

УДК: 535.243

**МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
С УЧЕТОМ НОВЫХ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ, ВЫЯВЛЕННЫХ
НА ОСНОВЕ СПЕКТРОФОТОМЕТРИИ**

**SPACE OBJECT RECOGNITION SYSTEM MODEL TAKING INTO ACCOUNT
NEW INFORMATIVE FEATURES IDENTIFIED ON THE BASIS
OF THE SPECTROPHOTOMETRY**

Д.С. Федоренко

D.S. Fedorenko

ВКА им. А.Ф. Можайского

Предложена модель системы распознавания космических объектов, которая, в отличие от существующих, позволяет формировать спектры отражения космических объектов и с их учетом осуществлять определение типа космических объектов. Формирование спектров отражения производится по линейному закону на основе смешивания лабораторных спектров отражения материалов и покрытий, что позволяет воспроизводить спектральное распределение отраженного от искусственного спутника Земли потока оптического излучения в видимом диапазоне. Обоснована невозможность существующих в настоящее время наземных наблюдательных средств обеспечить разрешающую способность, требуемую для отдельного наблюдения отдельных конструктивных элементов искусственного спутника Земли, что и определяет необходимость изучения и анализа спектрофотометрической информации, а именно спектров отражения. Модель строится на том предположении, что если отражающая в момент наблюдения поверхность искусственного спутника Земли делится пропорционально в соответствии с долями содержания материалов и покрытий, из которых она состоит, то отраженное излучение передает спектральные характеристики этих материалов в тех же пропорциях.

Ключевые слова: спектр отражения, космический объект, спектрофотометрия, вероятность распознавания.

A model of the space object recognition system is proposed, which, unlike the existing ones, makes it possible to form the reflection spectra of space objects and, taking them into account, to determine the type of space objects. The formation of reflection spectra is performed according to a linear law based on the mixing of laboratory reflection spectra of materials and coatings, which makes it possible to reproduce the spectral distribution of the optical radiation flux reflected from an artificial earth satellite in the visible range. The article substantiates the impossibility of currently existing ground-based observation facilities to provide the resolution required for separate observation of individual structural elements of an artificial earth satellite, which determines the need to study and analyze spectrophotometric information, namely reflection spectra. The model is based on the assumption that if the surface of an artificial earth satellite reflecting at the time of observation is divided proportionally in accordance with the content of the materials and coatings of which it consists, then the reflected radiation transmits the spectral characteristics of these materials in the same proportions.

Keywords: reflection spectra, space object, spectrophotometry, recognition probability.

Введение

Одной из важнейших задач в рамках мониторинга околоземного космического пространства (ОКП) является распознавание космических объектов, которое заключается в принятии решения о принадлежности наблюдаемого объекта к тому или иному известному или новому типу. Системы распознавания (СР), реализующие этот процесс, можно разделить на два вида: автоматизированные и автоматические. К первому относятся системы, предусматривающие участие человека в принятии итоговых решений на основе анализа измерительной информации, в системах второго вида принятие решения о типе космического объекта и весь процесс распознавания осуществляет специализированный вычислительный комплекс на основе определенных алгоритмов.

Анализ значительной части некоординатной информации о наблюдаемых объектах, который заключается в получении признаков распознавания, на сегодняшний день не формализован и требует участия оператора-аналитика. Это обеспечивает расширение признакового пространства в автоматизированных СР и, в свою очередь, прирост вероятности правильного распознавания. Таким образом, в системах данного типа решение о типе наблюдаемого объекта принимается на основе метода экспертной оценки. Основным недостатком таких СР, очевидно, является человеческий фактор, а именно субъективность оценки ряда некоординатных параметров.

Автоматические СР лишены такого недостатка [1], однако существующие системы способны определять только координатные признаки (элементы орбит) [2, 3]. Поэтому разработка модели СР, которая может выявлять новые признаки на основе анализа некоординатной информации и учитывать их в процессе распознавания, является актуальной научной задачей.

Постановка задачи

Анализ различных видов некоординатной информации о космических объектах [4] показал, что в последние годы наиболее эффективными для изучения безатмосферных небесных тел являются спектрофотометрические наблюдения, результатом которых являются спектры отраже-

ния наблюдаемых объектов. Под спектром отражения будем понимать отношение интенсивностей отраженного от объекта потока излучения к падающему, как функцию длины волны [5]. Польза спектрофотометрической информации обусловлена тем, что в ней содержатся данные о составе вещества приповерхностного слоя космического объекта. В случае с наблюдением космических объектов (КО) эти данные можно будет использовать в качестве дополнительных признаков распознавания, обладающих высокой различимостью [4, 6, 7].

Разработка дополнительных блоков, предназначенных для формирования спектрофотометрических измерений и их дальнейшей обработки с целью выделения новых признаков, позволит смоделировать функционирование СР в новых условиях. Для этого необходимо определить физические закономерности формирования спектра отражения КО. Кроме того, с помощью имитации процесса распознавания группы КО модель должна проводить расчет вероятности распознавания, чтобы определять эффект от расширения признакового пространства.

Таким образом, предлагаемая модель позволит решать следующие задачи:

- формирование спектра отражения КО;
- функционирование системы распознавания типов КО;
- расчет вероятности распознавания типов КО.

Разработка модели системы распознавания

Структурная схема модели функционирования системы распознавания типов КО представлена на рис. 1. Данная модель состоит из следующих блоков: БФКП — блок формирования координатных признаков; БФСП — блок формирования спектрофотометрических признаков; БМСН — блок моделирования спектрофотометрических наблюдений; БООСПР — блок определения объема словаря признаков распознавания, БОКСИ — блок определения количества статистических испытаний; БР — блок распознавания; БП — блок подсчета.

Вычисление вероятности распознавания объектов в БР по числу признаков N производится как отношение числа K^* , отражающего количество правильно распознанных объектов, к общему числу экспериментов K .

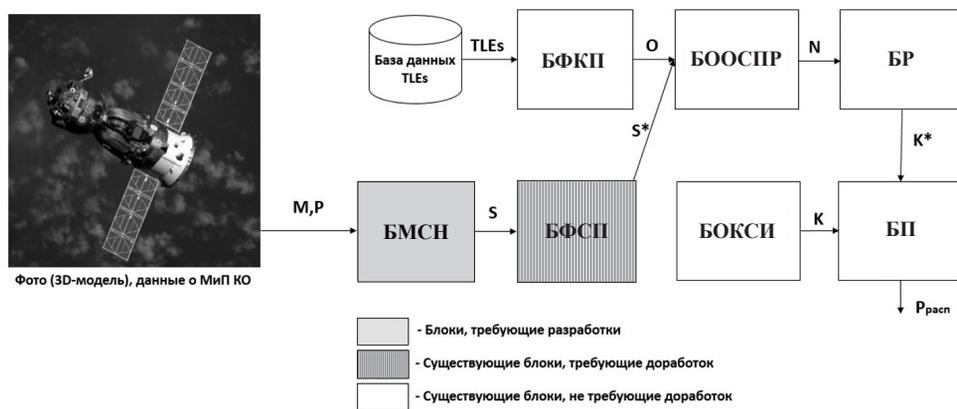


Рис. 1. Структурная схема модели функционирования системы распознавания КО

Входными данными для моделирования является информация о материалах и покрытиях (МиП) КО (M, P), а также элементы орбит (O), вычисленные на основе базы данных TLEs. Результатом моделирования функционирования СП является определение типа распознаваемого КО и расчет вероятности распознавания.

Блок моделирования спектрофотометрических наблюдений

Каждый конструктивный элемент КО (панели солнечных батарей, корпус, антенны, радиаторы и т.д.) покрыт определенным материалом [8]. Как показано на рис. 2, солнечный свет отражается от различных элементов конструкции, и излучение от каждого такого элемента объединяется в общий поток, в результате чего на пикселях ПЗС-приемника регистрируется суммированный сигнал от всех материалов и покрытий КО, видимых при данном ракурсе наблюдения.

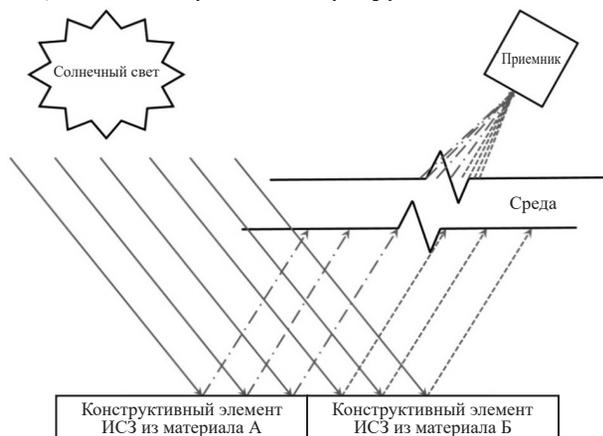


Рис. 2. Схематичное представление линейного принципа формирования спектра отражения

Такая особенность позволяет воспроизводить спектральное распределение отраженного от КО потока оптического излучения для моделирования спектра отражения.

В качестве исходных данных для моделирования спектра отражения КО предлагается использовать следующие параметры:

M — матрица материалов размерностью $m \times n$, в которой m — количество спектральных полос, в которых определены значения спектрального нормально-полусферического коэффициента отражения (СНПКО) МиП; n — количество МиП, присутствующих на видимой в момент наблюдения поверхности КО, элемент матрицы w_{ij} значение спектрального коэффициента отражения j -го МиП в i -й спектральной полосе;

P — матрица долей содержания размерностью $n \times 1$, в которой элемент матрицы p_{j1} — доля содержания j -го МиП на видимой в момент наблюдения поверхности КО;

N — аддитивный шум наблюдения, учитывающий влияние атмосферы, особенности приемника и т.д.

Выходными данными блока моделирования спектрофотометрических наблюдений будут являться:

S — матрица сформированного спектра отражения КО размерностью $m \times 1$.

В ходе моделирования используются следующие ограничения и допущения:

- ориентация видимых в момент наблюдения поверхностей КО совпадает с ориентацией образцов МиП во время лабораторных измерений их СНПКО;

- сумма долей содержания МиП видимых в момент наблюдения поверхностей КО равна 1:

$$\sum p_{j1} = 1;$$

– характер отражения поверхностью КО исключительно диффузный.

Модель строится на следующем допущении: если общая площадь видимой поверхности наблюдаемого объекта делится пропорционально в соответствии с долей содержания присутствующих на ней МиП, отраженное объектом излучение передает в тех же пропорциях характеристики соответствующих материалов. В этом смысле существует линейная связь между пропорциями МиП, составляющих видимую в момент получения спектра поверхность, и спектром отраженного излучения.

Тогда умножение матриц **M** и **P** даст матрицу **S**, которая и будет являться полученным в результате наблюдения спектром отражения КО:

$$\mathbf{M}_{m \times n} \times \mathbf{P}_{n \times 1} + N = \mathbf{S}_{m \times 1}.$$

Для формирования матрицы **M** используется база данных эталонных спектров отражения (БДЭСО), которая построена на основе [9].

Данные о долях содержания МиП берутся на основе анализа фотографии КО с того же ракурса, что ожидается во время сеанса наблюдений (при наличии таких фотографий), либо на основе анализа 3-d моделей КО (рис. 1). Последний вариант является более предпочтительным, так как позволяет изучать все возможные ракурсы, определяя таким образом все возможные комбинации долей содержания МиП и привязывая эти значения к спектрофотометрическому портрету определенного типа КО.

Задачу моделирования спектра отражения КО предлагается решать в соответствии со следующей схемой (рис. 3) [10].

Данная схема реализована в среде программирования LabView (рис. 4) [11]. Черными рамками выделены области, моделирующие соответствующие блоки схемы.

Анализ результатов

Представлены результаты моделирования реального космического аппарата (КА) — пилотируемого космического корабля (ПКК) «Со-

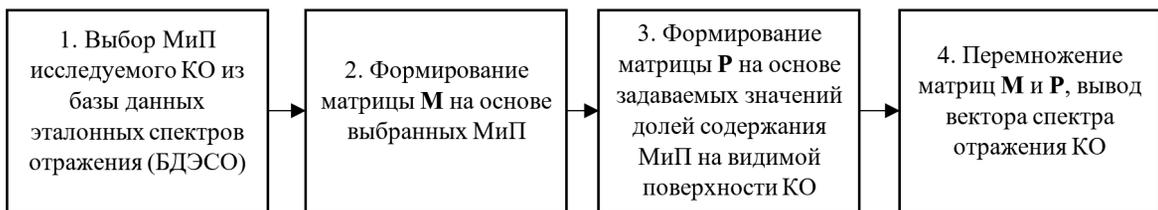


Рис. 3. Блок-схема моделирования спектра отражения КО

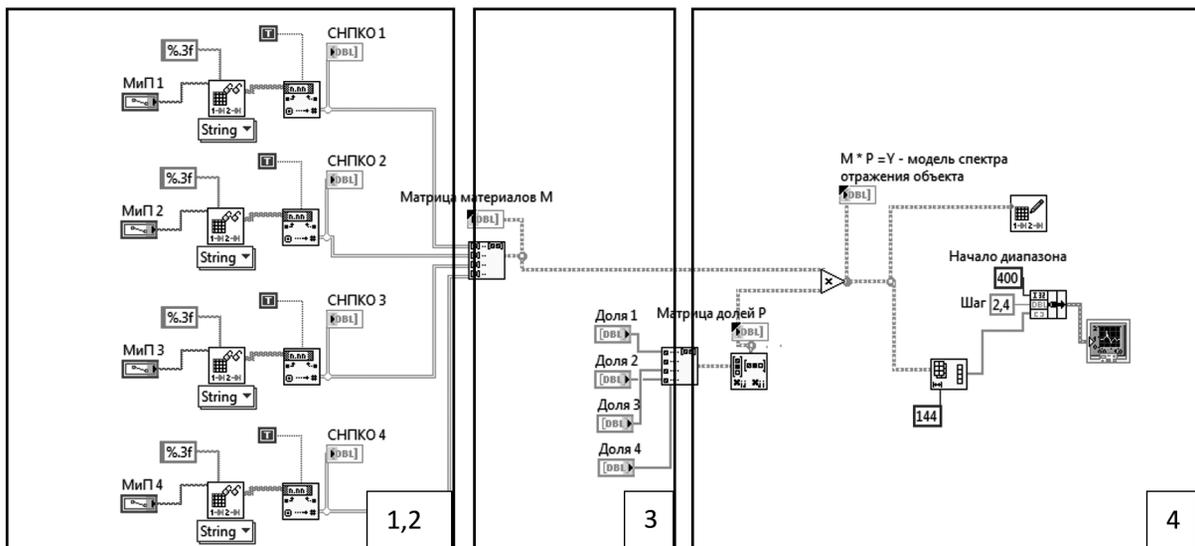


Рис. 4. Реализация модели формирования спектра отражения КО в среде программирования LabView



Рис. 5. Пилотируемый космический корабль «Союз-ТМА»

юз-ТМА» (рис. 5). Это низкоорбитальный объект, однако в текущем контексте высота орбиты не является принципиальной, и выбор был сделан в пользу объекта, чьи изображения есть в широком доступе и в хорошем качестве. Визуально по фотографии были определены МиП и доли их содержания, в соответствии с этими данными (табл.) построен спектр отражения (рис. 6).

Таким образом, разработанный блок моделирования спектрофотометрических наблюдений позволяет, в отличие от существующих, получить спектр отражения КО, конструкция которого включает несколько МиП. Как правило, по уже известным типам КО есть априорная информация о внешнем облике и составе МиП (открытие источники, результаты оптических наблюдений). Эти данные можно использовать для моделирования спектров отражения соответствующих объектов, тем самым обучая СР: для каждого типа КО будет формироваться, так называемый, спектрофотометрический портрет [6, 12], включающий различные вариации моде-

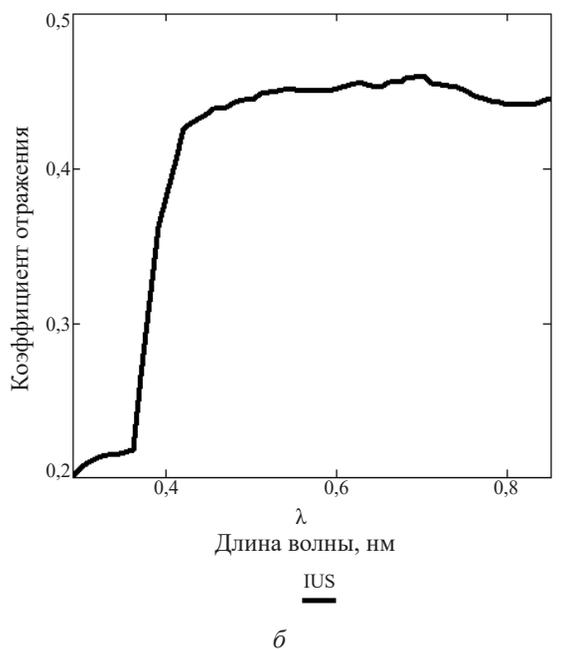
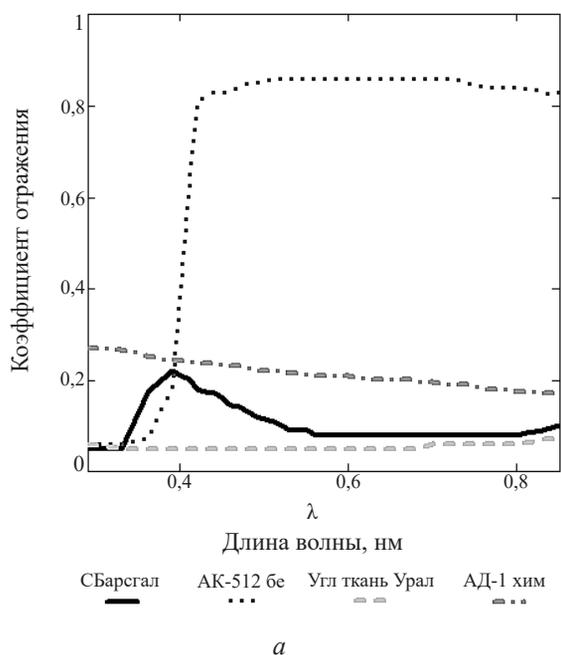


Рис. 6. а — лабораторные спектры отражения МиП; б — смоделированный спектр отражения ПКК «Союз-ТМА»

Таблица

Доли содержания МиП ПКК «Союз-ТМА»

Конструктивный элемент / МиП	Доля содержания
Солнечные батареи / арсенид галия	0,4
Корпус / углеродная ткань «Урал»	0,45
Двигатель / белая эмаль АК-573	0,1
Др. элементы / алюминиевый сплав АД-1	0,05

лированных спектров отражения в зависимости от возможных ракурсов наблюдения. Адекватность модели была подтверждена экспериментально в работе [13, 14].

При поступлении реальных спектров отражения будет осуществляться сопоставление полученных значений новых признаков распознавания с каталогизированными. В случае совпадения принимается решение о принадлежности к определенному типу, в обратном случае — решение о новом типе КА. Данные операции производятся в блоке распознавания БР.

Таким образом, разработанный блок моделирования спектрофотометрических наблюдений позволяет правдоподобно воспроизводить спектральное распределение отраженного от КО потока оптического излучения.

Заключение

Разработанная модель функционирования системы распознавания космического объекта с учетом новых информативных признаков, выявленных на основе спектрофотометрии, в отличие от существующих, позволяет:

- формировать спектр отражения КО, конструкция которого включает несколько материалов и покрытий;
- описывать функционирование системы распознавания КО;
- производить расчет вероятности распознавания типов КО в зависимости от объема словаря признаков распознавания.

Полученные в ходе моделирования данные необходимы для создания и последующей верификации методик обработки результатов спектрофотометрических наблюдений, предназначенных для решения обратной задачи — по полученному наблюдательным средством спектру отражения неизвестного КО определить состав и доли содержания МиП на видимой поверхности объекта, а также осуществить его распознавание.

Литература

1. Гудаев Р.А. Применение информации, получаемой от средств радиотехнического контроля, для решения задач распознавания космических аппаратов / Д.А. Рогов, Р.В. Катьо-

ха, Р.А. Гудаев, С.В. Логунов // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского. 2015. Выпуск 647. С. 137–142.

2. Курышев В.И. Оптические наблюдения космических объектов / В.И. Курышев — М.: Воениздат. 1973. 495 с.

3. Горелик А.Л. Методы распознавания: учеб. пособие для вузов / А.Л. Горелик, В.А. Скрипкин. — М.: Высшая школа. 2004. 262 с.

4. Бусарев В.В. Спектрофотометрия астероидов и ее приложения / В.В. Бусарев. — Саарбрюккен: LAP LAMBERT Acad. Publish. GmbH & Co. KG. 2011. 250 с.

5. Вязьмин С.Ю. Электронная спектроскопия органических соединений / С.Ю. Вязьмин, Д.С. Рябухин, А.В. Васильев. — СПб: СПбЛТА. 2011. 43 с.

6. Логунов С.В. Определение конструктивных особенностей вращающегося геостационарного спутника на основе анализа двухцветных диаграмм / С.В. Логунов, А.В. Черногубов, Д.С. Федоренко // Вопросы радиоэлектроники, сер. «Техника телевидения». 2018. № 4. С. 34–41.

7. Логунов С.В. Совместная обработка и анализ некоординатной информации о геостационарном спутнике для определения конструктивных особенностей / С.В. Логунов, А.М. Качуро, А.В. Черногубов, Д.Ю. Колесник // Вопросы радиоэлектроники, сер. «Техника телевидения». 2018. № 2. С. 61–69.

8. Панасюк М.И. Модель космоса: научно-информационное издание: В 2 т. / Под ред. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. — М.: КДУ. 2007. 1144 с.

9. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621706. Отражательно-излучательные характеристики материалов и покрытий объектов ракетно-космической техники в широком оптическом диапазоне / Каменев А.А., Полуян М.М., Солюянов А.А., Честа О.И., Лебедев В.И. Зарегистрировано в Реестре баз данных 09.12.2014.

10. D.S. Fedorenko, K.E. Legkov. «Modeling of the high-orbital satellite reflection spectrum based on materials and coatings laboratory reflection spectra», 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications Conference. — Moscow. 2020. С. 9078649.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020611982. Программный комплекс моделирования спектров отражения космических объектов на основе лабораторных спектров отражения материалов и покрытий / Федоренко Д.С. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12.02.2020.

12. Логунов С.В. Моделирование процесса спектрофотометрирования искусственного спутника Земли / С.В. Логунов, А.В. Черногубов, Д.С. Федоренко // Вопросы радиоэлектроники, сер. «Техника телевидения». 2019. Вып. 1. С. 10–21.

13. Jason B Rapp. Identification of orbital objects by spectral analysis and observation of space environment effects. San Luis Obispo. 2012.

14. D.S. Fedorenko, K.E. Legkov. «Verification of the Model Forming the Space Object Reflection Spectrum Based on Normal-Hemispheric Reflection Coefficients of Reflection of Materials and Coatings», 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems Conference. — St. Petersburg. 2020. С. 7563391

References

1. Gudayev R.A., Rogov D.A., Katyukha R.V., Logunov S.V. Application of information received from radio engineering control facilities for solving problems of space vehicle recognition // Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy. Issue 647. 2015. P. 137–142.

2. Kuryshv V.I. Optical observations of space objects. — Moscow: Voenizdat. 1973. 495 p.

3. Gorelik A.L., Skripkin V.A. Recognition methods. — Moscow: Vysshaya shkola. 2004. 262 p.

4. Busarev V.V. Spectrophotometry of asteroids and its applications. Saarbrücken: LAP LAMBERT Acad. Publish. GmbH & Co. KG. 2011. 250 p.

5. Vyaz'min S.Y., Ryabukhin D.S., Vasil'iev A.V. Electron spectroscopy of organic compounds. — Saint-Petersburg: SPbLTA. 2011. 43 p.

6. Logunov S.V., Chernogubov A.V., Fedorenko D.S. Determination of design features of a rotating geostationary satellite based on the analysis of two-color diagrams. Voprosy radioelektroniki, ser. «Tekhnika televideniya». № 4. 2018. P. 34–41.

7. Logunov S.V., Kachuro A.M., Chernogubov A.V., Kolesnik D.Y. Joint processing and analysis of non-coordinate information about a geostationary satellite for determining design features. Voprosy radioelektroniki, ser. «Tekhnika televideniya». № 2. 2018. P. 61–69.

8. Panasyuk M.I., Novikova L.C. Model of space: scientific and informational publication: In 2 vols. Vol. 2: Impact of the space environment on materials and equipment of space vehicles. — Moscow: KDU. 2007. 1144 p.

9. Certificate of state registration of the database № 2014621706. Reflective and radiative characteristics of materials and coatings of objects of rocket and space technology in a wide optical range / Kamenev A.A., Poluyan M.M., Soluyanov A.A., Chesta O.I., Lebedev V.I. Registered in the Database Registry on 09.12.2014.

10. Fedorenko D.S., Legkov K.E. Modeling the reflection spectrum of high-orbit satellites based on laboratory reflection spectra of materials and coatings, 2020 Systems for generating and processing signals in the field of onboard communications conference. — Moscow. 2020. С. 9078649.

11. Certificate of state registration of the computer program № 2020611982. Software package for modeling the reflection spectra of space objects based on laboratory reflection spectra of materials and coatings / Fedorenko D.S. Registered in the Register of Computer Programs 12.02.2020.

12. Logunov S.V., Chernogubov A.V., Fedorenko D.S. Modeling of the process of spectrophotometry of an artificial satellite of the Earth. Voprosy radioelektroniki, ser. «Tekhnika televideniya». № 1. 2019. P. 10–21.

13. Jason B Rapp. Identification of orbital objects using spectral analysis and observation of the impact of the space environment. San Luis Obispo. 2012.

14. Fedorenko D.S., Legkov K.E. Verification of a model for forming the reflection spectrum of a space object based on normal-hemispherical reflection coefficients of materials and coatings, 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems Conference. — St. Petersburg. 2020. С. 7563391.