

РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СЪЕМКИ ОПТИКОЭЛЕКТРОННЫХ СЪЕМОЧНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ТИПА «КАНОПУС-В»

Е.В. Макушева, В.В. Некрасов
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Разработано математическое описание геометрической модели панхроматической и многозональной съемочных систем перспективных космических комплексов типа «Канопус-В». Сформировано математическое описание съемочных систем, определены и учтены характеристики процесса съемки, оценена потенциальная точность геопривязки снимков, возможность и точность калибровки съемочных систем по данным тестового полигона.

Ключевые слова: геометрическая модель съемки, RPC, съемочная система, тестовый полигон.

Общие характеристики КА «Канопус-В»

В настоящее время в ФГУП «НПП ВНИИЭМ» ведутся работы по созданию космического комплекса (КК) оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций и космической системы на его основе, в состав которой входит КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) «Канопус-В» (рис. 1). Он позволит решить следующие задачи:

- мониторинг чрезвычайных ситуаций;
- картографирование;
- обнаружение очагов лесных пожаров и выбросов загрязняющих веществ;
- регистрацию аномальных физических явлений для прогнозирования землетрясений;
- мониторинг водных ресурсов и сельского хозяйства;
- землепользования;
- высокооперативного наблюдения.

Бортовой целевой комплекс КА «Канопус-В» обеспечивает съемку участков поверхности Земли, формирование полученной информации в кадры и ее передачу на наземные пункты приема информации. В состав бортового целевого комплекса входят:

- панхроматическая съемочная система (ПСС) (рис. 2), которая обеспечивает получение изображения, формирование панхроматической видеоинформации и выдачу ее в бортовую информационную систему (БИС);
- многозональная съемочная система (МСС) (рис. 3), которая обеспечивает получение изображения и формирование видеоинформации в четырех зонах спектра и выдачу ее в БИС.

Съемка может проводиться как одновременно в панхроматическом и многозональном режимах, так и при различных комбинациях отдельных спектральных зон вплоть до съемки в одной спектральной зоне.

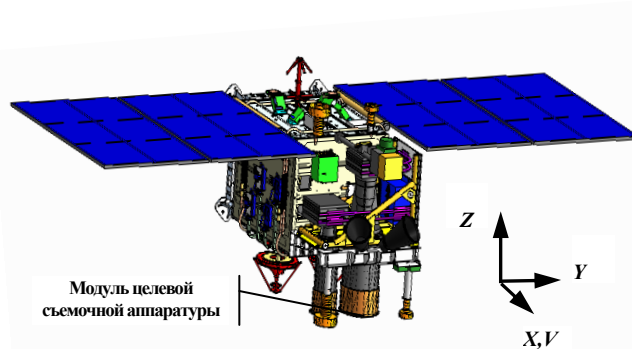


Рис. 1. Общий вид КА «Канопус-В» в условиях орбитального полета

Орбитальные характеристики	
Тип орбиты	круговая солнечно-синхронная
Высота орбиты, км	510
Наклонение, град	97,447
Характеристики КА	
Масса, кг	400
Масса полезной нагрузки, кг	110
Срок активного существования, лет	5 – 7
Точность ориентации, угл. мин	не более 5
Стабильность угловой скорости, град/с	не хуже 0,001 по каждой оси
Углы отклонения по крену и тангажу при проведении съемки, град	± 40

Динамическая геометрическая модель съемки, представляющая собой математическое описание съемочных систем, позволяет по данным об орбитальной траектории КА получить привязанные к местности снимки.

Точность геометрической модели съемки определяется точным учетом навигационных данных вместе с геометрической моделью снимка, что позволит получить точность привязки на Земле до десятков и возможно единиц метров.

При этом точная геометрическая модель позволит генерировать специальное описание снимка

(RPC – коэффициенты рациональных полиномов [1, 2]) для его точной привязки в большинстве стандартных пакетов (ERDAS, ENVI и т. п.) непосредственно пользователем, без раскрытия деталей описания камеры.

Использование точной геометрической модели позволит в режиме реального времени обеспечивать пользователя точными координатами на снимке в целях оперативного мониторинга.

Построение геометрической модели рассматривается, исходя из исходных данных на космический комплекс «Канопус-В».

Характеристики целевой аппаратуры

Разрядность квантования выходного сигнала	12
Объем памяти, Гбайт	24
Время хранения информации, сутки	не менее 5
Передача информации в целевую радиолинию	8-ми разрядный код
Количество каналов передачи данных	2
Скорость передачи данных, Мбит/с	61,44 или 122,88
Максимальная погрешность привязки информации к бортовой шкале времени, мс, не более	0,1
Погрешность выставки координатных осей съемочных систем относительно зеркальных граней угольника, угл. мин, не более	1
Время работы ЦА на витке, с	
– в режиме съемки	до 700
– в режиме передачи целевой информации	до 700



Рис. 2. Панхроматическая съемочная система

Основные характеристики ПСС

Фокусное расстояние, мм	1797,5
Эффективное относительное отверстие	1:10,3
Разрешение, м	2,1
Полоса захвата, км	23,3
Количество спектральных каналов	1
Спектральный диапазон, мкм	0,52 – 0,85



Рис. 3. Многозональная съемочная система

Основные характеристики МСС

Фокусное расстояние, мм	359,5
Эффективное относительное отверстие	1:5,6
Разрешение, м	10,5
Полоса захвата, км	20,1
Количество спектральных каналов	4
Спектральный диапазон, мкм	0,54 – 0,6 0,63 – 0,69 0,69 – 0,72 0,75 – 0,86

Характеристики видеоподсистемы. После получения видеoinформации, бортовая целевая аппаратура формирует ее в кадры.

Первые строки видеоданных в матрицах расположены так, что каждый третий кадр последующей матрицы совпадает с первым кадром предыдущей матрицы. Кадр видеоданных содержит 985 строк. Каждый последующий кадр в МСС имеет с предыдущим кадром перекрытие в 57 строк. В ПСС каждый последующий кадр имеет с предыдущим кадром перекрытие в 80 строк. Между кадрами, полученными разными матрицами, перекрытие составляет 70 пикселей. Схема расположения матриц в фокальной плоскости дана на рис. 4 и 5.

Кадры целевой информации имеют строчную структуру. Общее количество строк кадра целевой информации (КЦИ) равно 990, длина строки 1960 байт. Каждая строка содержит четыре поля информации.

В первом поле (байты с 0 по 15) содержится синхропоследовательность.

Второе поле (байты с 16 по 1943) – область данных КЦИ.

Третье поле (байты с 1944 по 1957) – идентификатор строки.

В четвертом поле (байты с 1958 по 1959) записывается контрольная сумма строки.

Общий формат матрицы 1092 × 1992 пикселей. Матрица состоит 1920 × 1080 пикселей (открытых, изображающих), на которых формируется изображение. Поле «изображающих» пикселей ограничено по столбцам симметрично с двух сторон четырьмя буферными столбцами и 28 закрытыми столбцами. По строкам поле открытых пикселей ограничивают по две буферные и четыре темновых строки. В полете сохраняются 985 строк видеоданных по 1920 пикселей в каждой строке, данные по 32-м темновым столбцам, усредненные по четырем столбцам (по четыре с каждой стороны матрицы), и четыре последних темновых строки.

Геометрическое разрешение (проекция элемента пространственной дискретизации фотоприемника на подстилающую поверхность [3]) при съемке с высоты 510 км в надир:

- в ПСС – 0,86 угл. с;
- в МСС – 4,27 угл. с.

Линейное разрешение на местности, определяемое по стандартной трехшпальной мире по критерию предельно разрешаемого элемента при съемке в зачетных условиях наблюдения, с вероятностью 0,8 составляет:

- для ПСС – 2,7 м;
- для МСС – 11,5 м.

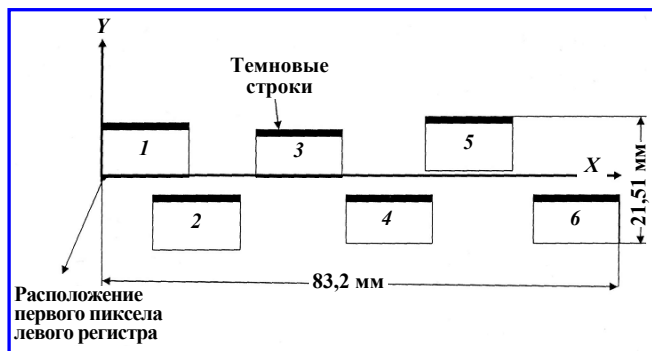


Рис. 4. Расположение матриц ПСС по паспортным данным микросборки

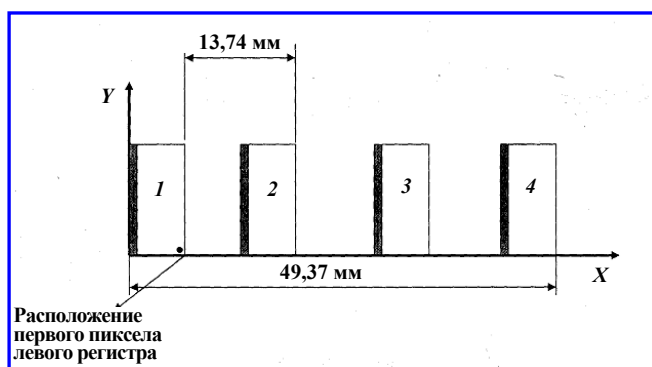


Рис. 5. Расположение матриц МСС по паспортным данным микросборки

Зачетные условия: высота 510 км, съемка в надир, высота Солнца над горизонтом более 30 угл. град, коэффициент пропускания атмосферы более 0,7, альbedo фона 0,07, контраст миры 0,3.

Геометрическая калибровка. Для точной геопривязки микрокадров необходимо учесть смещение центра фотографирования съемочной системы от центра масс КА и поправки к углам ориентирования КА.

Смещения центра фотографирования получают из анализа конструктивных данных КА.

Положение точки фотографирования вычисляется по формуле

$$X_c = X_a + M_s(X_{sc} - X_{sa}),$$

где X_c – положение точки фотографирования; X_a – точка GPS/ГЛОНАСС антенны; $(X_{sc} - X_{sa})$ – вектор от антенны к камере.

Данные об угловых поправках будут получены после вибрационных испытаний КА и будут уточняться по снимкам тестового полигона.

Результирующая матрица поворота для каждого микрокадра вычисляется по формуле

$$R_{es} = A_{gs}R,$$

где A_{gs} – матрица поворота КА, вычисляемая по данным навигационной системы (звездные датчики); R – матрица суммарных угловых поправок каждого микрокадра ПСС.

Математическое описание динамической геометрической модели съемки системами ПСС и МСС

Микрокадр съемочной системы ПСС и кадр съемочной системы МСС можно описать стандартной кадровой моделью [4] с тремя линейными параметрами (положение точки фотографирования) и тремя угловыми параметрами (углы внешнего ориентирования):

$$x - x_0 = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)};$$

$$y - y_0 = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)};$$

где x, y – координаты на снимке; x_0, y_0 – координаты главной точки фотоснимка; X, Y, Z – координаты на местности; X_s, Y_s, Z_s – координаты точки фотографирования;

$$\begin{aligned} a_1 &= \cos(\alpha)\cos(\kappa) - \sin(\alpha)\sin(\omega)\sin(\kappa); \\ a_2 &= -\cos(\alpha)\sin(\kappa) - \sin(\alpha)\sin(\omega)\cos(\kappa); \\ a_3 &= -\sin(\alpha)\cos(\omega); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_1 &= \cos(\omega)\sin(\kappa); \\ b_2 &= \cos(\omega)\cos(\kappa); \\ b_3 &= -\sin(\omega); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_1 &= \sin(\alpha)\cos(\kappa) + \cos(\alpha)\sin(\omega)\sin(\kappa); \\ c_2 &= -\sin(\alpha)\sin(\kappa) + \cos(\alpha)\sin(\omega)\cos(\kappa); \\ c_3 &= \cos(\alpha)\cos(\omega). \end{aligned}$$

Для каждого из шести микрокадров ПСС индивидуальными будут смещение от главной точки и угловые параметры ориентирования.

Для определения параметров ориентирования по опорным точкам (например тестового полигона) необходимо представить систему нелинейных уравнений в линейном виде относительно определяемых переменных $[X_s, Y_s, Z_s, \alpha, \omega, \kappa]$. Для этого воспользуемся разложением в ряд Тейлора:

$$x + adX_s + bdY_s + cdZ_s + dda + ed\omega + md\kappa - xu = v;$$

$$y + a'dX_s + b'dY_s + c'dZ_s + d'da + e'd\omega + m'd\kappa - yu = v';$$

три линейных параметра – точка фотографирования

$$a = \frac{dx}{dX_s} = -f \frac{X'Z - XZ'}{Z^2} = \frac{1}{Z} [fa_1 + a_3(x - x_0)];$$

$$b = \frac{dx}{dY_s} = -f \frac{X'Z - XZ'}{Z^2} = \frac{1}{Z} [fb_1 + b_3(x - x_0)];$$

$$c = \frac{dx}{dZ_s} = -f \frac{X'Z - XZ'}{Z^2} = \frac{1}{Z} [fc_1 + c_3(x - x_0)];$$

$$a' = \frac{dy}{dX_s} = -f \frac{Y'Z - YZ'}{Z^2} = \frac{1}{Z} [fa_2 + a_3(y - y_0)];$$

$$b' = \frac{dy}{dY_s} = -f \frac{Y'Z - YZ'}{Z^2} = \frac{1}{Z} [fb_2 + b_3(y - y_0)];$$

$$c' = \frac{dy}{dZ_s} = -f \frac{Y'Z - YZ'}{Z^2} = \frac{1}{Z} [fc_2 + c_3(y - y_0)];$$

три угловых параметра – углы ориентирования

$$d = \frac{dx}{d\alpha} = -f \frac{X'Z - XZ'}{Z^2} = \frac{1}{Z} [f(c_1(X - X_s) - a_1(Z - Z_s)) + (x - x_0)(c_3(X - X_s) - a_3(Z - Z_s))];$$

$$e = \frac{dx}{d\omega} = -f \frac{X'Z - XZ'}{Z^2} = -f \sin(\kappa') + (x - x_0) \times \frac{b_3(X - X_s)\sin(\alpha') + (Y - Y_s)\cos(\omega') - b_3(Z - Z_s)\cos(\alpha')}{Z};$$

$$m = \frac{dx}{d\kappa} = -f \frac{X'Z - YZ'}{Z^2} = y - y_0;$$

$$d' = \frac{dy}{d\alpha} = -f \frac{Y'Z - XZ'}{Z^2} = \frac{1}{Z} [f(c_2(X - X_s) - a_2(Z - Z_s)) + (y - y_0)(c_3(X - X_s) - a_3(Z - Z_s))];$$

$$e' = \frac{dy}{d\omega} = -f \frac{Y'Z - YZ'}{Z^2} = -f \cos(\kappa') + (y - y_0) \times \frac{b_3(X - X_s)\sin(\alpha') - (Z - Z_s)\cos(\alpha') + (Y - Y_s)\cos(\omega')}{Z};$$

$$m' = dy/d\kappa = -f((X'Z - YZ')/Z^2) = -(x - x_0).$$

По всем опорным точкам составляется система уравнений, которая решается методом наименьших квадратов [5].

Динамическая геометрическая модель съемки с использованием RPC

Стандартом де-факто аппроксимирующих соотношений стали так называемые RPC (Rational Polynomial Coefficients), получившие широкое распространение в качестве геометрической модели сканерных снимков высокого разрешения. Коэффициенты RPC входят в состав продуктов ДЗЗ, получаемых спутниками IKONOS, QuickBird, WorldView, KOMPSAT, OrbView-3, Cartosat-1 (IRS P5) [6]. Нет сомнений в том, что эта тенденция распространится и на перспективные спутники, запуск которых намечен на ближайшие годы.

RPC основаны на соотношениях следующего вида, связывающих нормированные геодезические координаты точки местности с нормированными координатами её изображения на снимке:

$$l_N = \frac{f_l(\varphi_N, \lambda_N, h_N)}{g_l(\varphi_N, \lambda_N, h_N)}; \quad s_N = \frac{f_s(\varphi_N, \lambda_N, h_N)}{g_s(\varphi_N, \lambda_N, h_N)}.$$

Числители и знаменатели этих соотношений представляют собой полиномы третьей степени:

$$\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \sum_{k=0}^3 d_{ijk} \varphi_N^i \lambda_N^j h_N^k.$$

Нормировка пиксельных и геодезических координат производится так, чтобы их нормированные значения по модулю не превосходили 1, и выполняется по следующим формулам:

$$l_N = \frac{l - O_l}{S_l}; \quad s_N = \frac{s - O_s}{S_s};$$

$$\varphi_N = \frac{\varphi - O_\varphi}{S_\varphi}; \quad \lambda_N = \frac{\lambda - O_\lambda}{S_\lambda}; \quad h_N = \frac{h - O_h}{S_h}.$$

В комплект поставки изображения включаются коэффициенты полиномов a_{ijk} , b_{ijk} , c_{ijk} , d_{ijk} , а также параметры нормировки O_l , O_s , O_φ , O_λ , O_h (Offset) и S_l , S_s , S_φ , S_λ , S_h (Scale).

Расчет коэффициентов рациональных функций производится следующим образом:

– определяются элементы внешнего ориентирования снимка в соответствии со строгой моделью сенсора по опорным точкам (либо используются элементы внешнего ориентирования, полученные по навигационным данным);

– по всему полю изображения и всему диапазону высот данной территории равномерно вычисляются опорные точки (x_f, y_f, X, Y, Z) с использованием строгой модели сенсора;

– составляется система уравнений, и методом наименьших квадратов (МНК) вычисляются коэффициенты рациональных полиномов.

Калибровка МСС и ПСС с использованием экспериментального тестового участка

Для калибровки и тестирования оптико-электронных систем КК «Канопус-В» ФГУП «Госцентр «Природа» по техническому заданию ФГУП «НПП ВНИИЭМ» подготовил экспериментальный тестовый участок, расположенный в Краснодарском крае в районе г. Пятигорска.

Для построения тестового участка, предназначенного для калибровки материалов съемки с КА «Канопус-В», были определены параметры, обеспечивающие эффективность его применения:

- географическое положение;
- размеры;
- ориентирование;
- плотность опорных точек;
- точность определения координат опорных точек.

Место расположения тестового участка выбиралось по топографической карте масштаба 1:100 000 с учетом следующих факторов:

- наличия на местности достаточного количества контуров и объектов, обеспечивающих однозначное опознание опорной точки и её длительную сохранность;
- наличия на местности возвышений, обеспечивающих оценку ошибок, вносимых рельефом, и точности координатных определений;
- наличия достаточного количества пунктов государственной геодезической сети;
- наличия разветвленной дорожной сети;
- доступности контуров и объектов для проведения геодезических измерений;
- наибольшего количества безоблачных дней в году.

Проектирование и выполнение геодезических работ выполнено с учётом требований инструкции по развитию съёмочного обоснования и съёмке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS (ГКИНП (ОНТА) – 02-262-02, Москва, ЦНИИГА-иК, 2002 г.).

Установлены следующие размеры тестового участка:

- ширина (по долготе) 28 км;
- протяженность (по широте) 8 км.

Среднее квадратичное отклонение измерений по каждой плановой координате и высоте не превышало 0,2 м.

Каждая точка привязана к двум исходным пунктам. В качестве исходных послужили семь пунктов триангуляции 2 – 4 классов, равномерно расположенные на территории тестовых участков и имеющие отметки геометрического нивелирования.

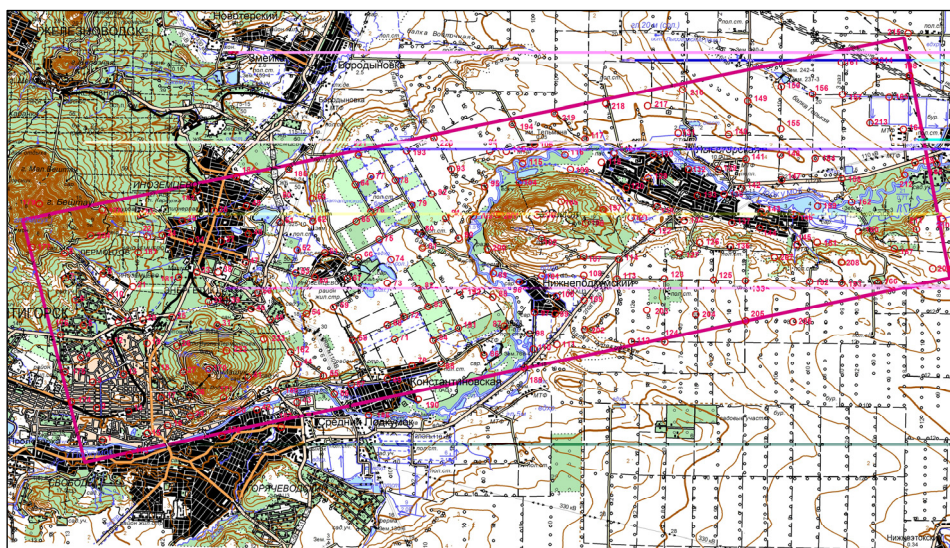


Рис. 6. Границы фотограмметрического тестового участка

Оценки точности при использовании экспериментального тестового участка

Для внешнего ориентирования снимков по опорным точкам часть ошибок будет исключена. Точность геодезической обработки снимков при выполнении внешнего ориентирования зависит от набора факторов, влияние которых описывается формулой:

$$\mu^2 = \frac{6}{n} \left[m_{x,y}^2 + \frac{1}{t} \left(M_{X,Y}^2 + \frac{r^2}{f^2} M_H^2 \right) \right],$$

где μ – средняя квадратичная ошибка (СКО) единицы веса элементов внешнего ориентирования снимка; $m_{x,y}$ – средняя квадратичная ошибка измерений координат опорных точек на снимке; $M_{X,Y}$, M_H – средние квадратичные ошибки геодезических координат опорных точек; n – количество опорных точек; f – фокусное расстояние; r – расстояние между опорными точками и началом координат; t – масштаб изображения.

Точность геопривязки для камеры ПСС по опорным точкам может составить 5 – 7 м СКО при использовании высокоточных наземных GPS/ГЛОНАСС измерений.

Заключение

Разработка геометрической модели съемочных систем и собственно съемки позволит расширить области применения данных, получаемых с перспективных КК типа «Канопус-В», и повысить оперативность получения геопривязанной информации.

Для этого необходимы:

– точный учет конструктивных характеристик съемочных систем ПСС и МСС;

Поступила в редакцию 07.09.2010

Екатерина Владимировна Макушева, аспирантка, инженер, e-mail: vniiem@orc.ru.
Виктор Владимирович Некрасов, канд. техн. наук, вед. специалист, т. 623-52-13, e-mail: vniiem@orc.ru.

– использование математической модели, соответствующей формированию изображения в съемочных системах;

– учет условий съемки.

Особенность построения панхроматической съемочной системы ПСС состоит в том, что изображение в ней формируется на массиве микрокадров, каждый из которых формирует изображение по законам центральной проекции. Формирование мозаики ортоизображений микрокадров осуществляется с учетом орбитального движения КА.

Для условий съемки определяющим является то, что центры фотографирования съемочных систем смещены от центра масс КА и существуют дополнительные углы разворота фоточувствительных матриц съемочных систем.

Использование тестового полигона позволит уточнить как линейные, так и угловые смещения в параметры внешнего ориентирования съемки.

На настоящий момент точность геопривязки снимков КА оценивается в 75 – 80 м (СКО). Однако технические характеристики системы навигации (точность звездных датчиков) видимо могут быть улучшены.

Литература

1. Generation Sensor orientation via RPCs / C.S. Fraser, G. Dial, J. Grodecki // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2006. – Vol. 60(3). – P. 182 – 194.
2. Bias-compensated RPCs for Sensor Orientation of High-resolution Satellite Imagery / S. Fraser Clive, B. Hanley Harry // Photogrammetric engineering & remote sensing journal of the american society for photogrammetry and remote sensing. – 2005. – Vol. 71. – № 8. – P. 9009 – 916.
3. Воройский Ф.С. Информатика. Новый систематизированный толковый словарь-справочник (Введение в современные информационные и телекоммуникационные технологии в терминах и фактах) / Ф.С. Воройский. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Физматлит, 2003. – 760 с.
4. Лобанов А.Н. Фотограмметрия: учебник для вузов / А.Н. Лобанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 552 с.
5. Каханер Д. Численные методы и программное обеспечение / Д. Каханер, К. Моулер, С. Нэш. – М.: Мир, 1998. – 575 с.
6. Данные ДЗЗ высокого разрешения. Ближайшие перспективы / М.А. Болсуновский // Геопрофи. – М.: ООО Информационное агентство «ГРОМ», 2006. – № 2. – С. 13 – 15.