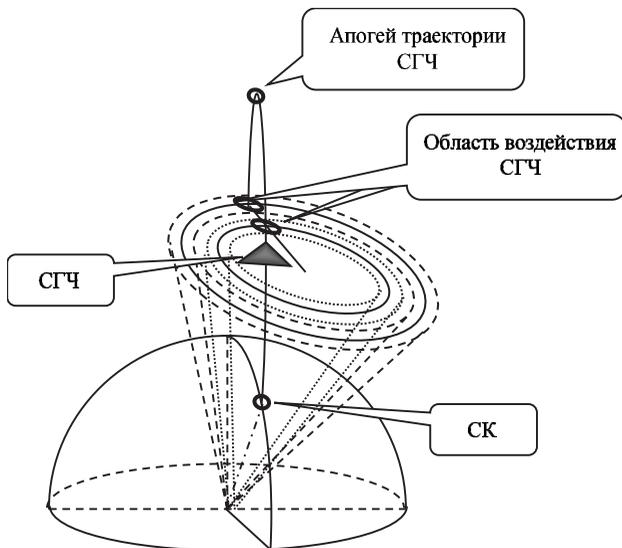


Рис. 8. Области воздействия СГЧ при любых азимутах пуска СПА

Это приводит к сокращению числа плоскостей размещения СК, которое в этом способе оценивается величиной

$$M_{n4} = E[\pi / (4\alpha_p^*)] + 1, \quad (21)$$

при тех же N_{n4} и N_{n5} и P_1 , что и в последнем способе.

4. Заключение. Одним из основных результатов проведенных исследований следует считать тот факт, что впервые на основе использования математических моделей получены корректные численные значения характеристик размещения и применения моноблочных СПА НБ. Приведенные в статье оценки демонстрируют практически равную единице вероятность защиты Земли от летящих к ней астероидов и метеоритов, с одной стороны, а с другой стороны — потребность в огромном числе (сотни тысяч единиц) СПА для обеспечения этого. В связи с этим уместно привести высказывание Г. Гегеля о том, что «самая серьезная потребность есть потребность познания истины», которая в рассматриваемом случае состоит в полученных оценках, характеризующих предельные количества моноблочных СПА НБ, исчерпывающих их потенциальные возможности в борьбе с астероидной опасностью. Знание этой истины указывает так же на необходимость поиска альтернативных средств и способов решения проблемы защиты Земли, базирующихся прежде

всего на эффективном информационном обеспечении применения СПА. Особую актуальность в этой связи приобретают разработка и исследование характеристик применения СПА НБ с разделяющимися головными частями, мобильных СПА НБ, комбинированной пространственно-распределенной системы поражения астероидов и метеоритов, компонентами которой являются подсистема орбитального базирования, а также располагаемые в точках либрации и на поверхности Луны стационарные и мобильные СПА, базирующиеся на фундаментальных и прикладных результатах, полученных отечественными учеными и инженерами в 80-е годы прошлого века в ответ на американскую программу «звездных войн» [6-8,12-16].

Отдельно следует подчеркнуть, что приведенные в статье модели и расчетные формулы (при их определенной доработке), а также полученные с их использованием результаты могут быть применены для исследования и оценивания сравнительных характеристик размещения и применения указанных СПА НБ различных типов.

Литература

1. *Соколов Л.Л. и др.* Траектории соударения астероида Апофис с Землей в XXI веке // Астрон. вестн. 2012. Т. 46. № 4. С. 311–320.
2. *Шустов Б.М., Рыжова Л.В.* О концепции комплексной программы «Создание российской системы противодействия космическим угрозам (2012-2020)» // Вестник Сиб. гос. аэрокосмического ун-та. Красноярск. 2011. Вып. 6(39). С.4–8.
3. Asteroid Impact Deflection Assessment AIDA study // ESA. 2015.
4. Asteroid deflection mission seeks smashing ideas // ESA. 2015.
5. *Пыжикова А.С., Фарафонтова Е.Л.* Проблема астероидно-кометной угрозы в рамках международного космического права // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2012. Т. 2. Вып. 8. С. 355–357.
6. *Владимиров В.А., Рыжова Л.В.* Угроза с неба (астероидно-кометная опасность) // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2014. Т. 4. Вып. 2. С. 591–602.
7. *Алексеев А.С., Величко И.И., Волков Ю.А., Ведерников Ю.А.* Ракетная концепция противометеоритной защиты Земли // Космическая защита Земли, Известия Челябинского научного центра, специальный выпуск. 1997. С. 55–77.
8. *Нечай В.З. и др.* Ядерный взрыв вблизи поверхности астероидов и комет // Космическая защита Земли, Известия Челябинского научного центра, специальный выпуск. 1997. С. 179–182.
9. *Бурков В.Д. и др.* Проблема противодействия астероидной опасности космическими средствами // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2011. Вып. 5. С. 157–169.
10. *Соколов Л.Л., Кутеева Г.А.* О характеристиках возможных соударений астероидов с Землей // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1. Математика. Механика. Астрономия. 2012. Вып. 4. С. 133–138.
11. *Park S.-Y., Ross I.M.* Two-Body Optimization for Deflecting Earth-Crossing Asteroids // Journal of Guidance, Control and Dynamics. 1999. vol. 22. no. 3. pp. 415–420.

12. *Hall C.D., Ross I.M.* Dynamics and Control Problems in the Deflection of Near-Earth Objects // *Advances in the Astronautical Sciences, Astrodynamics*. 1997. vol. 97. Part I. pp. 613–631.
13. *Ross I.M., Park S.-Y., Porter S.E.* Gravitational Effects of Earth in Optimizing Delta-V for Deflecting Earth-Crossing Asteroids // *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2001. vol.38. no. 5. pp. 759–764.
14. *Dwayne A.* Giant bombs on giant rockets: Project Icarus // *The Space Review*. 2004. vol. 5.
15. Сайт «Фактрум». URL: <http://www.factroom.ru/facts/13802> (дата обращения 11.09.2013).
16. *Dillow C.* How it Would Work: Destroying an Incoming Killer Asteroid With a Nuclear Blast // *Bonnier*. URL: <https://www.flightglobal.com/news/articles/nasa-plans-armageddon-spacecraft-to-blast-asteroid-215924> (дата обращения 26.09.2016).
17. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Высшая школа. 2000. 383 с.
18. *Аверкиев Н.Ф., Богачев С.А., Васьков С.А. и др.* Основы теории полета летательных аппаратов. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. 242 с.

Поддержка исследований. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00199).

Минаков Евгений Петрович — д-р техн. наук, профессор, профессор, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: системный анализ, баллистическое обеспечение полетов космических аппаратов, эффективность применения космических комплексов и систем. Число научных публикаций — 150. er.minakov12345@mail.ru; ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812)552-6341.

Соколов Борис Владимирович — д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, заместитель директора по научной работе, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Число научных публикаций — 450. sokol@iias.spb.su; 14-я линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7-812-328-3311.

E.P. MINAKOV, B.V. SOKOLOV
**INVESTIGATION OF ALLOCATION CHARACTERISTICS AND
DEPLOYMENT VARIANTS OF GROUND-BASED MISSILES FOR
ASTEROID DESTRUCTION**

Minakov E.P., Sokolov B.V. Investigation of Allocation Characteristics and Deployment Variants of Ground-Based Missiles for Asteroid Destruction.

Annotation. The paper presents mathematical models and investigation results of three variants of allocation of ground-based missiles for destroying asteroids. These missiles differ from each other by geocentric coordinates of control points, their amount and the probabilities of hitting the asteroid in three ways: hitting the asteroid on the descending parts of the trajectory of motion of special warheads; on ascending or descending parts of trajectories; at varying firing azimuths of the considered means.

Keywords: ground-based missiles for asteroid destruction, special warhead, impact area, allocation characteristics of missiles, way of hitting asteroids.

Minakov Evgeniy Petrovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, professor, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: system analysis, provision of ballistic spacecraft, effectiveness of space complexes and systems. The number of publications — 150. ep.minakov12345@mail.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812)552-6341.

Sokolov Boris Vladimirovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, Honored scientist of Russian Federation, deputy director for research, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: development of research fundamentals for the control theory by structural dynamics of complex organizational-technical systems. The number of publications — 450. sokol@iias.spb.su; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7-812-328-3311.

Acknowledgements. This research is supported by RSF (grant 16-19-00199).

References

1. Sokolov L.L., et al. [Trajectories of impact of an asteroid Apofis with Earth in the 21st century]. *Astronomical bulletin — Astronomicheskii vestnik*. 2012. vol. 46. no. 4. pp. 311–320.
2. Shustov B.M., Ryhlova L.V. [About the concept of the comprehensive program "Creation of the Russian system of counteraction to space threats (2012-2020)".] *Vestnik Sib. gos. ajerokosmicheskogo un-ta. Kasnojarsk — Bulletin of the Siberian state space university*. 2011. vol. 6(39). pp. 4–8.
3. Asteroid Impact Deflection Assessment AIDA study. ESA. 2015.
4. Asteroid deflection mission seeks smashing ideas. ESA. 2015.
5. Pyzhikova A.S., Farafontova E.L. [Problem of asteroid and cometary threat within the international space law]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki — Urgent problems of aircraft and astronautics*. 2012. vol. 2. no. 8. pp. 355–357.
6. Vladimirov V.A., Ryhlova L.V. [Threat from the sky (asteroid and cometary danger)]. *Strategija grazhdanskoj zashhity: problemy i issledovanija — Strategy of civil protection: problems and researches*. 2014. vol. 4. no. 2. pp. 591–602.
7. Alekseev A.C., Velichko I.I., Volkov Y.A., Vedernikov Y.A. [Rocket concept of antimeteoritic protection of Earth]. *Kosmicheskaja zashhita Zemli, Izvestija*

- Cheljabinskogo nauchnogo centra, special'nyj vypusk – Space protection of Earth, News of the Chelyabinsk scientific center, special release.* 1997. pp. 55–77.
8. Nechay V.Z., et al. [Nuclear explosion near a surface of asteroids and comets]. *Kosmicheskaja zashhita Zemli, Izvestija Cheljabinskogo nauchnogo centra, special'nyj vypusk – Space protection of Earth, News of the Chelyabinsk scientific center, special release.* 1997. pp. 179–182.
 9. Burkov V.D., et al. [Problem of counteraction of asteroid danger space means]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo univ'er-siteta lesa – Lesnoj vestnik – Bulletin of Moscow State University of the wood – Wood bulletin.* 2011. vol. 5. pp. 157–169.
 10. Sokolov L.L., Kuteeva G.A. [About characteristics of possible impacts of asteroids with Earth]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Serija 1. Matematika. Mehanika. Astronomija – Bulletin of the St. Petersburg university. Series 1. Mathematics. Mechanics. Astronomy.* 2012. vol. 4. pp. 133–138.
 11. Park S.-Y., Ross I.M. Two-Body Optimization for Deflecting Earth-Crossing Asteroids. *Journal of Guidance, Control and Dynamics.* 1999. vol. 22. no. 3. pp. 415–420.
 12. Hall C.D., Ross I.M. Dynamics and Control Problems in the Deflection of Near-Earth Objects. *Advances in the Astronautical Sciences, Astrodynamics.* 1997. vol. 97. Part I. pp. 613–631.
 13. Ross I.M., Park S.-Y., Porter S.E. Gravitational Effects of Earth in Optimizing Delta-V for Deflecting Earth-Crossing Asteroids. *Journal of Spacecraft and Rockets.* 2001. vol. 38. no. 5. pp. 759–764.
 14. Dwayne A. Giant bombs on giant rockets: Project Icarus. *The Space Review.* 2004. vol. 5.
 15. Sajt «Faktrum» [Factrum]. Available at: <http://www.factroom.ru/facts/13802> (accessed 11.09.2013).
 16. Dillow C. How it Would Work: Destroying an Incoming Killer Asteroid With a Nuclear Blast. *Bonnier* (9 April 2012). Available at: <https://www.flightglobal.com/news/articles/nasa-plans-armageddon-spacecraft-to-blast-asteroid-215924> (accessed 26.09.2016).
 17. Ventcel' E.S., Ovcharov L.A. *Teorija sluchajnyh processov i ee inzhenernye prilozhenija* [Theory of casual processes and its engineering applications]. M.: Vysshaja shkola, 2000. 383 p.
 18. Averkiev N.F., Bogachev S.A., Vas'kov S.A. et al. *Osnovy teorii poleta letatel'nyh apparatov* [Bases of the aircraft flight theory]. SPb.: VKA imeni A.F. Mozhajskogo, 2013. 242 p.