

## Методы и средства моделирования систем дистанционного зондирования Земли из космоса

*А.В. Демин, А.В. Денисов*

*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург*

**Аннотация:** В данной работе рассмотрены методы и средства моделирования системы дистанционного зондирования поверхности Земли из космоса в оптическом диапазоне спектра излучения с целью оптимизации ее структуры и функциональных параметров. Структуру сложной информационно-измерительной системы дистанционного зондирования исследовать экспериментальным натурным путем очень сложно и весьма дорого в связи с симбиозом различных физических и технологических процессов происходящих в ней. Выход лежит в совокупном применении натурального и математического моделирования с применением современных IT-технологий, как на этапе создания, так и на этапе эксплуатации, с целью повышения методов и средств проектирования, а также улучшения контроля параметров аппаратуры перспективных космических систем (спектрального диапазона, физической светосилы, линейного разрешения на местности и производительности самой системы).

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование поверхности Земли, космическая система, система приема и преобразования информации, объектив, приемная оптическая система, подстилающая поверхность Земли, космическая съемка, линейное разрешение на местности.

Свое развитие дистанционное зондирование поверхности Земли (ДЗЗ) из космоса в оптическом диапазоне спектра излучения ( $\sim 0,4 \div 1,2$  мкм) получило в конце 60-х и начале 70-х годов прошлого столетия. Аппаратура (на тот момент только осваивалась область не только ДЗЗ, но и всего космоса) первых космических средств дистанционного зондирования была трассового типа и определялась проекцией области измерений, на подстилающую поверхность Земли, представляющую собой линию. На сегодняшний момент в приемной оптической аппаратуре устанавливаются перспективные сканерные матрицы на базе приборов зарядовой связи. Они позволяют получать пространственную информацию, как о географических, так и техногенных процессах о поверхности Земли в видимом и инфракрасном диапазонах длин электромагнитных волн [1, 2]. Как правило, съемка из космоса происходит в панхроматическом и мультиспектральном

---

режимах, позволяя тем самым получать пространственное изображение в различных диапазонах спектра излучения [3].

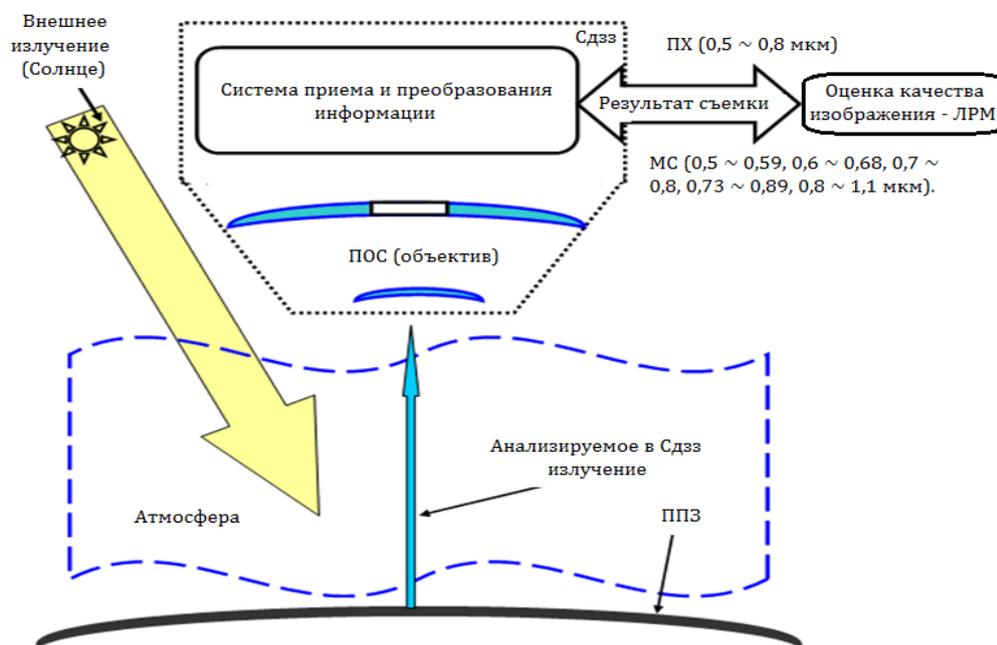


Рис. 1. – Принцип дистанционного зондирования поверхности Земли в оптическом диапазоне спектра излучения

Панхроматическая съемка (ПХ) занимает весь видимый диапазон электромагнитного спектра излучения ( $\sim 0,5 \div 0,8$  мкм) и тем самым представляются в градациях черно-белых (серых) цветов и обладает более высоким линейным разрешением, чем мультиспектральная съемка (МС). Где, система приема и преобразования информации формирует несколько отдельных изображений для широких спектральных зон в следующих диапазонах  $\sim 0,5 \div 0,59, 0,6 \div 0,68, 0,7 \div 0,8, 0,73 \div 0,89, 0,8 \div 1,1, 0,9 \div 1,1$  мкм [4].

Из представленных в таблице № 1 тактико-технических характеристик, и в соответствии с процессом приема и преобразования информации в оптическом диапазоне, представленном на рис. 1, можно говорить о том, что съемка из космоса является нестационарным процессом, захватывающим многие области науки, результатом которого является не только

правильность работы всех звеньев системы, но и обеспечение количественного показателя на выходе – линейного разрешения на местности [5].

Таблица № 1

Качественные и количественные характеристики действующих систем дистанционного зондирования

Наименование КА	Страна-изготовитель	H, км	Режим съемки		Наклон КА, град	Периодичность съемки в сутки	Полоса захвата, км	Линейное разрешение на местности, м	
			ПХ	МС				ПХ	МС
GeoEye-1	США	770	+		98,1	2,3	15,2	0,46	1,65
Pleiades-1A, 1B	Франция	705	+		98,2	1	20	0,5	2,0
Ресурс-ДК1	Россия	360 - 604	+		64,8; 64,9; 70,0; 70,4	6	От 4,7 до 28,3	1	2-3
DubaiSat-2	Корея	600	+		97,8	Не доступно	12	1	4

Получаемую со спутника информацию можно рассматривать как результат прохождения ее от подстилающей поверхности Земли (ППЗ) через оптико-электронный тракт, состоящий из атмосферы и ее возмущений, системы приема и преобразования информации (СППИ) и объектива. Модель дистанционного зондирования в рамках теории линейных систем в виде следующего функционала

$$A_{Сдзз} = \{B_{Атмосферы} \otimes C_{Атм.возмущений} \otimes D_{Съемки} \otimes E_{СППИ} \otimes F_{Объектива}\}, \quad (1)$$

где

$\{B_{Атмосферы} \otimes B_{Атм.возмущений} \otimes C_{Съемки} \otimes D_{СППИ} \otimes E_{Объектива}\}$  – суперпозиции оптических свойств атмосферы, оптических возмущений, изображение объекта съёмки и способов приёма и обработки оптической информации.

В связи с вышесказанным при разработке сложных космических систем особенно широкое применение находят методы и средства математического моделирования, которые по сравнению с методами натурального и полунатурного моделирования обладают явными преимуществами в плане ресурсных и временных затрат. Поэтому математическое моделирование с применением IT-технологий является неизбежной составляющей научно-технического и технологического прогресса. Различными аспектами моделирования посвящено немало работ, и все они рассматривались и изучаются на данный момент времени для различных процессов – от экономических до физических. Но, как правило, для исследования сложных космических систем применяются в основном два типа математических моделей – аналитическое и имитационное. Классификация методов моделирования представлено на рис. 2 [6].

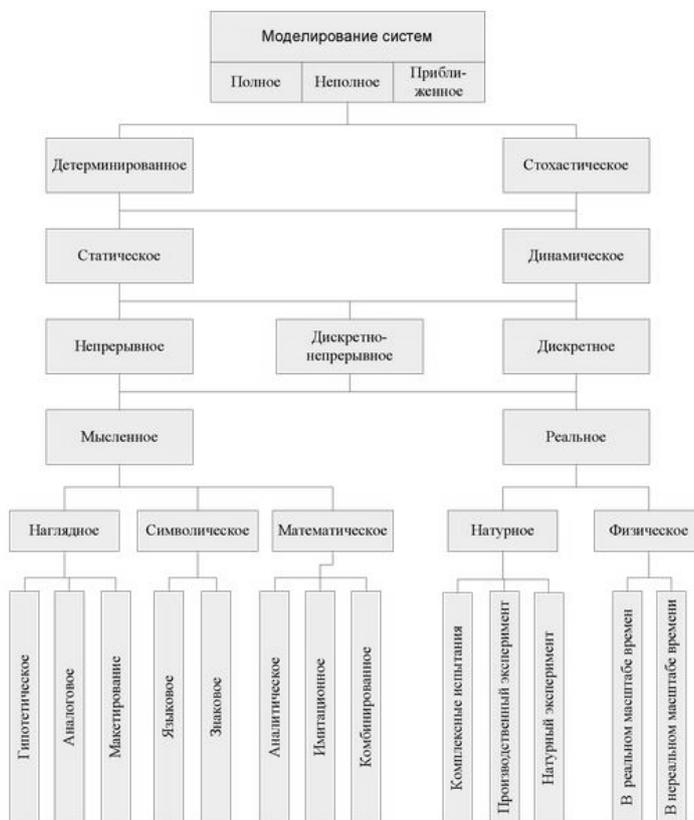


Рис. 2. – Классификация методов моделирования

Аналитическое и имитационное моделирование часто противопоставляются друг другу, в связи с тем, что общий функционал системы имитационной модели дистанционного зондирования составляется в виде одного или нескольких уравнений. А отличием аналитического подхода, является, то, что динамика космической системы учитывается при составлении функционала, а не реализуется в виде последовательностей операций. Остановимся на плюсах и минусах для данных методов чуть подробнее.

Аналитические модели позволяют произвести наиболее полное исследование только в том случае, если получены явные аналитические зависимости, связывающие в полной мере вход и выход системы при известных начальных условиях, что возможно для сравнительно несложных моделей. Для сложных же систем, в которых явления и процессы, в них происходящие, многопараметричны и многообразны, что, именно, и имеет место, в частности, в системах дистанционного зондирования из космоса [7].

В этой связи, метод математического имитационного моделирования позволяет осуществить численное моделирование поведения подсистем космической системы ДЗЗ и их взаимодействия с учетом возмущений различной природы в течение заданного или формируемого периода времени. Тем самым, стоит говорить о том, что имитационная модель есть специальный аппарат, связывающий натуральный и виртуальный эксперимент в едином программно-аппаратном комплексе, имитирующий полное функционирование системы дистанционного зондирования поверхности Земли в оптическом диапазоне спектра излучения с сохранением всех физических и технологических процессов. Блок-схема имитационного моделирования системы дистанционного зондирования одним из многочисленных способов представлена на рис. 3 [8].

---

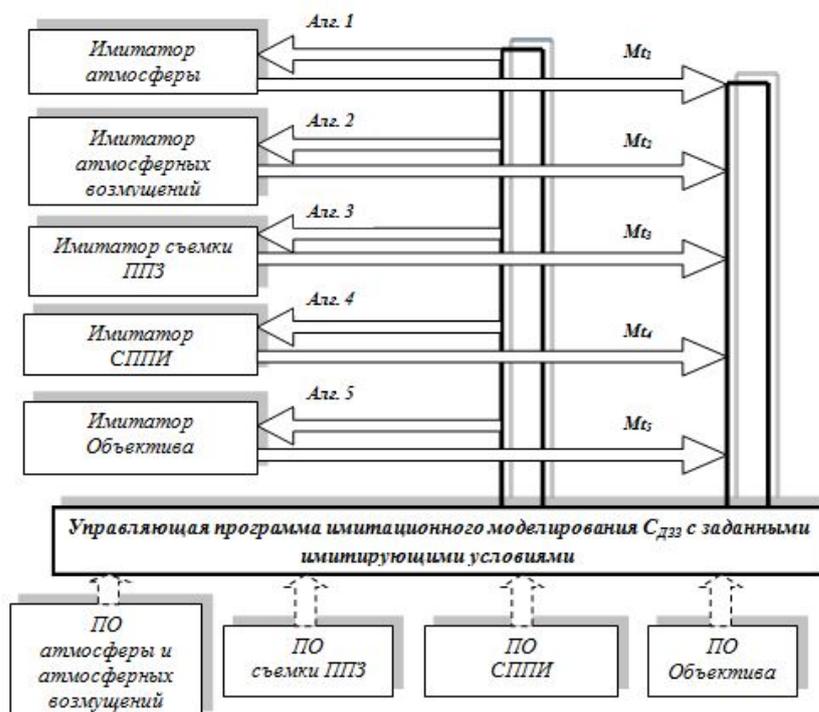


Рис. 3. – Блок-схема имитационного моделирования способом просмотра активностей блоков

Где

$M_t$  – модельное время имитируемого блока системы ДЗЗ ( $C_{ДЗЗ}$ ); Алг – алгоритм имитации каждого имитируемого блока; ПО – программное обеспечение имитационного моделирования  $C_{ДЗЗ}$  по принятым аналитическим соотношениям.

Также следует отметить, что для имитационного моделирования применяются следующие методы:

- моделирование способом составления расписаний событий;
- моделирование транзактным способом;
- моделирование агрегатным способом;
- моделирование процессным способом.

Перспективность же метода способом просмотра активностей блоков состоит в том, что он является наиболее удобным по сравнению с выше представленными методами для имитационного моделирования системы

ДЗЗ. Его преимущество, заключается в том, что представление системы в виде активируемых блоков позволяет в процессе моделирования управлять и изменять тактико-технические характеристики модели дистанционного зондирования, что крайне удобно при поиске оптимальных проектных решений.

Имитационная модель системы дистанционного зондирования является отображением функционирования подсистем реального опытного образца. При этом ее, возможно, отобразить в различных математических соотношениях: математической структурной формой первого порядка, системой уравнений, макромоделью, дифференциальных уравнений, в виде пространственно-временной кинематической модели и других видах. Также имитационную модель ДЗЗ можно представить в матричном виде, где учитывается вся структура космической системы, которая (может быть) по сравнению с моделью дифференциальных уравнений имеет довольно простой вид, но сохраняет структуру модели в цельном виде в процессе всей имитации. Таким образом, общую имитационную модель  $S_{ДЗЗ}$  можно представить в следующем матричном виде (2)

$$\begin{bmatrix} (\bar{\chi})' \\ (\bar{\xi})' \\ F'_{Объектива} \end{bmatrix} = A_{ДВ} \left\{ F_{Од Объектива} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{Объектива} \end{bmatrix} + E_{СППИ} \begin{bmatrix} \bar{\chi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + B_{АТМ} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\xi} \\ 0 \end{bmatrix} + C_{АТМ.возмущений} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\xi} \\ 0 \end{bmatrix} \right\} + M_{КОЭФ} \cdot \bar{D}_{СЪЕМКИ}, \quad (2)$$

где

$F_{Объектива}$  – матрица хода лучей, входящих в объектив;  $F'_{Объектива}$  – матрица лучей, выходящих из объектива;  $F_{Од Объектива}$  – матрица, представляющая собой оператор действия;  $E_{СППИ}$  – матрица действия СППИ;  $\bar{\chi}$  – вектор параметров СППИ;  $A_{ДВ}$  – матрица, учитывающая движение  $S_{ДЗЗ}$  по орбите;  $B_{АТМ}$  – матрица действия атмосферы;  $C_{АТМ. возмущений}$  – матрица

действия помех, фонов, дымки, турбулентности и т.д.;  $\bar{\xi}$  – вектор параметров помех, фонов, дымки, турбулентности и т.д.;  $\bar{D}_{\text{СЪЕМКИ}}$  – вектор управления съёмкой;  $M_{\text{КОЭФ}}$  – матрица постоянных коэффициентов  $S_{\text{ДЗЗ}}$ .

В связи с вышесказанным, представим основные имитационные модели дистанционного зондирования поверхности Земли в оптическом диапазоне спектра излучения. Для этого воспользуемся представленной математической моделью (2), где построен процесс взаимодействия системы ДЗЗ с ППЗ образуя последовательность передачи оптико-электронного тракта: « $S_{\text{ДЗЗ}}$  – атмосфера – граница действия возмущений – спектральный диапазон (входной сигнал) – поверхность Земли – спектральный диапазон (выходной сигнал) – граница действия возмущений – атмосфера –  $S_{\text{ДЗЗ}}$ ».

На системном уровне СППИ представима в виде пространственного фильтра, характеризуемая функцией рассеяния (импульсная реакция)  $H_0(x', y')$ , или в виде оптической передаточной функции (ОПФ)  $\tilde{H}_0(v_x, v_y)$ . Кроме этого, геометрические и энергетические преобразующие свойства оптической системы описываются спектральным коэффициентом пропускания  $\tau_0(\lambda)$ . Распределение полезной составляющей спектральной освещенности в плоскости изображения  $x', y'$  СППИ связано с распределением спектральной ППЗ следующим выражением

$$E_\lambda(x', y') = \tau_a(\lambda) \cdot \tau_0(\lambda) \cdot \pi \cdot \sin^2 \sigma'_{A'} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L_\lambda(\xi, \eta) \cdot H_{0\lambda}(x', -\xi, y', -\eta) \cdot d\xi \cdot d\eta, \quad (3)$$

где

$L_\lambda(\xi, \eta)$  – распределение спектральной яркости пространства съёмочного объекта, отнесенного к координатам плоскости изображения;

$\sigma'_{A'}$  – заданный апертурный угол съёмки;

$\tau_a(\lambda)$  – спектральный коэффициент пропускания атмосферы.

В пространственно-частотной области соотношению (4) эквивалентно выражение (3), связывающее спектры входного  $\bar{L}_\lambda(x', y')$  и выходного  $\bar{E}_\lambda(x', y')$  сигналов через ОПФ СППИ

$$\bar{E}_\lambda(v_{x'}, v_{y'}) = \bar{H}_{0\lambda}(v_{x'}, v_{y'}) \cdot \bar{L}_\lambda(x', y'), \quad (4)$$

где

$\bar{H}_{0\lambda}(v_{x'}, v_{y'})$  – Фурье-образ нормированной функции рассеяния  $H_{0\lambda}(x', y')$  для излучения с длиной волны  $\lambda$ .

$$\bar{H}_{0\lambda}(v_{x'}, v_{y'}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H_{0\lambda}(x', y') \exp(-i2\pi(v_{x'} \cdot x' + v_{y'} \cdot y')) dx' \cdot dy'. \quad (5)$$

Рассмотрим общие соображения по синтезу вида функции рассеяния ОПФ объектива космической системы. В качестве первого приближения принимается, что объектив не имеет aberrаций, а качество формируемого в СППИ изображения ограничено лишь дифракцией на входном зрачке [9]. В этом случае функция рассеяния для объектива с круглым зрачком без экранирования имеет вид

$$H_0(x', y') = \left[ \frac{2J_1(u)}{u} \right]^2, \quad (6)$$

где

$J_1(u)$  – функция Бесселя первого рода первого порядка.

$$u = \frac{\pi D}{\lambda f'_0} \sqrt{x'^2 + y'^2}, \quad (7)$$

а ОПФ –

$$\bar{H}_{0\lambda}(v_r) = \frac{2}{\pi} \left[ \arccos\left(\frac{v_r}{v_M}\right) - \frac{v_r}{v_M} \sqrt{1 - \left(\frac{v_r}{v_M}\right)^2} \right], \quad (8)$$

где

$v_M = \frac{D_0}{\lambda f'_0}$  – предельная пространственная частота;

$$v_r = \sqrt{v_x'^2 + v_y'^2}. \quad (9)$$

Для сложных многозвенных объективов более точной аппроксимацией полихроматической функции рассеяния является двумерная функция Гаусса

$$G_0(x', y') = \frac{1}{2\pi r_0^2} \exp\left(-\frac{x'^2 + y'^2}{2r_0^2}\right), \quad (10)$$

где

$r_0$  – эффективный радиус пятна рассеяния объектива.

ОПФ в этом случае имеет вид

$$\check{H}_N(v_x, v_y) = \exp[-2\pi^2 \cdot r_0^2 (v_x'^2 + v_y'^2)].$$

При проектировании космической системы, в соответствии с задачами наблюдения, ОПФ СППИ с объективом должна иметь достаточно высокий уровень на пространственных частотах, необходимых для обеспечения заданной величины линейного разрешения на местности.

Например, спутники двойного назначения GeoEye-1 и WorldView-II реализованные в США обеспечивают просмотр ППЗ с проекцией пиксела в панхроматическом канале 0,41 ~ 0,46 м соответственно, первый в полосе захвата 15,2 км, а второй – 16,4 м с высоты орбиты 770 км и 684 км соответственно. При этом масса первого КА составляет 1955 кг, а масса второго – 2800 кг, диаметр входного зрачка телескопа – 1,1 м для обоих КА, эффективная длина строки СППИ – порядка 36 000 пикселей. Наблюдение производится одновременно в панхроматическом и мультиспектральном спектральных диапазонах съемок. Число спектральных диапазонов мультиспектрального канала в первом КА 4, а во втором – 8.

При описании линейного разрешения на первом этапе определяется разрешающая способность системы в фокальной плоскости. Вычисляется зенитный угол  $\zeta$  КА из точки наблюдения [10]

$$\zeta = \arcsin\left(\frac{R_3 + H_{КА}}{R_3} \cdot \sin\theta\right), \quad (11)$$

где

$\theta$  – угол визирования на объект наблюдения относительно местной вертикали;

$R_3 = 6371$  км – средний радиус Земли;

$H_{КА}$  – высота космического аппарата над поверхностью Земли.

Далее рассчитывается наклонная дальность съемки

$$D_H = R_3 \cdot \frac{\sin(\zeta - \theta)}{\sin\theta}, \quad (12)$$

затем в соответствии с определением оцениваемого показателя, линейное разрешение на местности представляется в следующем виде

$$\Delta L(v) = \frac{D_H}{2 \cdot v^* \cdot f \cdot \cos(\zeta)}, \quad (13)$$

где

$f$  – фокусное расстояние объектива;

$v^*$  – значение разрешаемой частоты в изображении, штр/мм.

Таким образом, в данной публикации в соответствии с теорией систем были рассмотрены и проанализированы методы и средства моделирования системы дистанционного зондирования поверхности Земли в оптическом диапазоне спектра излучения. Показано, что имитационное моделирование на примере способа просмотра активностей блоков позволяет выполнить целенаправленное исследование опытного образца системы с целью оптимизации ее структуры и тактико-технических параметров. Приведены некоторые имитационные процессы и модели оптических информационно-измерительных систем дистанционного зондирования.

### Литература

1. Гермак О.В. Использование данных дистанционного зондирования для экологического мониторинга опустынивания // Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2167](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2167).

2. Кузнецов К.К. Имитационное моделирование взаимосвязи инициаторов высокотехнологичных инноваций // Инженерный вестник Дона,

---



2009, №14 URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2009/250](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2009/250).

3. Кутузов С. А., Марданова М. А., Осипков Л. П., Старков В. Н. Проблемы математического моделирования космических систем. – СПб: СОЛО, 2000 г. С. 228.

4. Демин А.В., Денисов А.В. «Моделирование функционально-параметрических характеристик систем дистанционного зондирования поверхности Земли в оптическом диапазоне спектра излучения». Южно-Сибирский научно-технический вестник, выпуск № 1 (9). 2015 г. – С. 46-49.

5. Данные геоинформационной системы и космического мониторинга СОВЗОНД. – URL: [sovzond.ru](http://sovzond.ru).

6. Демин А. В., Копорский Н. С. Имитационное моделирование информационно-измерительных и управляющих систем: Монография. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007 г. С. 139.

7. Малышев А.К., Ростиславский М.Б. К вопросу об оптимизации метода свободного поиска // Всероссийская компьютерная конференция «Поисковые алгоритмы в XXI веке». М.: Прогрессор, 2013. С. 175-186.

8. Торшина И. П. Компьютерное моделирование оптико-электронных систем первичной обработки информации. – М.: Университетская книга; Логос, 2009 г. С. 248.

9. John R Jensen. Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective (2nd Edition). – М: Prentice Hall, 2006. P. 608.

10. Thomas Lillesand, Ralph W. Kiefer, Jonathan Chipman. Remote Sensing and Image Interpretation. – М: Wiley, 2007. P. 469.

### References

1. Germak O.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2167](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2167).

2. Kuznecov K.K Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2009, №14 URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2009/250](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2009/250).



3. Kutuzov S. A., Mardanova M. A., Osipkov L. P., Starkov V. N. Problemy matematicheskogo modelirovaniya kosmicheskikh system [Problems of mathematical modeling of space systems]. SPb.: SOLO, 2000. p. 228.
4. Demin A.V., Denisov A.V. Juzhno-Sibirskij nauchno-tehnicheskij vestnik, vypusk № 1 (9) 2015. pp. 46-49.
5. Dannye geoinformacionnoj sistemy i kosmicheskogo monitoringa SOVZOND. URL: sovszond.ru.
6. Demin A. V., Koporskij N. S. Imitacionnoe modelirovanie informacionno-izmeritel'nyh i upravljajushhih sistem: Monografija. [Simulation data-measuring and control systems] SPb: SPBGU ITMO, 2007. p. 139.
7. Malyshev A.K., Rostislavskij M.B. Vserossijskaja komp'juternaja konferencija «Poiskovyje algoritmy v XXI veke» (To the question of optimization of the method of free search. All computer conference "Search algorithms in the XXI century"). M.: Progressor, 2013. pp. 175-186.
8. Torshina I. P. Komp'juternoe modelirovanie optiko-jelektronnyh sistem pervichnoj obrabotki informacii. [Computer simulation of optoelectronic systems for primary processing] M.: Universitetskaja kniga; Logos, 2009 g. p. 248.
9. John R Jensen. Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective (2nd Edition). M: Prentice Hall, 2006. P. 608.
10. Thomas Lillesand, Ralph W. Kiefer, Jonathan Chipman. Remote Sensing and Image Interpretation. M: Wiley, 2007. P. 469.