

УДК 621.396.946

Ахмедов Д.Ш.<sup>1\*</sup>, Еремин Д.И.<sup>2\*\*</sup>, Кемешева Д.Г.<sup>3\*\*\*</sup>, Альников Д.В.<sup>4\*\*\*\*</sup><sup>1,2,3</sup>Институт космической техники и технологий, г. Алматы<sup>4</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы

E-mail: \*lasp@mail.ru, \*\*denis\_e@bk.ru, \*\*\*d.kemesheva@gmail.com, \*\*\*\*d.alnikov@gmail.com

### Исследование возможностей использования отраженного излучения наземных радиоэлектронных средств от космических объектов на околоземной орбите

В статье производится оценка характеристик отраженного излучения радиоэлектронных средств. Приведена схема построения системы радиосвязи с использованием низкоорбитальных космических аппаратов. Приведено уравнение мощности излучателя, зависящее от эффективной площади рассеяния космических объектов, конфигурации, материала поверхности объектов, длины волны радиоэлектронных средств, ее поляризации, направления излучения. Определена необходимая мощность сигнала передатчика с помощью приложения Radar Equation Calculator в среде Matlab, при проведении расчета использовались данные существующих систем. По полученным результатам вычислений есть возможность получить полезный сигнал, переотраженный от группы космических объектов на низкой околоземной орбите. В статье приведено приложение анализатора сигнала Radar Waveform Analyzer в среде Matlab, с помощью которого возможно смоделировать и получить расчет минимальной и максимальной дальности; визуализировать реальные и мнимые части, амплитудные и фазовые графики, автокорреляцию сигнала и спектральный анализ сигнала.

**Ключевые слова:** Космические объекты, отраженное излучение, радиосвязь.

Akhmedov D., Eremin D.I., Kemesheva D.G., Alnikov D.V.

### Study of potential use of ground-based radioelectronic equipment radiation reflected from orbital space object

In article the evaluation of specifications of reflected radiation of electronic means is produced. Outline of construction of the system of radio communication with using low-orbit space vehicles is presented. The equation of power of the radiator dependent from radar cross-section of space objects, configurations, material of which the objects is made, lengths of the wave of radio-electronic facilities, polarization, and the direction of radiation is presented. Required power of the signal of the transmitter is determined with the aid of application Radar Equation Calculator in multi-paradigm numerical computing environment Matlab, at calculation we were used of given existing systems. On received results of calculations, there is opportunity to receive a useful signal re-scattered from the group of space objects on low Earth-orbital orbit. In article, the analyzer application of the signal Radar Waveform Analyzer in environment Matlab is presented, with the aid of which possibly to simulate and to be discharged of minimum and maximum range; to visualize real and imaginary parts, magnitude and phase schedules, signal autocorrelation and spectral analysis of the signal.

**Key words:** Space Objects, Radio Communication, Reflected Radiation.

Ахмедов Д.Ш., Еремин Д.И., Кемешева Д.Г., Альников Д.В.

### Жерүсті радиоэлектронды құралдардың Жер маңындағы орбитадағы ғарыштық нысандардан шағылысу сәулеленуін пайдалану мүмкіндіктерін зерттеу

Мақалада радиоэлектронды құралдардың шағылыс сәулелену сипаттамаларын бағалау жүргізіледі. Төменгі орбиталық ғарыштық аппараттарды пайдалану арқылы радиобайланыс жүйесін құру схемасы келтірілген.

Ғарыш аппараттарын, конфигурациялары, нысандардың сыртқы материалдары, радиоэлектронды құралдар толқынының ұзындығы, оның поляризациясы, сәулелену бағытын тарату алаңының тиімділігіне байланысты сәуле таратушының қуатына теңестіру жүргізілді. Matlab ортасында Radar Equation Calculator қосымшаларының көмегімен қажетті қабылдаушы сигналдар қуаты анықталды, есептеу барысында қолданыстағы жүйенің деректері пайдаланылды. Алынған есептеу нәтижелері бойынша төменгі жер маңындағы орбитада ғарыштық нысандар тобынан қайта сәулеленген пайдалы сигналды алу мүмкіндігі табылды. Мақалада Matlab ортасында Radar Waveform Analyzer сигнал талдағыш қосымшалар, нақты және алдамшы бөліктерді визуализациялау, магниттік және фазалық графиктер, сигналдарды автокорреляциялау және сигналды спектральді талдау келтірілген, бұл оның көмегімен ең төмен және ең жоғары қашықтықта есебін алу және үлгілеуге мүмкіндік береді.

**Түйін сөздер:** Ғарыштық нысандар, шағылыс сәулеленуі, радиобайланыс.

## 1 Введение

В мировой практике существует несколько проектов по организации космической радиосвязи где в качестве пассивных ретрансляторов используются искусственные космические объекты. Ранними аналогами предлагаемой системы пассивной радиосвязи являются проекты 60-годов, такие как программы Эхо, Вестфорд и пассивная радиолокация. Отражающими объектами электромагнитных волн, излучаемые передатчиком, являются искусственные космические объекты на околоземной орбите, которые способны рассеивать или направленно отражать электромагнитное излучение рабочего диапазона частот линии связи. С момента запуска первого космического аппарата прошло около 60 лет. До настоящего момента было произведено более 7000 запусков космических объектов. И это не предел. каждую неделю с космодромов производятся запуски новых космических аппаратов.

## 2 Анализ распределения космических объектов на околоземных орбитах

В настоящее время самая большая база данных космических объектов содержит каталог американских служб NORAD. Открытая часть каталога NORAD по состоянию на март 2016 года содержит данные о свыше 40666 объектов на земной орбите, размеры которых превышают 10 см [1]. Среди них есть действующие спутники, части разрушенных спутников, отработанных ступеней ракет и предметов, потерянных во время работ в открытом космосе. Количество объектов размером более 1 см оценивается в 600 тысяч.

По данным американской организации Union of Concerned Scientists на март 2016 года на околоземной орбите 1382 объекта являются активными космическими аппаратами [2].

Американские каталоги содержат данные о кеплеровских элементах орбиты космических объектов, которые позволяют сделать их анализ распределения по основным параметрам для оценки возможности использования искусственных объектов околоземного пространства в качестве отражателей радиоэлектронных средств. В ходе работы проведен анализ распределения космических объектов по высоте, который показывает, что более 35000 космических объектов с размером более 10 см, находятся на высоте до 2500 км от поверхности Земли. В качестве отражателей электромагнитных волн целесообразно использовать космические объекты на высоте от 100 км, количество которых около 7000. Значениями дальности отражающих объектов можно использовать 300, 800 и 1500 км, как высот с наибольшим скоплением объектов.

Анализ распределения космических объектов по наклонению, который определяет ориентацию плоскости орбиты в космическом пространстве показал, что большинство космических объектов находятся на орбитах с высоким наклонением от  $50^\circ$  до  $100^\circ$ . Из анализа распределения космических объектов по эксцентриситету заключено, что орбита большинства искусственных космических тел на околоземной орбите имеет форму окружности или эллипса близкой к круговой орбите.

Важнейшей характеристикой космических объектов является эффективная отражающая площадь, которая является количественной характеристикой способности объекта рассеивать энергию в направлении наземных радиоэлектронных средств. Отражательная способность космических объектов определяется эффективной площадью рассеяния (ЭПР). По результатам анализа каталога Space Track [3] выявлено, что ЭПР более 33 тысяч космических объектов менее  $0,1 \text{ м}^2$ , ЭПР около 6135 космических объектов между  $0,1 \text{ м}^2$  и  $1 \text{ м}^2$ , ЭПР 12500 космических объектов более  $1 \text{ м}^2$ .

### 3 Система радиосвязи. Основные части и принцип действия

Основными составными частями данной системы радиосвязи являются передатчик, приемник, передающая антенна, приемная антенна, эффективная площадь рассеяния объектов, прямой сигнал, отраженный сигнал, антенное и оконечное устройства (рисунок 1). Передатчик системы вырабатывает высокочастотные колебания, которые модулируются по амплитуде, частоте или фазе. Эти колебания подаются в антенное устройство и образуют зондирующий сигнал. Наибольшее применение находит зондирующий сигнал в виде последовательности равноотстоящих по времени коротких радиоимпульсов.

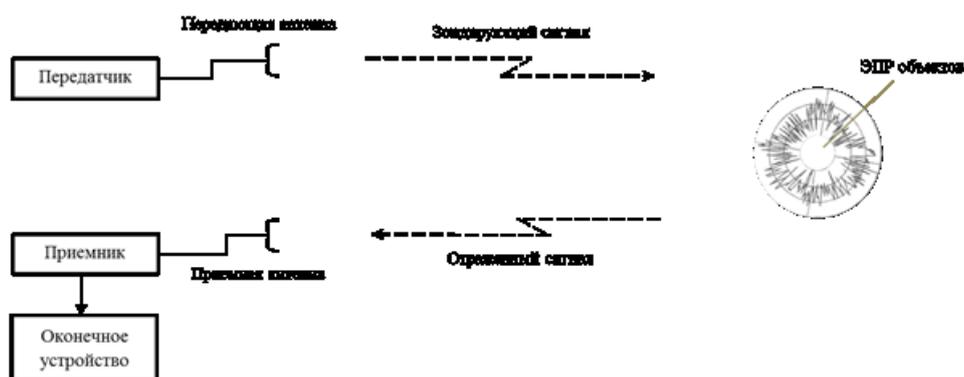


Рисунок 1 – Схема построения системы

После того как электромагнитная волна, падающая на группу объектов, вызывает в ее теле вынужденные колебания электрических зарядов, объект подобно обычной антенне создает свое электромагнитное поле. Это поле представляет собой вторичную, т.е. отраженную, электромагнитную волну, которая является носителем информации. Объектами данной системы являются искусственные космические объекты на околоземных орбитах, которые способны рассеивать или направленно отражать электромагнитное излучение. Объекты вносят неоднородность в свободное пространство. Так как параметры

$\varepsilon_a$  и  $\mu_a$  их поверхности отличаются соответственно от окружающей среды  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$ , чем нарушается постоянство вектора скорости распространения радиоволн. В результате объект преобразует радиоизлучение: часть энергии переотражается, часть – поглощается объектом, переходя в тепло, а другая часть при радиопрозрачности объекта – преломляется, изменяя направление распространения радиоволн. Для рассматриваемой системы интересен случай, когда объект является источником вторичного излучения.

Приемник системы необходим для выделения полезного сигнала из помех (первичная обработка сигнала). Необходимый уровень отраженного от объектов сигнала можно обеспечить следующим образом: увеличить мощность радиопередатчика; увеличить размер и эффективность антенн передающей и принимающей станции; сужение полосы частот, увеличение широты импульса и понижение скорости передачи информации. Оконечное устройство служит для представления сигнала в нужной потребителю форме.

#### 4 Анализ отражательной способности космических объектов

Отражающие свойства объектов зависят от ее размеров (обычно имеется сильная зависимость от площади проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению на РЭС), конфигурации, материала поверхности, длины волны РЭС, ее поляризации, направления облучения. Эффективная отражающая площадь объектов (ЭОП) – это площадь  $\sigma_0$  некоторой фиктивной плоской поверхности, расположенной нормально к направлению падающей плоской волны и являющейся идеальным и изотропным переизлучателем, которая, будучи помещена в точку объекта, создает у антенны РЭС ту же плотность потока мощности, что и реальный объект.

Из определения следует, что полностью переизлучаемая ЭОП мощность

$$P_0 = \Pi_0 \sigma_0, \quad (1)$$

где  $\Pi$  – плотность потока мощности падающей плоской волны у объектов.

Так как на расстоянии  $D$  от объектов вся переизлучаемая мощность равномерно распределяется на поверхности сферы  $4\pi D^2$ , то плотность потока мощности у РЭС

$$\Pi_p = \Pi_0 \sigma_0 / 4\pi D^2. \quad (2)$$

Для разъяснения понятие ЭОП, целесообразно ее выразить через хорошо известные параметры антенн – эффективную площадь  $A(\beta, \varepsilon)$ , коэффициент направленного действия (КНД)  $G'(\beta, \varepsilon)$ , коэффициент полезного действия (КПД)  $\eta_A$  и коэффициент усиления

$$G(\beta, \varepsilon) = G'(\beta, \varepsilon) \eta_A. \quad (3)$$

где аргументы  $\beta$ ,  $\varepsilon$  обозначают азимут и угол места. Мощность, выделяемая из поля падающей волны, имеющей плотность потока мощности  $\Pi_0$ , равна  $P_{0пр} = \Pi_0 A_0$ .

Соответственно мощность вторичного излучения объектов

$$\Pi_{0изд} = \Pi_0 A_0 \eta_0. \quad (4)$$

Если бы объект был изотропным вторичным излучателем, то плотность потока мощности на расстоянии  $D$  у РЭС была бы равна  $\Pi'_0 = \Pi_{\text{изд}}/4\pi D^2$ . С учетом же направленных свойств объектов

$$\Pi_p = \Pi'_p G'_0 = \frac{\Pi_0}{4\pi D^2} A_0 G'_0 \eta_0. \quad (5)$$

Выражение  $\sigma_0 = A_0 G'_0 \eta_0$  имеет размерность площади и характеризует, какую часть энергии падающей радиоволны получает объект ( $A_0$ ), потери энергии во вторичном излучателе ( $\eta_0$ ), направленные свойства вторичного излучения ( $G'_0$ ). ЭОП имеет размерность площади, но не является геометрической площадью, а является энергетической характеристикой, то есть определяет величину принимаемого сигнала и часто выражается в децибелах по отношению к  $\sigma_0 = 1\text{м}^2$ , т. е.  $\sigma_0 = 10 \lg(\sigma_0/1) = 10 \lg \sigma_0$  (иногда относительно квадрата длины волны)

## 5 Уравнение расчета мощности излучателя наземных радиоэлектронных средств

Мощность отраженного излучения зависит от эффективной площади рассеяния (ЭПР)  $S_{\text{эф0}}$  объектов, которая в свою очередь зависит от основных отражающих свойств объектов, такие как размер объекта (площади проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению на РЭС), конфигурация, материал поверхности, длина волны РЭС, ее поляризации, направления облучения. Мощность отраженного сигнала в приемной антенне задается уравнением:

$$P_c = \frac{P_{\text{и}} G_t G_r \lambda^2 S_{\text{эф0}}}{(4\pi)^3 R_1^2 R_2^2 L}, \quad (6)$$

где,  $P_{\text{и}}$  – мощность передатчика, Вт

$G_t$  – коэффициент усиления передатчика, дБ

$G_r$  – коэффициент усиления приемника, дБ. Если используется моностатическая система, коэффициенты усиления передатчика и приемника равны.

$\lambda$  – длина волны, м

$S_{\text{эф0}}$  – эффективная площадь рассеяния объектов,

$L$  – потери системы, дБ

$R_1^2$  – расстояние от передатчика до объектов,

$R_2^2$  – расстояние от объектов до приемника. Если используется моностатическая система, расстояния будут равны.

Это уравнение устанавливает зависимость между мощностью принимаемого сигнала  $P_c$  и мощностью излучения  $P_{\text{и}}$ . Из формулы (6) можно увидеть, что с увеличением расстояния до объектов мощность принимаемого сигнала убывает очень быстро – обратно пропорциональна 4 степени дальности. В этой связи мощность принимаемого сигнала будет мала, а сам сигнал имеет случайный характер. Малая мощность сигнала объясняется большим расстоянием до объектов на околоземных орбитах и поглощением энергии сигнала при его распространении. Случайный характер сигнала является следствием флуктуации отраженного сигнала за счет перемещения отдельных объектов

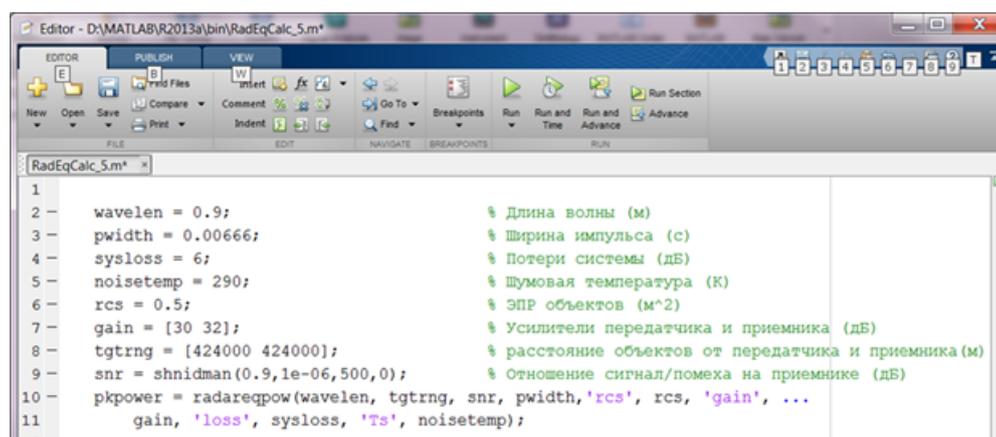
группы при отражении радиоволн, многолучевого распространения радиоволн, хаотических изменений амплитуды сигнала при распространении и ряда других факторов. В результате принимаемый сигнал по виду, интенсивности и характеру изменения похож в приемном тракте на шумы и помехи. Поэтому первой и основной задачей системы является обнаружение полезного радиосигнала, т.е. вынесение решения о присутствии полезного сигнала в поступающей на вход приемного тракта смеси полезного сигнала с помехами, называемой входной реализацией. Эта статистическая задача решается специальным устройством – обнаружителем, в котором стараются использовать алгоритм оптимального обнаружения. Качество процесса обнаружения характеризуют вероятностью правильного обнаружения, когда присутствующий во входной реализации сигнал обнаруживается, и вероятностью ложной тревоги, когда за полезный сигнал принимается помеха, а сам сигнал отсутствует.

## 6 Приложение Radar Equation Calculator

В среде Matlab имеется приложение Radar Equation Calculator, с помощью которого есть возможность определить необходимую мощность сигнала передатчика согласно формуле (6) (рисунок 2). Необходимо ввести данные, такие как длина волны, ширина импульса, потери системы в дБ, шумовая температура и эффективная площадь рассеяния объектов, коэффициент усиления передающей и приемной антенн, отношение сигнал/помеха на приемной антенне (вероятность обнаружения, вероятность ложной тревоги, количество импульсов) и расстояние до объектов. При проведении расчета в приложении Radar Equation Calculator для рассматриваемой системы радиосвязи использовались параметры систем спутниковой связи, наземных радиоэлектронных устройств и данные анализа распределения космических объектов (ЭПР объектов, расстояния от наземных радиоэлектронных средств до космических объектов), которые приведены в таблице 1.

**Таблица 1** – Параметры рассматриваемой системы радиосвязи

Параметр	Значение
Длина волны $\lambda$ , м	0,9
Ширина импульса, мс	6,66
Потери системы $L$ , дБ	6
Шумовая температура,	290
ЭПР объектов $S_{эф0}$ , м <sup>2</sup>	0,5
Усилитель передатчика $G_t$ дБ	30
Усилитель передатчика $G_r$ дБ	32
Расстояние от передатчика до объектов $R_1$ км	424
Расстояние от передатчика до объектов $R_2$ км	424
Отношение сигнал/помеха на приемнике:	
Вероятность обнаружения	0,9
Вероятность ложной тревоги	$10^{-6}$
Количество импульсов	500
<b>Максимальная мощность передатчика, Вт</b>	<b>66,24</b>



```

1
2   wavelen = 0.9;           % Длина волны (м)
3   pwidth = 0.00666;       % Ширина импульса (с)
4   sysloss = 6;            % Потери системы (дБ)
5   noisetemp = 290;        % Шумовая температура (К)
6   rcs = 0.5;              % ЭПР объектов (м^2)
7   gain = [30 32];         % Усилители передатчика и приемника (дБ)
8   tgtrng = [424000 424000]; % расстояние объектов от передатчика и приемника (м)
9   snr = shnidman(0.9,1e-06,500,0); % Отношение сигнал/помеха на приемнике (дБ)
10  pkpower = radareqpow(wavelen, tgtrng, snr, pwidth, 'rcs', rcs, 'gain', ...
11      gain, 'loss', sysloss, 'Ts', noisetemp);
12

```

Рисунок 2 – M-file приложения Radar Equation Calculator

В приведенном примере для обнаружения на оконечном устройстве полезного сигнала максимальная мощность на передатчике будет равна 69,24Вт. Для уменьшения мощности передатчика одним из решений является увеличение количества импульсных сигналов. Результаты вычисления, приведенные на рисунке 3, получены при увеличении количества импульсов от 500 до 5000 с шагом 500 импульсов. При накоплении на приемном устройстве 5000 импульсов с максимальной мощностью 20 Вт есть возможность получить полезный сигнал, переотраженный от группы космических объектов на низкой околоземной орбите на высоте 424 км от поверхности Земли.

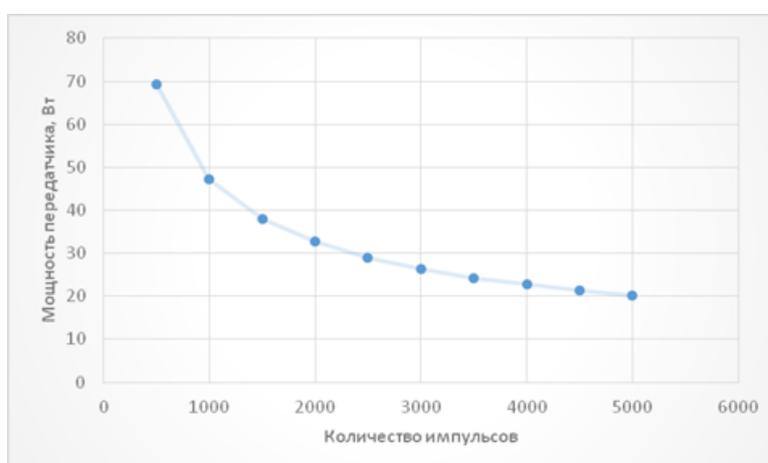


Рисунок 3 – График зависимости мощности передатчика от количества импульсов

## 7 Заключение

Приведены результаты анализа распределения космических объектов по основным параметрам, такие как высота, эксцентриситет и наклонение. Проведен анализ возможностей использования отраженного излучения наземных радиоэлектронных средств от низкоорбитальных спутников Земли. Определены основные составные части данной системы радиосвязи, выявлены характеристики отраженного излучения. Определены основные

параметры уровня мощности излучателя наземных радиоэлектронных средств, проведен анализ основного уравнения расчета мощности излучателя наземных радиоэлектронных средств. Проведен расчет мощности передатчика в среде Matlab с использованием приложения Radar Equation Calculator.

### Литература

- [1] *База данных NORAD космических аппаратов на околоземных орбитах* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://satellitedebris.net/Database/index.php>.
- [2] *База данных активных искусственных спутников Земли* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ucsusa.org/nuclear-weapons/space-weapons/satellite-database.html>
- [3] *Каталог искусственных космических объектов* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.space-track.org/catalog>
- [4] *Финкельштейн М.И.* Основы радиолокации: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1983.
- [5] *Яковлев О.И.* Распространение радиоволн в космосе. – М.: Наука, 1985.
- [6] *Ахмедов Д.Ш., Еремин Д.И., Кемешева Д.Г.* Характеристики обнаружения и обработки информации отраженного излучения наземных радиоэлектронных средств от низкоорбитальных спутников Земли // Материалы международной научно-практической конференции "Инновационные процессы в России и мире". – РФ, Сочи, – 17-19 сентября 2015. – С. 115-120.
- [7] *Yeremin D.I., Kemesheva D.G.* Study of Potential Use of Ground-Based Radioelectronic Equipment Radiation Reflected from Orbital Space Objects // Proceedings of IASTEM International Conference. – Bali, Indonesia, – 2015. – 17 october 2015. – P. 17-19.

### References

- [1] *Database NORAD satellites orbiting the Earth* [electronic resource]. – Access: <http://satellitedebris.net/Database/index.php>.
- [2] *The base of active satellites data* [electronic resource]. – Access: <http://www.ucsusa.org/nuclear-weapons/space-weapons/satellite-database.html>
- [3] *Catalogue of artificial space objects* [electronic resource]. – Access: <https://www.space-track.org/catalog>
- [4] *Finkelstein M.I.* Radiolocation Basics: Textbook for Universities. – M.: Radio i Svyaz, 1983.
- [5] *Yakovlev O.I.* Propagation of Radio Waves in Space. – M.: Nauka, 1985.
- [6] *Akhmedov D.SH., Yeremin D.I., Kemesheva D.G.* Characteristics of detection and information processing of the reflected radiation of land radio-electronic tools from low-orbital satellites of Earth // Materials of the international scientific and practical conference "Innovative Processes in Russia and the World". – Russian Federation, Sochi. – 2015. – 17-19 september 2015 – P. 115-120.
- [7] *Yeremin D.I., Kemesheva D.G.* Study of Potential Use of Ground-Based Radioelectronic Equipment Radiation Reflected from Orbital Space Objects // Proceedings of IASTEM International Conference. – Bali, Indonesia, – 2015. – 17 october 2015. – P. 17-19.