

Научная статья
УДК 519.87
DOI: [10.34759/trd-2022-126-24](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-24)

АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ КОЛИЧЕСТВА ЛУННЫХ СРЕДСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ ОСЕЙ ВИЗИРОВАНИЯ

Евгений Петрович Минаков¹, Максим Андреевич Александров^{2✉},
Андрей Владимирович Вербин³

^{1,2,3}Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского,
Санкт-Петербург, Россия

²vka@mil.ru✉

Аннотация. Ввиду особенностей орбитального движения астероидов, сближающихся с Землёй, значительная доля их либо в принципе не может быть обнаружена с помощью средств мониторинга, находящихся на поверхности Земли, либо обнаружение может произойти слишком поздно. Отсутствие влияния атмосферы на средства оптического наблюдения обуславливает преимущества расположения средств обнаружения астероидов на поверхности Луны. В данной статье проводится исследование по одному из возможных способов их стационарного расположения – равномерному распределению с касающимися зонами видимости. Предложен алгоритм, позволяющий на основе исходных данных об угле раствора и

предельной дальности обнаружения опасных космических объектов лунными средствами оценить их потребное количество.

Ключевые слова: Луна, астероид, средство обнаружения астероида, зона обзора, зона обнаружения, рубеж обнаружения астероидов, сферический треугольник

Для цитирования: Минаков Е.П., Александров М.А., Вербин А.В. Алгоритмы оценивания количества лунных средств обнаружения астероидов с вертикальной ориентацией осей визирования // Труды МАИ. 2022. № 126. DOI: [10.34759/trd-2022-126-24](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-24)

Original article

ALGORITHMS FOR ESTIMATING THE NUMBER OF LUNAR ASTEROID DETECTION TOOLS WITH A VERTICAL ORIENTATION OF THE SIGHT AXES

Evgeniy P. Minakov¹, Maksim A. Aleksandrov²✉, Andrej V. Verbin³

^{1,2,3}Military Space Academy named after A.F.Mozhaisky,

Saint Petersburg, Russia

²vka@mil.ru✉

Abstract. Due to the peculiarities of the orbital movement of asteroids approaching the Earth, a significant proportion of them either in principle cannot be detected using existing monitoring tools located on the surface of the Earth, or detection can occur too late. The lack of influence of the atmosphere on optical observation means leads to the advantages of the location of asteroid detection means in space. In this article, a study is carried out on one

of the possible ways of their stationary location - uniform distribution with regard to visibility zones on the surface of the moon.

An algorithm is proposed, which allows on the basis of initial data on the angle of solution and the maximum range of detection of dangerous space objects by lunar means. The zone of near and long-range explosive detection, as well as the zone of continuous multiple detection of asteroids, their description and illustrations are given. Computational experiments were carried out using the developed algorithm for estimating the number of means for detecting asteroids when placing on the entire surface of the Moon or its part, dependencies of the angular distance between the standing points and the angular dimensions of the visibility zones of the means for detecting asteroids on the maximum range of detecting asteroids were obtained.

In addition, an algorithm was developed and the number of means for detecting asteroids with vertical orientation of the sighting axes was estimated with the exception of a part of the Lunar Surface for their placement, due to the closure of the outer space region by the Earth ("dead zone" of asteroid detection means), when placed on the entire surface of the Moon or its part, the dependence of the angular distance between the standing points and the angular dimensions of the visibility zones of the asteroid detection means on the maximum detection range of asteroids is also obtained.

The presented algorithms for estimating the angular distance between the points of standing on the surface of the Moon of the same type of asteroid detection means with vertical orientation of the sighting axes and their number for forming the asteroid detection line allow obtaining correct results and can be used for further research to determine the

parameters of the asteroid detection line zones, reduce the number of asteroid detection means and estimate the probability of asteroid detection.

Keywords: Moon, asteroid, asteroid detection means, scan zone, detection zone, asteroid detection boundary, spherical triangle

For citation: Minakov E.P., Aleksandrov M.A., Verbin A.V. Algorithms for estimating the number of lunar asteroid detection tools with a vertical orientation of the sight axes. *Trudy MAI*, 2022, no. 126. DOI: [10.34759/trd-2022-126-24](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-24)

Введение

В концепции создания системы информационно-аналитического обеспечения безопасности космической деятельности в околоземном космическом пространстве «Млечный путь» подчеркнута актуальность проблемы астероидно-кометной опасности. По современным оценкам в Солнечной системе находится не менее 16000 потенциально опасных космических объектов естественного происхождения размером более 140 м и не менее 200000 таких объектов размером более 50 м. Существует вероятность столкновения этих объектов с Землёй, в случае которого произойдёт катастрофа от регионального до планетарного масштаба.

Поиск и оценивание перспектив использования Луны для определения возможности оперативного обнаружения астероидов благодаря наблюдениям в более широком диапазоне длин волн и исключения искажений вследствие отсутствия земной атмосферы, уже в настоящее время делает актуальным разработку математических моделей и построенных на их основе алгоритмов определения углового расстояния между точками стояния на поверхности Луны однотипных

средств обнаружения астероидов (СОА) с вертикальной ориентацией осей визирования касающихся зон видимости (ЗВ) и их количества для формирования рубежа обнаружения астероидов (РОА) [1–13]. СОА в настоящее время являются телескопы, ЗВ которых могут аппроксимироваться шаровыми сегментами [14–17]. При этом в качестве основного способа размещения СОА на поверхности Луны или на ее части целесообразно исследовать их равномерное распределение для формирования РОА, под которым понимается область космического пространства (КП), образуемая ЗВ СОА на заданном интервале времени, т.е. пространственно-временная область, простирающаяся от поверхности Луны до максимальной высоты обнаружения астероидов соответствующими средствами.

Постановка задачи

РОА состоит из зон, которыми в случае СОА, обладающих одинаковыми техническими характеристиками, являются зоны ближнего разрывного обнаружения, расположенные между поверхностью Луны и сферой пересечения ЗВ СОА. Зона непрерывного многократного обнаружения простирается от верхней границы предыдущей зоны до сферической поверхности, образуемой пересекающимися ЗВ СОА. Зона дальнего разрывного обнаружения расположена выше предыдущей зоны и простирается до высоты предельной дальности обнаружения астероидов СОА (рис.1).

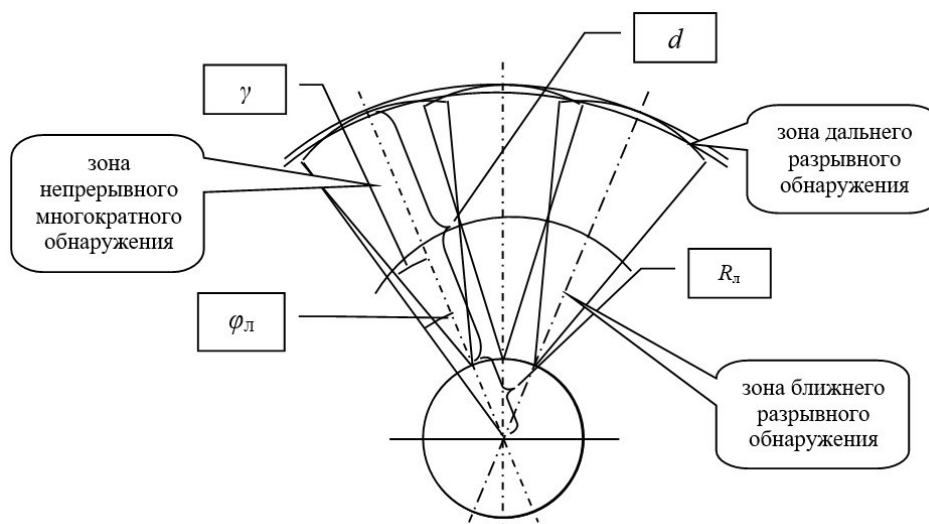


Рис. 1. Зоны обнаружения РОА, обладающих СОА с одинаковыми ТХ

Считается, что в пределах зон ближнего и дальнего разрывного обнаружения возможно только обнаружение астероидов, а в пределах зоны непрерывного многократного обнаружения – обнаружение и измерение параметров их движения методом космической триангуляции [18-19].

Допущения:

- 1) модель Луны – шар с радиусом $R_{л} = 1738$ км [20];
- 2) Луна движется относительно Земли по круговой орбите с радиусом, равным среднему расстоянию между центрами Земли и Луны;
- 3) однотипные СОА, имеющие вертикальную ориентацию осей визирования, размещены равномерно на поверхности Луны или на ее части и точками их стояния являются вершины правильных равноплощадных сферических треугольников;
- 4) ЗВ СОА соприкасаются в центрах указанных треугольников.

Исходными данными по СОА являются:

– предельная дальность обнаружения астероидов – $d = const$;

– угол половины диаграммы направленности – $\gamma = const$.

При принятых допущениях и исходных данных необходимо оценить количество СОА, равномерно располагаемых на всей поверхности Луны – N , и на ее части – N_L .

Решение поставленной задачи требует определения углового размера ЗВ СОА – $\varphi = const$ и углового расстояния между точками СОА – φ_L , которые при принятых допущениях являются постоянными для всех СОА: $\varphi = const$, $\varphi_L = const$.

**Алгоритм оценивания количества средств обнаружения астероидов,
равномерно размещаемых на всей поверхности Луны**

Алгоритм решения поставленной задачи состоит из следующих этапов:

1) определение углового размера ЗВ СОА по теореме синусов для плоских треугольников [21] (рис.1):

$$tg\varphi = \frac{d \sin \gamma}{d \cos \gamma + R_L};$$

2) вычисление углового расстояния между вершинами правильных одноплощадных сферических треугольников (точками стояния СОА) – $\varphi_L = const$ по теореме косинусов для сферических треугольников [21] (рис.2):

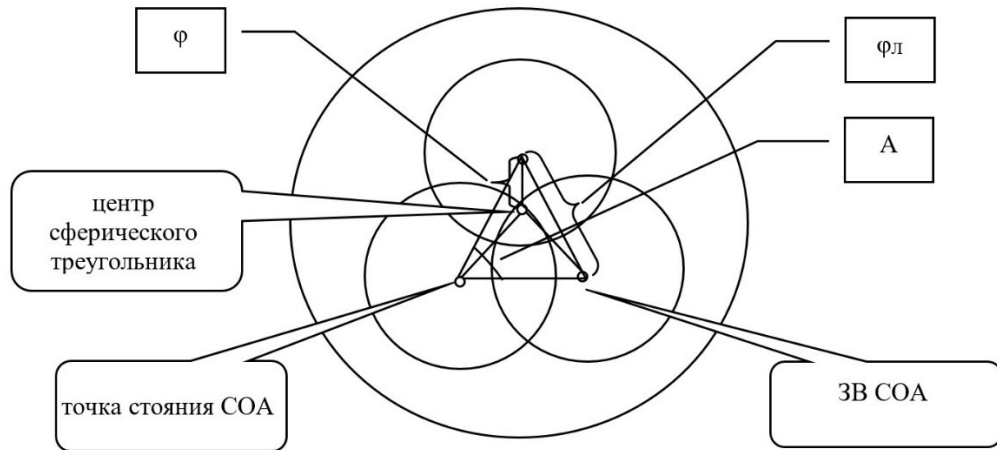


Рис. 2. К задаче определения количества средств обнаружения астероидов, равномерно размещаемых на всей поверхности Луны

$$\cos \varphi_{\text{Л}} = \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right);$$

3) расчет величин углов сферического треугольника с вершинами – точками стояния COA – $A = \text{const}$ (рис.2):

$$\cos A = \frac{\cos \varphi_{\text{Л}} - \cos^2 \varphi_{\text{Л}}}{\sin^2 \varphi_{\text{Л}}};$$

4) вычисление площади сферического треугольника по формуле А.Жирара [22]

$$S_{\text{СТ}} = R_{\text{Л}}^2 (3A - \pi);$$

5) определение площади области поверхности Луны, в пределах которой должны размещаться COA – S (если размещение COA предполагается на всей поверхности Луны, то $S = S_{\text{Л}} = 4\pi R_{\text{Л}}^2$) [23];

6) расчет числа сферических треугольников, обеспечивающих покрытие заданной области поверхности Луны:

$$M = \left\lfloor \frac{S}{S_{CT}} \right\rfloor + 1,$$

где $\lfloor \ \rfloor$ – символ операции выделения целой положительной части числа;

7) оценивание количества СОА, потребного для формирования РОА, прикрывающего заданной области поверхности Луны:

$$N_{Л} = 3 + (M - 1) = 2 + M.$$

Результаты применения алгоритма оценивания числа средств обнаружения астероидов при размещении на всей поверхности Луны

Вычислительные эксперименты проводились для двух групп исходных данных, отличающиеся дальностью действия СОА – d (табл.1, 2).

Таблица 1

d	Ф			Ф _Л			N _Л		
	γ, с			γ, с			γ, с		
	60	70	80	60	70	80	60	70	80
10000	0,0141989	0,0165654	0,0189319	0,0245932	0,0286921	0,032791	159336167	115088865	88293817
15000	0,0149361	0,0174254	0,0199148	0,02587	0,0301817	0,0344934	141114046	105052480	79958719
20000	0,0153341	0,0178898	0,0204455	0,0265595	0,0309861	0,0354127	134984673	98836772	75787082
25000	0,0155833	0,0181805	0,0207778	0,0269911	0,0314896	0,0359881	130530686	96500890	73765762
30000	0,015754	0,0183797	0,0210053	0,0272867	0,0318345	0,0363823	127591818	93658696	72013034
35000	0,0158782	0,0185246	0,0211709	0,0275019	0,0320855	0,0366691	124983220	92918355	70770855
40000	0,0159727	0,0186348	0,0212969	0,0276654	0,0322764	0,0368873	125299195	91261977	69963541

Соответствующие таблице 1 графики зависимостей φ , φ_L и N_L от d приведены на рис.3. Величины φ и φ_L указаны в градусах.

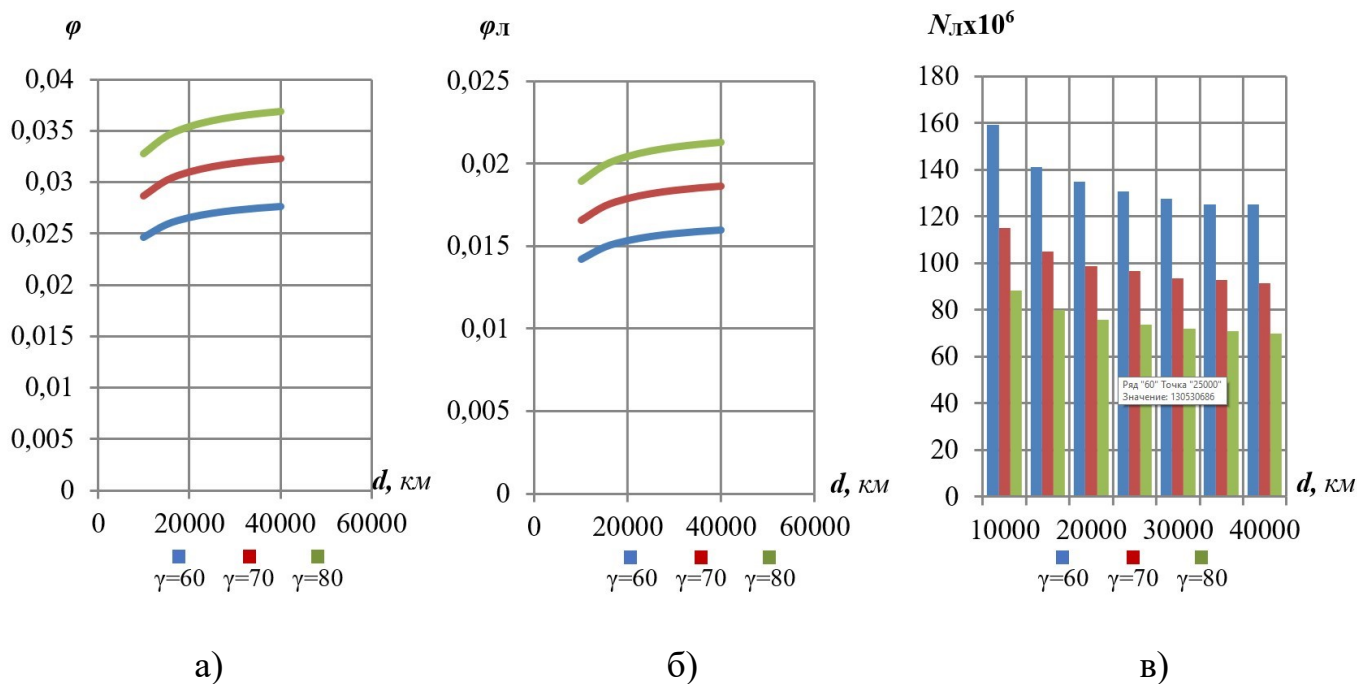


Рис.3. Графики и диаграмма зависимостей от предельной дальности обнаружения астероидов: а – углового размера ЗВ СОА; б – углового расстояния между точками СОА; в – количества СОА, равномерно располагаемых на части поверхности Луны

Результаты анализа приведённых данных показывают, что

1) с ростом d от 10000 до 40000 км величины φ и φ_L экспоненциально возрастают, а величины N_L – экспоненциально убывают;

2) большим значениям γ соответствуют большие значения φ , φ_L и меньшие значения N_L ;

3) при принятых исходных данных для всей поверхности Луны величины N_L являются неприемлемо большими.

Таблица 2

d	Φ			Φ _Л			N		
км	γ, с			γ, с			γ, с		
	60	70	80	60	70	80	60	70	80
1000000	0,0166378	0,0194107	0,0221837	0,0288174	0,0336203	0,0384232	114878928	84260275	64651047
1500000	0,0166474	0,0194219	0,0221965	0,0288341	0,0336398	0,0384455	115279323	83923975	64591676
2000000	0,0166522	0,0194276	0,0222029	0,0288424	0,0336495	0,0384566	113891997	84069577	64420799
2500000	0,0166551	0,0194309	0,0222068	0,0288475	0,0336554	0,0384633	114010615	84156858	64487963
3000000	0,016657	0,0194332	0,0222094	0,0288508	0,0336593	0,0384677	114089625	84215672	64251289
3500000	0,0166584	0,0194348	0,0222112	0,0288532	0,033662	0,0384709	114147013	84257541	64283370
4000000	0,0166594	0,019436	0,0222126	0,028855	0,0336641	0,0384733	114188136	84289061	64307154

Соответствующие таблице 2 графики приведены на рис. 4.

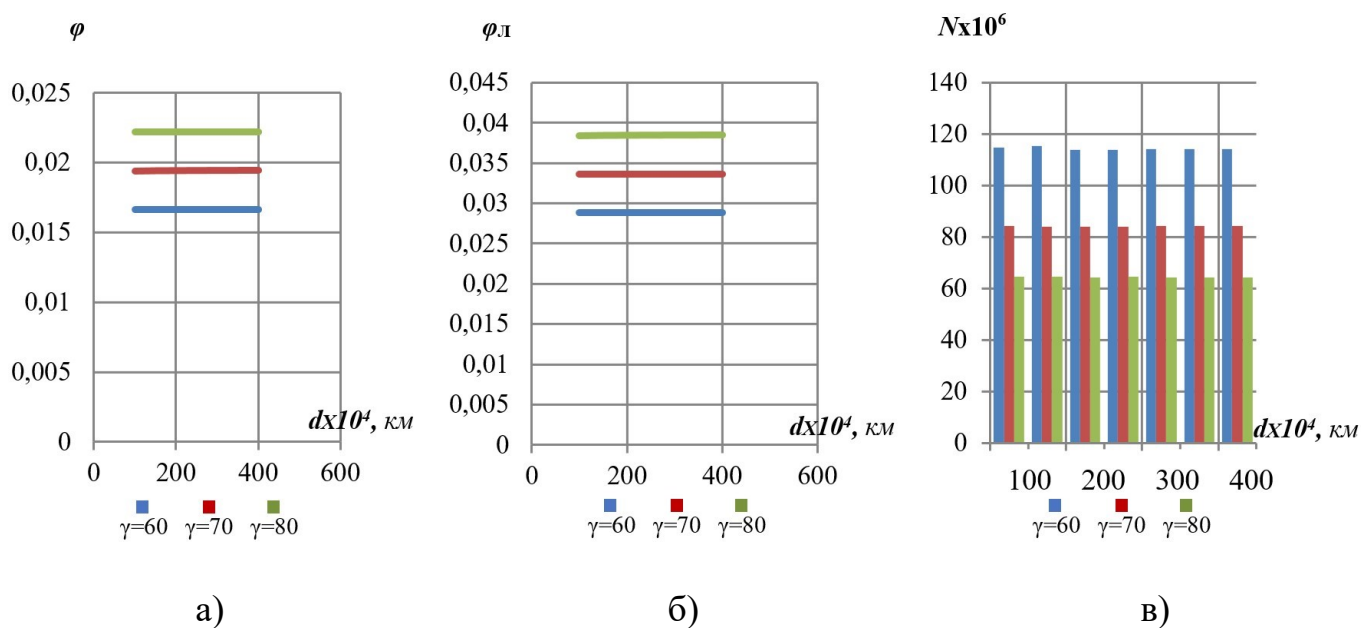


Рис. 4. Графики и диаграмма зависимостей от предельной дальности обнаружения астероидов: а – углового размера ЗВ СОА; б – углового расстояния между точками СОА; в – количество СОА, равномерно располагаемых на всей поверхности Луны

Из приведенных данных видно, что:

1) с ростом d от 1000000 до 4000000 км величины φ , φ_L , N практически не изменяются и могут рассматриваться как предельные;

2) большим значениям γ соответствуют большие значения φ , φ_L и меньшие значения N_L ;

3) при принятых исходных данных для всей поверхности Луны величины N являются неприемлемо большими.

Полученные результаты имеют вычислительные погрешности, не являются противоречивыми и соответствуют ранее полученным данным для аналогичных характеристик наземных оптических средств [24-25].

Существуют различные пути сокращения числа СОА, одним из которых является исключение для их размещения части Луны, постоянно развернутой в сторону Земли, откуда невозможно обнаруживать астероиды за поверхностью Земли.

Алгоритм оценивание числа средств обнаружения астероидов при размещении на части Луны

Оценивание числа СОА с вертикальной ориентацией осей визирования при исключении для их размещения части Лунной поверхности из-за закрытия области КП Землей («мертвая зона» СОА) может быть осуществлено по следующему алгоритму (рис.5):

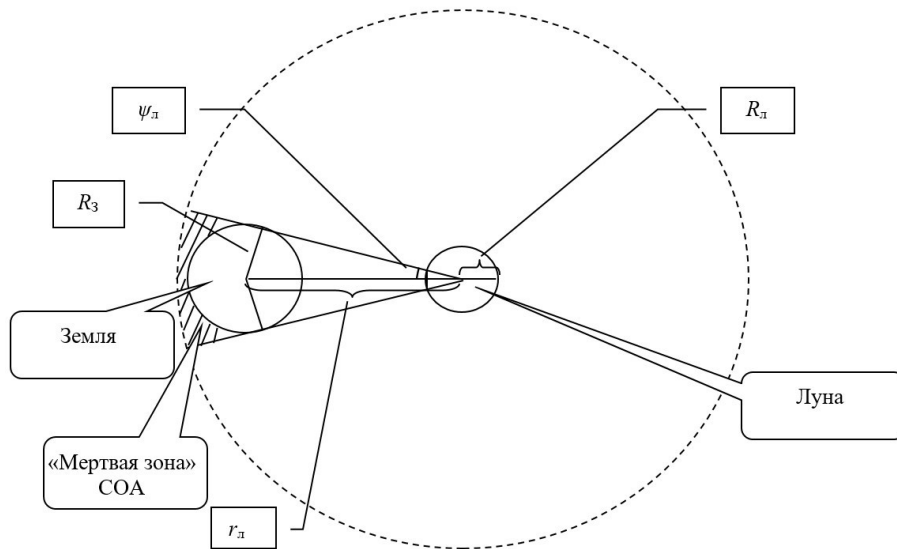


Рис. 5. К задаче оценивания числа средств обнаружения астероидов при размещении на части Луны

1) определение угла с вершиной в центре Луны между радиусом ее орбиты и касательной к поверхности Земли (или к сфере радиуса, равного сумме радиуса Земли и заданной высоты):

$$\sin \psi_{Л} = \frac{R_З}{r_{Л}},$$

где $r_{Л} = 385000$ км – среднее расстояние между центрами Земли и Луны [20];

2) определение площади шарового сегмента области поверхности Луны, где не целесообразно размещать СОА [20]:

$$S = \pi(h^2 + 2a^2),$$

где $a = R_{Л} \sin \psi_{Л}$ – радиус соответствующего шарового сегмента,

$h = R_{Л} - R_{Л} \cos \psi_{Л}$ – его высота;

3) вычисление площади сферического треугольника, в вершинах которого располагаются СОА, – S_{CT} по п.п. 1–4 алгоритма п.1.2;

4) определение площади поверхности Луны [23]:

$$S_{Л} = 4\pi R_{Л}^2;$$

5) расчет числа сферических треугольников, обеспечивающих покрытие части поверхности Луны ЗВ за исключением области поверхности Луны, где нецелесообразно размещать СОА с вертикальной ориентацией осей визирования:

$$M = \left\lfloor \frac{(S_{Л} - S)}{S_{CT}} \right\rfloor + 1;$$

6) оценивание количества СОА, потребного для формирования РОА, – $N_{ч}$, по п.7 алгоритма п.1.2;

7) оценивание выигрыша:

– по количеству СОА: $\Delta N = N_{Л} - N_{ч}$,

– в процентах: $\frac{\Delta N}{N_{Л}} 100\%$.

Результаты применения алгоритма оценивания числа средств обнаружения астероидов при размещении на части Луны

Вычислительные эксперименты проводились по данным для d , представленным в таблице 3. Их результаты сведены в эту же таблицу.

Таблица 3

d	$N_{\text{л}}$	$N_{\text{ч}}$	ΔN	%	$N_{\text{л}}$	$N_{\text{ч}}$	ΔN	%	$N_{\text{л}}$	$N_{\text{ч}}$	ΔN	%
	$\gamma = 60 \text{ с}$				$\gamma = 70 \text{ с}$				$\gamma = 80 \text{ с}$			
1000000	114878928	114863199	15729	0,0136918	84260275	84248738	11537	0,0136921	64651047	64642194	8853	0,0136935
1500000	115279323	115263538	15785	0,0136928	83923975	83912484	11491	0,0136922	64591676	64582831	8845	0,0136937
2000000	113891997	113876402	15595	0,0136928	84069577	84058066	11511	0,0136922	64420799	64411978	8821	0,0136928
2500000	114010615	113995004	15611	0,0136926	84156858	84145335	11523	0,0136923	64487963	64479133	8830	0,0136925
3000000	114089625	114074003	15622	0,0136927	84215672	84204141	11531	0,0136922	64251289	64242491	8798	0,0136931
3500000	114147013	114131384	15629	0,013692	84257541	84246004	11537	0,0136925	64283370	64274568	8802	0,0136925
4000000	114188136	114172501	15635	0,0136923	84289061	84277519	11542	0,0136934	64307154	64298349	8805	0,0136921

Результаты анализа приведённых данных показывают, что:

1) с ростом d от 1000000 до 4000000 км величины $N_{\text{ч}}$ и ΔN практически не изменяются и закономерности изменения $N_{\text{ч}}$ совпадают с закономерностями изменения N ;

2) величины $N_{\text{ч}}$ и ΔN , соответствующие $d = 4000000$ практически могут рассматриваться как предельные;

3) большим значениям γ соответствуют меньшие значения $N_{\text{ч}}$;

4) выигрыш от неиспользования части Лунной поверхности для размещения СОА хотя и значителен, но в процентном соотношении с число СОА для всей поверхности Луны практически отсутствует;

5) при принятых исходных данных величины $N_{\text{ч}}$ остаются неприемлемо большими.

Заключение

Представленный алгоритм оценивания углового расстояния между точками стояния на поверхности Луны односторонних СОА с вертикальной ориентацией осей визирования и их количества для формирования РОА позволяет получать корректные результаты и может быть использован для дальнейших исследований по определению параметров зон РОА, сокращению числа СОА и оцениванию вероятности обнаружения астероидов.

В то же время установлено, что требуемое число СОА является неприемлемо большим и необходимо искать другие способы их размещения и формирования РОА, одним из которых является равномерное размещение СОА с вертикальной ориентацией осей визирования на поверхности Луны или ее части с разрывами в РОА.

Список источников

1. Шустов Б.М., Рыхлова Л.В. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра. – М.: Физматлит, 2010. – 384 с.
2. Лунная сенсация: Есть вода. URL: <https://www.techinsider.ru/science/9538-lunnaya-sensatsiya-est-voda/>
3. LCROSS Impact Data Indicates Water on Moon, NASA. URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/LCROSS/main/prelim_water_results.html
4. Богачева М.Н. Оценка эффективности развития глобальной энергетики на базе использования лунных ресурсов «Гелий-3» // Труды МАИ. 2010. № 38. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=14527>

5. Багров А.В., Дмитриев А.О., Леонов В.А., Москатиньев И.В., Сысоев В.К. Двухволновая оптическая лунная навигационная система // Труды МАИ. 2020. № 112. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=116356>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-13](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-13)
6. Строгонова Л.Б., Столярчук В.А., Макарова С.М., Васин Ю.А. Лунная база. проблемы обитаемости // Труды МАИ. 2013. № 67. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=41586>
7. Окончательное доказательство: И снова о воде. URL: <https://www.techinsider.ru/science/9683-okonchatelnoe-dokazatelstvo-i-snova-o-vode/>
8. Asteroid Impact & Deflection Assessment (AIDA) collaboration. URL: https://www.esa.int/Space_Safety/Hera/Asteroid_Impact_Deflection_Assessment_AIDA_collaboration
9. Asteroid impact mission targets Didymos. URL: https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/Asteroid_impact_mission_targets_Didymos
10. Константиновская Л.В. Прогноз и предотвращение кометно-астероидной опасности. URL: <http://www.astronom2000.info/different/pipao/>
11. Соколов Б.В., Минаков Е.П. Исследования характеристик размещения и вариантов применения моноблочных стационарных средств поражения астероидов // Труды СПИИРАН. 2016. № 5. С. 182-197.
12. Дегтярь В.Г., Волков В.А. Ракетная концепция системы противоастероидной защиты Земли. – М.: Машиностроение, 2014. – 334 с.
13. Иванов В.Л., Меньшиков В.А., Пчелинцев Л.А., Лебедев В.В. Космический мусор. Проблемы и пути решения. – М.: Патриот, 1996. Т.1. – 360 с.

14. Freedman W.L., Madore B.F., Gibson B.K., Ferrarese L., Kelson D.D. et al. Final Results from the Hubble Space Telescope Key Project to Measure the Hubble Constant // The Astrophysical Journal, IOP Publishing, 2001, vol. 553, issue 1, pp. 47-72. DOI:[10.1086/320638](https://doi.org/10.1086/320638).
15. Nancy Grace Roman. Exploring the Universe: Space-Based Astronomy and Astrophysics, NASA SP-2001-4407: Exploring the Unknown: Selected Documents in the History of the US Civil Space Program, Washington, DC, 2001, vol. 5, pp. 501.
16. Jedrzejewski R.I., Hartig G., Jakobsen P., Crocker J.H., Ford H.C. In-orbit performance of the COSTAR-corrected Faint Object Camera // The Astrophysical Journal, 1994, vol. 435, no. 1, pp. L7-L10. DOI:[10.1086/187581](https://doi.org/10.1086/187581).
17. Spitzer Lyman Jr. History of the Space Telescope // Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society, 1979, vol. 20, pp. 29-36.
18. Микиша А.М. Космические методы в геодезии. – М.: Знание, 1983. – 54 с.
19. Кустодов А.Ю., Павлов В.П. Определение траекторий космических объектов по оптическим измерениям в зонах двойного обзора с наземных пунктов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 6. DOI: [10.18698/2308-6033-2017-6-1659](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2017-6-1659)
20. Инженерный справочник по космической технике. – МО СССР, 1969. – 696 с.
21. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1978. – 831 с.
22. Васильев Н.Б., Гутенмахер В.Л. Сумма углов сферического многоугольника // Квант. 1988. № 2. URL: https://kvant.ras.ru/1988/02/summa_uglov_sfericheskogo_mnog.htm

23. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗОВ. – М.: ОГИЗ, 1948. – 556 с.

24. Минаков Е.П., Соколов Б.В., Шалдаев С.Е., Александров М.А. Расчет и исследование пространственно- временных характеристик рубежей атаки астероидов орбитальными средствами // Труды СПИИРАН. 2019. № 18. С. 1462-1490.
DOI:[10.15622/sp.2019.18.6.1462-1490](https://doi.org/10.15622/sp.2019.18.6.1462-1490)

25. Баринов К.Н., Бурдаев М.Н., Мамон П.А. Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1975. – 232 с.

References

1. Shustov B.M., Rykhlova L.V. *Asteroidno-kometnaya opasnost': vchera, segodnya, zavtra* (Asteroid-comet danger: yesterday, today, tomorrow), Moscow, Fizmatlit, 2010, 384 p.

2. *Lunnaya sensatsiya: Est' voda*. URL: <https://www.techinsider.ru/science/9538-lunnaya-sensatsiya-est-voda/>

3. *LCROSS Impact Data Indicates Water on Moon*, NASA. URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/LCROSS/main/prelim_water_results.html

4. Bogacheva M.N. *Trudy MAI*, 2010, no. 38. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=14527>

5. Bagrov A.V., Dmitriev A.O., Leonov V.A., Moskatin'ev I.V., Sysoev V.K. *Trudy MAI*, 2020, no. 112. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=116356>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-13](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-13)

6. Strogonova L.B., Stolyarchuk V.A., Makarova S.M., Vasin Yu.A. *Trudy MAI*, 2013, no.

67. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=41586>

7. *Okonchatel'noe dokazatel'stvo: I snova o vode.* URL:
<https://www.techinsider.ru/science/9683-okonchatelnoe-dokazatelstvo-i-snova-o-vode/>
8. *Asteroid Impact & Deflection Assessment (AIDA) collaboration.* URL:
https://www.esa.int/Space_Safety/Hera/Asteroid_Impact_Deflection_Assessment_AIDA_collaboration
9. *Asteroid impact mission targets Didymos.* URL:
https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/Asteroid_impact_mission_targets_Didymos
10. Konstantinovskaya L.V. *Prognoz i predotvrashchenie kometno-asteroidnoi opasnosti.* (Forecast and prevention of comet-asteroid danger). URL:
<http://www.astronom2000.info/different/pipao/>
11. Sokolov B.V., Minakov E.P. *Trudy SPIIRAN*, 2016, no 5, pp. 182-197.
12. Degtyar' V.G., Volkov V.A. *Raketnaya kontseptsiya sistemy protivasteroidnoi zashchity Zemli* (Missile Concept of Earth Anti-Asteroid Protection System), Moscow, Mashinostroenie, 2014, 334 p.
13. Ivanov V.L., Men'shikov V.A., Pchelintsev L.A., Lebedev V.V. *Kosmicheskii musor. Problemy i puti resheniya* (Space debris. Problems and solutions), Moscow, Patriot, 1996, vol. 1, 360 p.
14. Freedman W.L., Madore B.F., Gibson B.K., Ferrarese L., Kelson D.D. et al. Final Results from the Hubble Space Telescope Key Project to Measure the Hubble Constant, *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, 2001, vol. 553, issue 1, pp. 47-72.
DOI:[10.1086/320638](https://doi.org/10.1086/320638).

15. Nancy Grace Roman. *Exploring the Universe: Space-Based Astronomy and Astrophysics*, NASA SP-2001-4407: Exploring the Unknown: Selected Documents in the History of the US Civil Space Program, Washington, DC, 2001, vol. 5, pp. 501.
16. Jedrzejewski R.I., Hartig G., Jakobsen P., Crocker J.H., Ford H.C. In-orbit performance of the COSTAR-corrected Faint Object Camera, *The Astrophysical Journal*, 1994, vol. 435, no. 1, pp. L7-L10. DOI:[10.1086/187581](https://doi.org/10.1086/187581).
17. Spitzer Lyman Jr. History of the Space Telescope, *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, 1979, vol. 20, pp. 29-36.
18. Mikisha A.M. *Kosmicheskie metody v geodezii* (Space methods in geodesy), Moscow, Znanie, 1983, 54 p.
19. Kustodov A.Yu., Pavlov V.P. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2017, no. 6. DOI: [10.18698/2308-6033-2017-6-1659](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2017-6-1659)
20. *Inzhenernyi spravochnik po kosmicheskoi tekhnike* (Engineering Guide to Space Engineering), – MO SSSR, 1969. – 696 s.
21. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov*. (Mathematics Handbook for Scientists and Engineers), Moscow, Nauka, 1978, 831 p.
22. Vasil'ev N.B., Gutenmakher V.L. *Kvant*, 1988, no. 2. URL: https://kvant.ras.ru/1988/02/summa_uglov_sfericheskogo_mnog.htm
23. Bronshtein I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike* (Manual of mathematics for engineers and students of VTUZOV), Moscow, OGIZ, 1948, 556 p.
24. Minakov E.P., Sokolov B.V., Shaldaev S.E., Alexandrov M.A. Calculation and study of spatial and temporal characteristics of asteroid attack boundaries by orbital means,

Proceedings of SPIIRAN, 2019, vol. 18, pp. 1462-1490. DOI:[10.15622/sp.2019.18.6.1462-1490](https://doi.org/10.15622/sp.2019.18.6.1462-1490)

25. Barinov K.N., Burdaev M.N., Mamon P.A. *Dinamika i printsipy postroeniya orbital'nykh sistem kosmicheskikh apparatov* (Dynamics and principles of spacecraft orbital systems construction), Moscow, Mashinostroenie, 1975, 232 p.

Статья поступила в редакцию 10.06.2022

Статья после доработки 11.06.2022

Одобрена после рецензирования 16.06.2022

Принята к публикации 12.10.2022

The article was submitted on 22.06.2022; approved after reviewing on 16.06.2022; accepted for publication on 12.10.2022