

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА БЛЕСКА КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

**Пророк Валерий Ярославович,**

г. Санкт-Петербург, Россия, val\_prorok@mail.ru

**Карытко Анатолий Александрович,**

г. Санкт-Петербург, Россия, kurok134@yandex.ru

**Горянский Александр Сергеевич,**

г. Санкт-Петербург, Россия, gorynskiy@mail.ru

**Аннотация.** Представлена методика, позволяющая осуществить оценку диапазона колебания блеска космического объекта. Методика основана на комплексном анализе факторов, оказывающих влияние на величину блеска космического объекта. К основным факторам, рассматриваемым в работе, относятся: изменение на проводке фазового угла освещенности космического объекта, изменение площади Миделевого сечения космического объекта по отношению к наблюдателю, влияние случайного искажения отраженного от космического объекта сигнала в ходе его распространения и цифровой обработки. Работа методики основана на использовании комплексного подхода, включающего два компонента. Первый компонент – процедура имитационного моделирования - используется для расчета фазового угла освещенности космического объекта. Второй компонент – вероятно – статистический анализ, применяемый в процедуре оценки изменения блеска космического объекта в результате его вращения и случайных искажений отраженного сигнала. Применение результатов методики в процедуре планирования наблюдений космических объектов оптико-электронными средствами мониторинга околоземного космического пространства позволяет сократить множество возможных вариантов расписаний работы средств. Критерием планирования объекта на средство наблюдения является отношение блеска объекта к максимальной проникающей способности наблюдательного средства. На основе статистических данных и результатов проводок космических объектов произведена оценка диапазона изменения блеска космического объекта в течение одной проводки. Разработанную методику целесообразно применять при решении задачи планирования сбора и обработки некоординатной информации специализированными средствами мониторинга околоземного космического пространства. Максимальный эффект использования результатов работы методики достигается в ходе ее применения к космическим объектам, по которым существуют эмпирические и статистические данные. В заключении работы коллективом авторов предложено дальнейшее направление исследований в данной области, направленных на максимальную унификацию разработанной методики и возможности ее применения при минимуме статистической информации.

**Ключевые слова:** некоординатная информация; блеск космического объекта; планирование наблюдений космических объектов; система мониторинга околоземного космического пространства.

**Сведения об авторах:** Пророк В.Я., д.т.н., профессор, профессор кафедры автоматизированных систем управления Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского.

Карытко А.А., преподаватель кафедры автоматизированных систем управления Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского;

Горянский А.С., начальник учебной лаборатории кафедры автоматизированных систем управления Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского.

### Введение

Существенное влияние на эффективность решаемых задач системой мониторинга космического пространства оказывает оперативность и результативность процесса сбора и анализа некоординатной информации о космических объектах, наблюдаемых средствами мониторинга околоземного космического пространства. Рост числа объектов, контролируемых рассматриваемой системой, расширение зон контроля околоземного космического пространства специализированными средствами наблюдения

приводит к увеличению объемов обрабатываемой информации, времени ожидания и обслуживания измерений вычислительными средствами системы. Кроме того, ряд задач, связанных с информационным обеспечением процесса функционирования специализированных средств сбора координатной и некоординатной информации о космических объектах, относятся к классу дискретных оптимизационных задач [1], решение которых носит комбинаторный характер. К одной из таких задач относится задача планирования сбора некоординатной информации о космических объектах опико-электронными средствами мониторинга околоземного космического пространства. В общем случае решение задачи планирования наблюдения спутников сводится к выбору оптимального расписания задействования группировки средств наблюдения  $n$  для контроля группировки космических объектов  $m$ . Полный перебор возможных вариантов планирования наблюдений космических объектов в данных условиях содержит  $m^n$  решений.

Стандартными методами поиска оптимального варианта решения подобных задач, на сегодняшний день, остается метод полного перебора, применяемый к множеству решений задачи  $A=U \setminus B$ , где  $U$  – полное множество возможных решений задачи, обладающее мощностью  $m^n$ ,  $B$  – множество вариантов решений задачи, не удовлетворяющих каким-либо накладываемым ограничениям, обладающее мощностью  $z \in \mathbb{N} \mid |z| \leq m^n$ . Данный подход обеспечивает существенное сокращение ресурсных и оперативных затрат на решение задачи, а также нахождение квазиоптимального решения. Оптимальное решение достигается в исключительно редких случаях, поскольку мощность образованного множества  $A$  все также не позволяет применять метод полного перебора для решения задачи.

В данной работе в качестве критерия, используемого для формирования сокращенного множества возможных вариантов решений  $A$ , применяется тренд значений блеска космического объекта в течение одного сеанса наблюдения.

### Постановка задачи исследования

Тренд блеска космического объекта  $\psi(t, f(x))$  будем рассматривать как функцию, зависящую от времени  $t$  и функции плотности распределения случайной величины (СВ)  $x$ , характеризующей различные возмущающие воздействия среды распространения оптического сигнала от космического объекта и аппаратуры его приема и обработки. Представим функцию  $\psi(t, f(x))$  в следующем виде:

$$\psi(t, f(x)) = m(t) + \beta(t) + X, \quad (1)$$

где  $m(t)$  – функция изменения блеска космического объекта в зависимости от фазового угла его освещенности;  
 $\beta(t)$  – функция изменения блеска космического объекта в зависимости от изменения площади его Миделевого сечения по отношению к наблюдателю  
 $X$  – случайная величина, обладающая функцией плотности распределения  $f(x)$ .

Здесь и далее под фазовым углом [2] понимается угол между направлениями: наблюдательное средство – космический объект – Солнце. Функция  $\beta(t)$  характеризуется периодом вращения космического объекта вокруг своей оси.

Использование выражения (1) позволяет производить оценку изменения блеска космического объекта на проводке  $\Delta\psi$  и тем самым учитывать возможность наблюдательного средства по обнаружению космического объекта. Таким образом, критерий планирования космического объекта  $j$  на наблюдательное средство  $i$  принимает вид:

$$\xi_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } t > t_k \mid \psi_i \geq \psi_j(t); \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2)$$

где  $t$  – время видимости  $j$ -го объекта  $i$ -ым наблюдательным средством;  
 $t_k$  – минимально допустимое время наблюдения космического объекта  $i$ -ым наблюдательным средством;  
 $\psi_i$  – минимальная пропускная способность  $i$ -го средства наблюдения;  
 $\psi_j(t)$  – значение блеска космического объекта  $j$  на проводке;

Таким образом, с использованием выражения (2) формируется множество  $B$ , формализовано данную процедуру можно записать в виде выражения:

$$B = \{(i, j) \mid i \in \overline{1, n}, j \in \overline{1, m}, \xi_{ij} = 0\}.$$

### Методика расчета блеска космического объекта

Принцип функционирования методики заключается в следующем. Значения функции  $\varphi(t)$  рассчитываются методом имитационного моделирования. Исходными данными процедуры имитационного моделирования служат:

- 1) данные о космическом объекте, загружаемые из каталога TLE, распространяемого через открытые источники сети Интернет [3];
- 2) значение приведенной звездной величины космического объекта  $m_0$ , рассчитываемое на основе ранее проведенных наблюдений космического объекта либо эмпирической информации;
- 3) координаты расположения, минимальные и максимальные углы места и азимута зоны контроля околоземного космического пространства, средства сбора некоординатной информации от объекта.

Путем численного решения уравнения Кеплера [4] осуществляется прогноз движения космического объекта. В процедуре расчета освещенности космического объекта Солнцем используется цилиндрическая теневая модель. При этом космический объект считается освещенным Солнцем, если прямая «космический объект – Солнце» не обладает пересечением со сферой, характеризующей Землю. Математически расчет производится за счет решения системы уравнений:

$$\begin{cases} X^2 + Y^2 + Z^2 = R^2 \\ \frac{X - X_k}{X_c - X_k} = \frac{Z - Z_k}{Z_c - Z_k} = \frac{Y - Y_k}{Y_c - Y_k} \end{cases}, \quad (3)$$

где  $X, Y, Z$  - координаты точки пересечения прямой со сферой;  
 $X_k, Y_k, Z_k$  - текущие координаты космического объекта;  
 $X_c, Y_c, Z_c$  - текущие координаты Солнца.

В случае, если система уравнений (3) не имеет решений, космический объект считается освещенным Солнцем. В приведенных расчетах используется геоцентрическая подвижная система координат. При расчете координат Солнца расстояние от центра Земли до Солнца считается постоянным и равным одной астрономической единице. Для расчета углов склонения и восхождения Солнца в заданном географическом районе используется библиотека типовых программ, представленная в работе [5].

Известные координаты наблюдательного пункта, Солнца и космического объекта без труда позволяют вычислить фазовый угол космического объекта в момент времени  $t - \chi(t)$  с помощью простых тригонометрических соотношений. Величина блеска космического объекта в момент времени  $t$  рассчитывается согласно формуле [2]:

$$m(t) = m_0 - 15,75 + 2,5 \cdot \lg \left( \frac{r^2}{0,5 \cdot (1 - \cos(180^\circ - \chi(t)))} \right), \quad (4)$$

где  $t$  – радиус вектор космического объекта.

Функция  $\beta(t)$  выбирается из базы данных различных типов вращений космических объектов в зависимости от типа космического объекта и его предназначения. При этом в исходном виде функция  $\beta(t)$  представляет собой смесь полезного сигнала и помехи, возникающей вследствие распространения оптического сигнала в атмосфере Земли и его цифровой обработки. Для выделения полезного сигнала применяется алгоритм, основанный на применении метода скользящего окна, его суть заключается в следующем.

**Шаг 1.** Устанавливается ширина скользящего окна  $n$ , счетчику  $i$  присваивается значение единицы.

**Шаг 2.** В переменную  $s$  суммируются значения измерений блеска космического объекта, принадлежащие интервалу от  $i$  до  $i+n$ ;

**Шаг 3.** Измерению блеска с номером  $i$  присваивается значение  $s/n$ , величина  $s$  обнуляется, величина  $i$  инкрементируется.

**Шаг 4.** Если  $i$  меньше количества обрабатываемых измерений, то переходим на шаг 2, иначе алгоритм завершает свою работу.

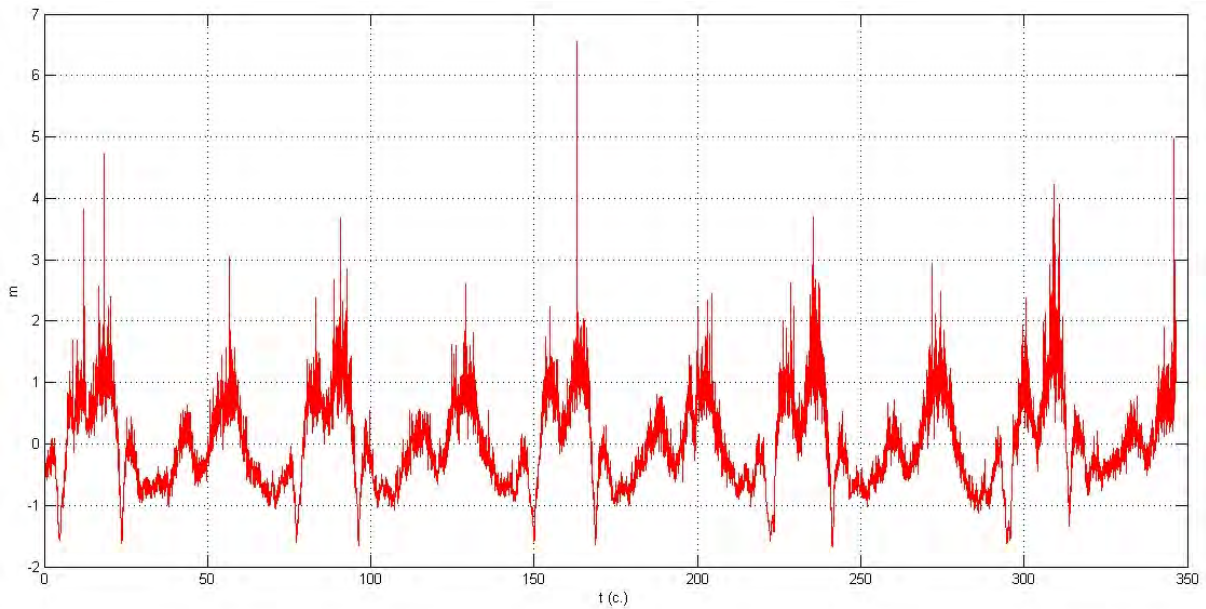
Образованный массив  $\beta'$  содержит сглаженные значения блеска космического объекта на проводке. Его значения позволяют сформировать массив ошибок, обусловленных влиянием вышеуказанных помех как разность значений  $\varepsilon[i] = |\beta[i] - \beta'[i]|$ . Обработка массива  $\varepsilon$  методами статистического анализа, подробно изложенными в работе [6], позволяет получить функцию распределения случайной величины блеска космического объекта –  $F(x)$ ,  $F'(x) = f(x)$ . Вводя интервалы времени  $\Delta t$  между двумя последовательными измерениями блеска космического объекта, а также учитывая, что функция  $\beta(t)$  – периодическая, получаем возможность её задания через массив  $\beta'$ .

### Предварительная оценка результатов методики

Расчеты, выполненные согласно выражению 4, показывают, что диапазон изменения величины  $m$  при  $\chi = 30, 45, 60, 90, 120$  и  $150$  градусах может составить 0.14, 0.3, 0.54, 1.24, 2.4 и 4.6 звездной величины соответственно.

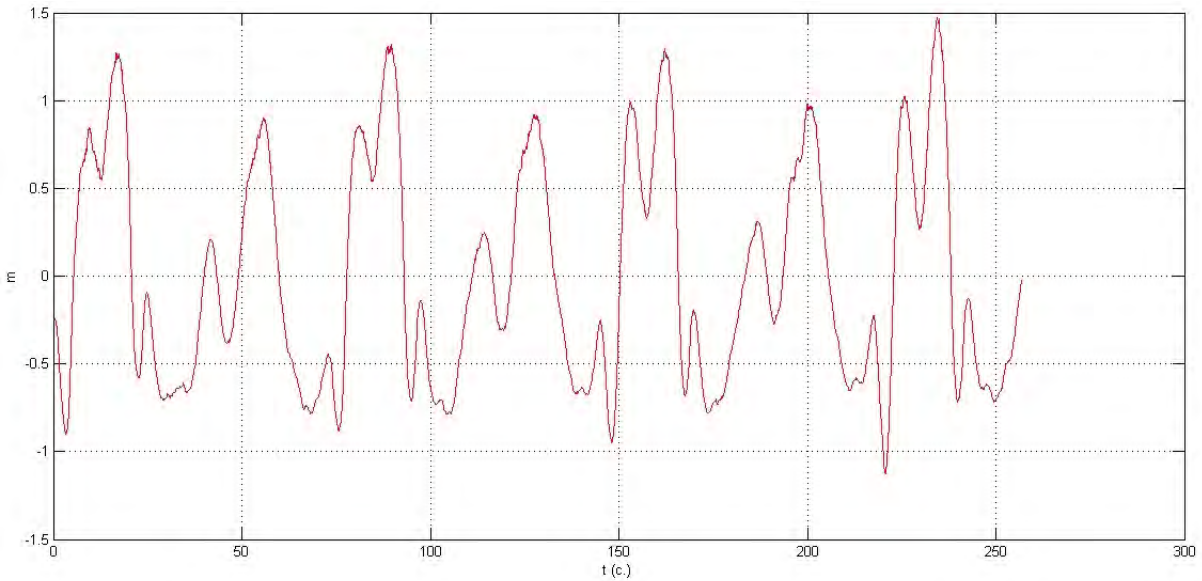
Изменение фазового угла в большей степени влияет на величину блеска высокоорбитальных космических объектов, находящихся в зоне действия средства наблюдения более длительное время, по сравнению с космическими объектами на низких орбитах. Так, максимальная длительность пребывания космического объекта в зоне наблюдательного средства составляет в среднем порядка десяти минут, круговых полусуточных и высокоэллиптических космических объектов – от десятков минут до нескольких часов, геостационарных космических объектов – порядка шести – двенадцати часов (в зависимости от времени года). При этом фазовый угол для низкоорбитальных и высокоорбитальных космических объектов на орбитах от 150 до 5000 км практически не меняется за время проводки, для объектов на более высоких орбитах может изменяться на несколько десятков градусов. Для ВОКО наблюдение сигнала при фазовых углах более 90 угловых градусов становится весьма затруднительным.

Пример изменения блеска вследствие вращения космического объекта и влияния случайных величин представлен на рис. 1.



**Рис. 1.** Диапазон колебаний блеска космического объекта

Результаты обработки представленного на рисунке 1 сигнала в соответствии с алгоритмом, представленным выше, приведены на рис. 2.



**Рис. 2.** Колебания блеска космического объекта без влияния случайных факторов

Данные представленные на рисунке позволяют определить период вращения космического объекта приблизительно равный 75 секундам.

Характеристика случайного воздействия на принимаемый от космического объекта сигнал, для рассматриваемого примера, приведена на рис. 3.

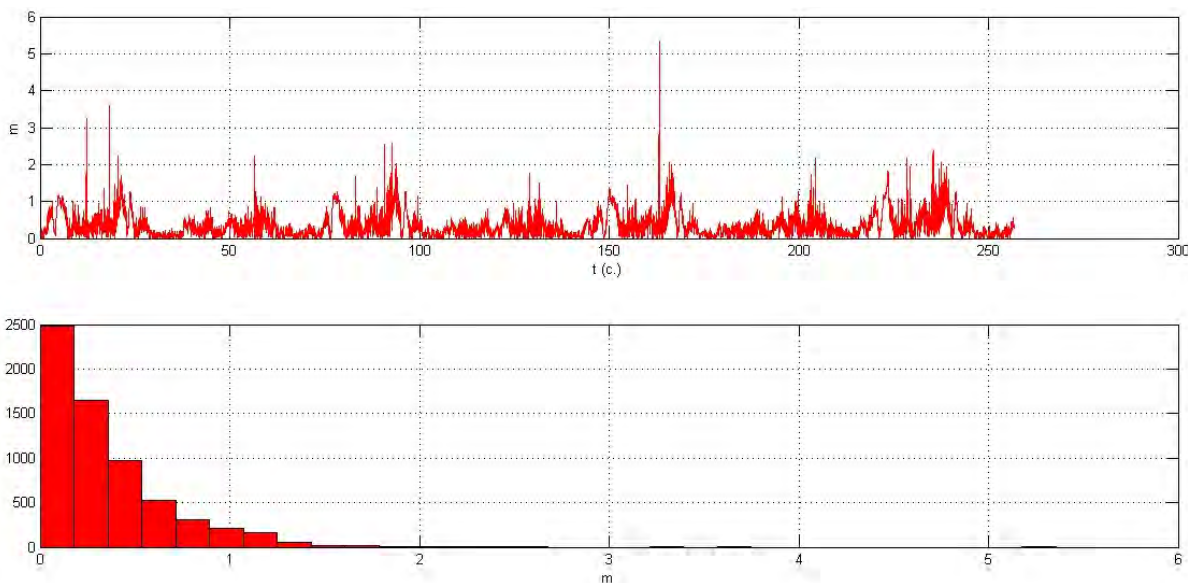


Рис. 3. Ошибка измерения блеска КО и ее гистограмма.

В ходе статистического анализа проведенных наблюдений установлено, что распределение случайной величины, характеризующей ошибку измерения блеска космического объекта, обладает наибольшей мерой согласия с экспоненциальным распределением. Математическое ожидание экспоненциального распределения случайной величины блеска  $\lambda$  равно 0,35.

Главный вывод проведенных исследований заключается в том, что в процессе одного сеанса наблюдения космического объекта изменение блеска объект  $\Delta m$  может достигать 5-6 звездных величин в зависимости от его типа и траекторных особенностей проводки. Таким образом, при наблюдении объектов, для которых выполняется условие  $\Delta m + m_0 \geq m_k$ , где  $m_k$  – максимальная проникающая способность наблюдательного средства, следует учитывать возможность возникновения эффекта мерцания космического объекта, что создает значительные трудности при сборе координатной и некоординатной информации о космическом объекте. Вероятность успешного обслуживания космического объекта наблюдательным средством можно оценить как отношение длины интервала, на котором блеск объекта позволяет осуществлять его контроль наблюдательным средством, к полной длине интервала проводки.

### Заключение

Предложенная методика призвана оптимизировать процесс планирования привлечения оптико-электронных средств сбора и обработки информации о космических объектах за счет исключения из плана на заданное средств космических объектов с низкой вероятностью успешного обслуживания. Используемый в работе подход обеспечивает учет трех основных факторов, оказывающих определяющее влияние на процесс обнаружения и сопровождения космических объектов.

Дальнейшее развитие предложенной методики целесообразно осуществлять за счет проведения классификации основных возможных типов вращений космических объектов по ряду критериев. Основу процедуры классификации могут составить алгоритмы кластеризации данных. Формализацию процедуры вращения без использования статистических данных возможно осуществить используя преобразования Фурье для аппроксимации периодических функций вращения объектов.

### Литература

1. Сухарев А.Г., Тимохов А.В., Федоров В.В. Курс методов оптимизации: Учебное пособие. 2-е изд., М.: ФИЗМАТЛИТ. 2008 – 368 с.

2. Наблюдение искусственных спутников Земли [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sat.belastro.net> (дата обращения 20.10.2015)
3. Официальный сайт NORAD [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.space-track.org> (дата обращения 18.10.2015)
4. Авдеев Ю.Ф., Беляков А.И., и др. Полет космических аппаратов. Примеры и задачи. М.: Машиностроение. 1980. 254 с.
5. Монтенбрук О., Пфлегер Т. Астрономия на персональном компьютере. СПб.: Изд-во «Питер». 2002. 320 с.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Издательский центр «Академия». 2003. 576 с.

## CALCULATION SHINE SPACE OBJECTS

**Prorok Valery Yaroslavovich,**

St. Petersburg, Russia, [val\\_prorok@mail.ru](mailto:val_prorok@mail.ru).

**Karitko Anatoly Alexandrovich,**

St. Petersburg, Russia, [biintell@rambler.ru](mailto:biintell@rambler.ru)

**Gorianskiy Alexander Sergeevich,**

St. Petersburg, Russia, [gorynskiy@mail.ru](mailto:gorynskiy@mail.ru)

**Abstract.** The technique, allows the assessment of range fluctuations in the brightness of the space object. The technique is based on a comprehensive analysis of factors affecting the value of the brightness of the space object. The main factors considered in the paper are: a change in the wiring phase angle of illumination of the space object, the change in the area of mid-section of the space object relative to the observer, the effect of random distortion of the reflected signal from a space object during its distribution and digital processing. Work techniques based on the use of an integrated approach involving two components. The first component - the procedure of simulation is used to calculate the phase angle of illumination of the space object. The second component - the probability - statistical analysis used in the assessment procedure, the brightness variation of a space object as a result of its rotation and random distortions of the reflected signal. Application of the results of techniques in the planning procedure observation of space objects opto-electronic means of monitoring the near-Earth space can reduce the set of possible options for scheduling the work means. Planning criteria subject to a means of surveillance is the ratio of the brightness of the object to the maximum penetrating ability of the supervisory tools. On the basis of statistical data and entries of space objects evaluated a range of brightness variation of a space object for one wiring. To develop a methodology appropriate to apply in solving the problem of planning the collection and processing of non-coordinate information specialized tools for monitoring near-Earth space. The maximum effect of using the results of a technique achieved during its application to space objects for which there are empirical and statistical data. At the conclusion of the group of authors suggested the future direction of research in this area aimed at maximum harmonization of the developed technique and the possibility of its use with a minimum of statistical information.

**Keywords:** not coordinate information shine space object; planning observations of space objects; the system for monitoring near-Earth space.

### References

1. Suharev A. G., Timohov A.V., Fedorov V. V. The course of optimization methods: the tutorial.- the second edition., М.: FIZMALIT. 2008-368 p.
2. Observation of artificial satellites [The electronic resource]. Access mode: <http://www.sat.belastro.net>(data appeal 20.10.2015)
3. Official website OAO «МАК Vimpel» [The electronic resource]. Access mode: [http://www.spacedata.vimpel.ru/ru/data\\_provider](http://www.spacedata.vimpel.ru/ru/data_provider) (data appeal 17.11.2014)
4. Avdeev U.F., Belyakov A.I. Space missions. Examples and taska.- М.: Mechanical engineering.-1980.-254 p.

5. Montenbruk.O., Pflieger.T. Astronomy on personal computer.-St. Petersburg. Publishing house « Petersburg ».-2002.-320 p.
6. Ventzhel E.S The theory of chances.-M.: Publishing centre «Acadamy».-2003.-576 p.

**Information about authors:**

Prorok V.Y., Ph.D, Prof., Military Space Academy;

Karitko A.A., lecturer in Military Space Academy;

Gorianskiy A.S., head of laboratory in Military Space Academy.