

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В статье рассмотрена необходимость применения космических изображений высокого пространственного разрешения для решения землеустроительных задач. Сделан анализ существующих методов трансформирования космических изображений. Предложен метод интерполяции линейных отклонений на опорных точках для исправления космических изображений. Выполнена апробация предлагаемого метода.

В Украине с 1991 года происходит реформирование земельных отношений. Основы государственной политики в отношении управления земельными ресурсами на сегодняшний день представлены в концепции развития земельных отношений на 2008-2015 года [1], разработанной на основе проекта «Государственная программа развития земельных отношений в Украине на 2006-2015 года» [2].

Одним из вопросов, рассмотренных в концепции [1], является размежевание земель государственной и коммунальной форм собственности, основанное на Законе Украины "Про розмежування земель державної та комунальної власності" [3]. Размежеванию подлежат около 4,5 млн. га городских земель. На конец 2007 года [4] в Украине принято 1026 решений размежевания площади 2,7 млн. га, разрабатывается 356 проектов землеустройства на размежевание площади 1,1 млн. га. Упомянутые выше проекты утверждены в основном в западных областях Украины. В восточных областях работы проводятся медленнее, например, в Харьковской области не принято ни одного решения о размежевании земель государственной и коммунальной собственности.

Одной из причин торможения разработки проектов размежевания является проблема установления и изменения границ городов и населенных пунктов. Согласно [5] 57% городов и населенных пунктов нуждаются в установлении или изменении границ.

Для создания проектов размежевания земель государственной и коммунальной форм собственности, а также проектов установления или изменения границ населенных пунктов необходимо иметь качественный, актуальный на сегодняшний день картографический материал масштабов 1:500-1:5000. [6,7].

Согласно исследованиям [8] 68% топографических карт всех масштабов были созданы или обновлены в 1980-90 годах, 28% - в 1991-95 годах и только 0,9% - за последние 5 лет прошлого столетия. Начиная с 1995 года работы по составлению и обновлению топографических карт всех масштабов практически не выполнялись, поэтому, на сегодня почти 70% топографических карт всех масштабов на территорию Украины устарели более чем на 15 лет и не соответствуют реальному состоянию местности.

Кадастровые съемки и работы по инвентаризации земель выполняются не систематично, разными кадастровыми фирмами и зачастую в разных системах координат. Результаты этих съемок часто не наносятся на единые планшеты, которые хранятся в местных органах архитектуры, или не вносятся в единую базу геопространственных данных.

Поэтому разработку проектов установления границ городов, а затем и проектов размежевания земель государственной и коммунальной форм собственности можно выполнять после проведения дополнительных геодезических работ, которые необходимы для обновления существующего картографического материала. Данный вид ра-

бот очень трудоемкий и дорогостоящий, поэтому предлагается использовать космические изображения высокого пространственного разрешения не больше 1 м/пиксель и датой проведения съемки не позднее 5 лет [7]. Эксклюзивными правами на распространение космических изображений высокого пространственного разрешения в Украине имеет компания ЕСОММ Со [9], основные характеристики и их стоимость приведены в таблице 1 [10].

Табл. 1. Основные характеристики и стоимость космических изображений высокого пространственного разрешения

Спутник (страна)	Пространственное разрешение, м		Стоимость, грн/км ²	
	панхроматический режим	мультиспектральный режим	за информацию из архива	в случае заказа новой съемки
Worldview-1 (США)	0,50	нет	132-198	156-237
QuickBird (США)	0,61	2,44	132-198	156-237
EROS-B (Израиль)	0,7	нет	90-110	нет
OrbView-3 (США)	1,0	4,0	100-120	120-150
IKONOS (США)	1,0	4,0	106-150	140-185
Kompsat-2 (Р-ка Корея)	1,0	4,0	95	135-185

Космические изображения имеют несколько уровней предварительной обработки [11-14]:

- Level 1 (Basic) – базовый уровень обработки – наименьший уровень предварительной обработки. Включает радиометрическую коррекцию и коррекцию искажений датчика. Космические изображения базового уровня обработки поставляются вместе с файлом данных поддержки изображения (ISD — Imagery Support Data), который содержит: основные метаданные изображения, пространственные параметры, эфемериды и информацию о модели камеры. Используя этот файл, пользователь может выполнить ортотрансформирование изображения с применением строгой модели камеры. Точность такого изображения составляет 15-23 м.

- Level 2 (Standard, Standart Ortho Ready, Geo, Geo Ortho Kit) – стандартный уровень обработки. Изображения стандартного уровня обработки подвергаются базовому уровню обработки, после чего выполняется дополнительная геометрическая коррекция. Изображение после обработки может быть двух типов:

1. Standard, Geo – проведена геометрическая коррекция с целью исправления влияния рельефа, для чего используется приближенная цифровая модель (ЦМР) В качестве такой приближенной ЦМР используется модель GTOPO30 с размером ячейки 900 м, доступная для всей поверхности Земли.

2. Standart Ortho Ready, Geo Ortho Kit – изображение приводится к базовой постоянной высоте (средней высоте съемочного участка) над эллипсоидом, но при этом не учитывается ЦМР.

Точность изображений стандартного уровня обработки составляет 23-50м.

- Level 3(Orthorectified, Reference, Pro, Precision, PrecisionPlus) – орторектифицированные изображения – готовые для использования как источник картографической информации. Выполняется радиометрическая, сенсорная, геометрическая коррекция, орторектификация, приведение изображения к необходимой картографической проекции и эллипсоиду. Точность орторектифицированных изображений зависит от точности координат опорных точек, точности ЦМР и составляет от 2-25м.

Как видно из табл. 1 стоимость космических изображений различна. Наибольшую стоимость имеют орторектифицированные изображения. Более дешевые (изображения базового (Level 1 (Basic)) и стандартного (Level 2 (Standart Ortho Ready, Geo, Geo Ortho Kit)) уровня обработки) нуждаются в дополнительной геометрической коррекции (ортотрансформировании). Для этого необходимо иметь наземные опорные точки и ЦМР.

В изображения уровня обработки Level 2 (Standard и Geo) уже внесены поправки за рельеф, поэтому их повторное трансформирование с использованием ЦМР будет некорректным. Это связано с тем, что неизвестно какие именно значения поправок были внесены (использовалась приближенная разреженная ЦМР) и каким способом были получены высоты всех промежуточных точек. Для таких изображений может быть вычислена по опорным точкам и исключена систематическая погрешность.

Процесс геометрической коррекции космических изображений делится на несколько этапов:

- 1) определение границ выходного (ортотрансформированного) изображения (обычно берутся такие же координаты как и на исходном изображении);
- 2) оконтуривание выходного изображения наименьшим прямоугольником;
- 3) выбор размера пикселя выходного изображения (может совпадать с размером пикселя исходного изображения);
- 4) проектирование координат границ выходного изображения на плоскость;
- 5) нахождение зависимости между координатами изображения и наземными (пространственными) координатами с использованием наземных опорных точек (выполняется чаще всего по методу наименьших квадратов);
- б) для центра каждого пикселя выходного изображения:
 - а) определение его пространственных координат (плановых – по координатам границ изображения, высотных – по ЦМР);
 - б) вычисление координат изображения по пространственным координатам;
 - в) выбор плотности в исходном изображении;
 - г) присваивание выбранной (вычисленной) плотности пикселю в выходном изображении.

Методы решения на 4 этапе во многом зависят от используемой геометрической модели [15-19]:

1. Строгая геометрическая модель. Заключается в восстановлении пространственного положения совокупности лучей, сформировавших снимок и подразумевает моделирование траектории и ориентации сенсора во время съемки и использование его элементов внутреннего ориентирования. Таким образом, определяются элементы внутреннего и внешнего ориентирования строк снимка. Для этого используют модели перемещения, вращения и геометрическую модель сенсора. Применение данной модели возможно только для целого кадра уровня обработки Level 1 (Basic), так как при геометрической обработке изображений зависимости между координатами на местности и на изображении нарушаются.

2. Аппроксимация строгой модели, основанная на использовании поставляемых коэффициентов рационального полинома (RPC). Они рассчитаны строгим ме-

тодом, с использованием геометрической модели сенсора, бортовых и телеметрических измерений элементов внешнего ориентирования. С применением RPC можно достичь точности 2-3 м при условии использования опорных точек (1-4 опорные точки) в процессе вычисления RPC поставщиком данных или в процессе расчета поправок в вычисленные координаты изображения при уравнивании (смещение, масштабирование, поворот), проводимом заказчиком снимков. Данная геометрическая модель чаще всего применима для космических изображений уровня обработки Level 2 (Standart Ortho Ready, Geo Ortho Kit). К недостаткам применения RPC можно отнести:

а) Возможность наличия систематической ошибки, достигающей 50 м, в орторектифицированном изображении при использовании RPC без опорных точек.

б) RPC заданы относительно эллипсоида WGS-84, а в большинстве случаев исходные данные (опорные точки, ЦМР) и получаемые орторектифицированные изображения определены в некоторой местной системе координат, при этом параметры связи которой с другими системами неизвестны.

3. Параметрические, универсальные модели. Основаны на достаточно общих и приближенных предположениях о способе выполнения съемки, а значения входящих в эти соотношения параметров вычисляются по опорным точкам. Применяются в тех случаях, если неизвестны первые две. Примером параметрической модели является параллельно-перспективная модель, при этом предполагается равномерность и прямолинейность движения носителя и неизменность его ориентации на участке формирования снимка. Применяются также модель DLT (Direct Linear Transformation) и её модификации; аффинная модель, учитывающая, что системы высокого разрешения имеют узкое поле зрения; полиномиальные модели. Недостатками параметрических моделей являются:

а) Показатели точности выходных продуктов в большинстве случаев ниже, чем при применении строгой геометрической модели или RPC (3-10 м).

б) Для вычисления параметров модели необходимо иметь достаточное количество число опорных точек (от 4 до 20).

При съёмке равнинной местности или построении ортоизображений по изображениям, сделанным в надир, точность выходного изображения при применении параметрических моделей может быть такой же, как и при применении метода RPC.

Точность орторектифицированных космических изображений кроме применяемой геометрической модели трансформирования, также во многом зависит от точности ЦМР. Чем выше точность ЦМР, тем точнее получаемое ортоизображение.

В зависимости от способа получения ЦМР на ее точность влияет ряд факторов:

1) Ошибки существующего картографического материала и ошибки его сканирования. Согласно исследованиям [11] по сканированной топографической карте М 1:5000 с размером пиксела 0,3175 м ЦМР с шагом 10 м можно получить с точностью 5 м.

2) Ошибки определения высот опорных точек. Возникают при переходе от эллипсоида WGS84 (к которому приведено космическое изображение) к эллипсоиду Красовского (который принят в Украине). Например, для местности с широтами 48°28'–48°34' и долготами 37°36'–37°47' данные ошибки составляют от 7 до 10 м (при сравнении перевычисленных высот с карты М 1:5000 и высот сетки через 30" общедоступной глобальной цифровой высотной модели Gtopo30 [20]).

3) Интерполяция высот промежуточных точек. Ошибки определения высот могут быть от 2-5 м в зависимости от рельефа местности, густоты опорных точек и метода интерполяции.

4) Восстановление рельефа городских территорий в связи с множеством искусственно созданных объектов на ровных или наклонных площадках (здания, дороги, площади).

В связи со всем выше сказанным, возникает задача применения метода трансформирования космического изображения, который бы исключал применение ЦМР. Поэтому предлагается использовать метод интерполирования измеренных линейных отклонений на опорных точках методом коллокации [21] (рис. 1). Это становится возможным для фирм, занимающихся кадастровыми съемками преимущественно городских территорий, у которых инструментально закоординировано множество контуров, легко дешифрируемых на космическом изображении. Получить координаты контуров можно из ведущихся на предприятиях дежурных кадастровых планов и файлов IN4.



Рис. 1. Пример измеренных линейных отклонений на опорных точках

При использовании для трансформирования космических изображений метода интерполяции линейных отклонений методом коллокации вокруг точки интерполирования P , заданной плановыми координатами x_p и y_p строится квадрат со стороной R . Из линейных отклонений на опорных точках выбираются такие, которые попали в квадрат. В квадрат должно попадать от 1 до 50 точек. Этого добиваемся увеличением или уменьшением размера квадрата. Используется ковариационная функция $K(\rho)$, которая имеет вид:

$$K(\rho) = a + b\rho_{ij}, \quad (1)$$

где: a, b – величины, которые зависят от размера квадрата ($a=1, b=-1/R$), ρ_{ij} – расстояние между точками i и j , вычисляется по формуле:

$$\rho_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

По выбранным в квадрат точкам формируются следующие матрицы:

$$L = \begin{pmatrix} l_1 - l_0 \\ l_2 - l_0 \\ \dots \\ l_n - l_0 \end{pmatrix}, \quad C_p = \begin{pmatrix} K(\rho_{1p}) \\ K(\rho_{2p}) \\ \dots \\ K(\rho_{np}) \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} K(\rho_{11}) & K(\rho_{12}) & \dots & K(\rho_{1n}) \\ K(\rho_{12}) & K(\rho_{22}) & \dots & K(\rho_{2n}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K(\rho_{1n}) & K(\rho_{2n}) & \dots & K(\rho_{nn}) \end{pmatrix},$$

где: l_i – измеренные линейные отклонения на опорных точках ($i=1\dots n$), l_0 – среднее арифметическое из значений линейных отклонений точек, выбранных в квадрат, n – количество точек, выбранных в квадрат.

Линейное отклонение точки интерполирования P вычисляется по формуле:

$$l_p = l_0 + C_p^T C^{-1} L. \quad (2)$$

Преимуществом данного метода является то, что после трансформирования отклонения на опорных точках имеют нулевые значения.

Возможность применения метода интерполяции линейных отклонений была проверена при сравнении с геометрическим условием исправления космического изображения с учетом рельефа (рис. 2).

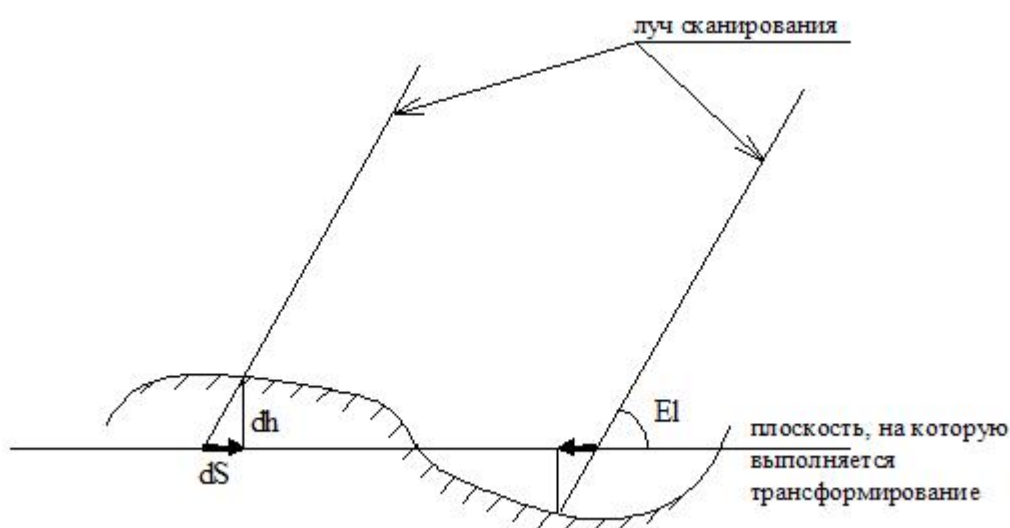


Рис. 2. Геометрическое условие исправления изображения с учетом рельефа

При использовании данного геометрического условия (рис. 2) предполагается, что лучи сканирования направлены параллельно, так как высота от точки сканирования до сканируемой местности составляет 450 км [10].

Согласно рисунку 2 локальное смещение точки с учетом рельефа находится по формуле:

$$dS = dh \cdot \operatorname{tg}(90^\circ - El), \quad (3)$$

где: dS – локальное смещение точки; dh – разность высоты точки и высоты плоскости, на которую выполняется трансформирование; El – угол сканирования.

Сравнение двух предложенных методов было выполнено на созданной модели (1 вариант апробации), имеющие следующие параметры:

- пологая ЦМР (рис. 3,а);
 - минимальное значение высоты ЦМР – 78м;
 - максимальное значение высоты ЦМР – 158м;
 - разность высот ЦМР – 80м,
- и с использованием реального рельефа (рис. 3,б) (2 вариант апробации).

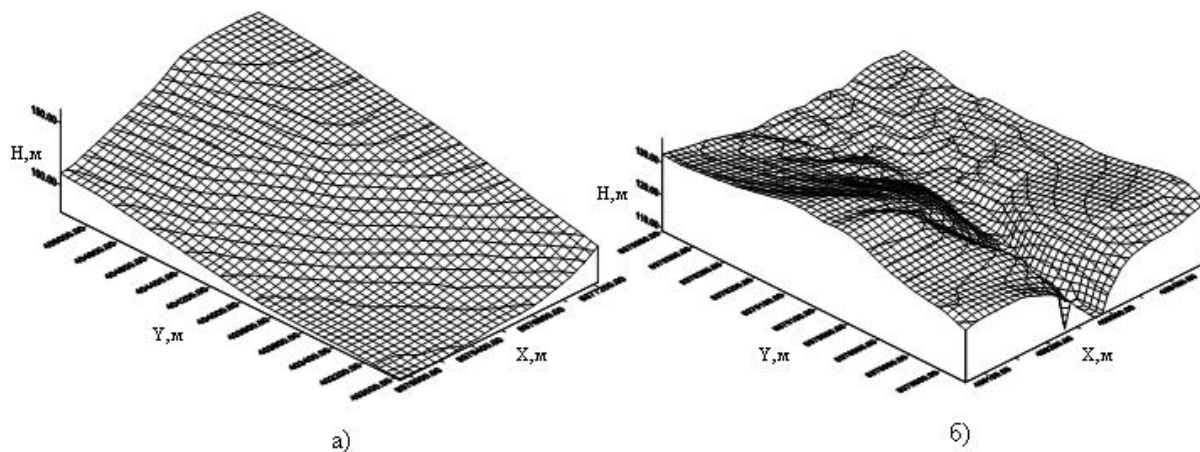


Рис. 3. Рельеф: а – рельеф модели, б – реальный рельеф

Для расчетов были выбраны следующие условия трансформирования:
 - высота плоскости, на которую выполняется трансформирование – 145 м;
 - угол сканирования – $\text{EI}=81,8^\circ$.

При выполнении сравнения для первого варианта апробации было взято 1500 точек, для второго – 2000 точек с известными высотами по регулярной сетке с шагом 10 м и были найдены локальные смещения по формуле (3).

Для этих же точек регулярной сетки были определены смещения по формуле (2) и (3) при интерполяции высот по методу обратного средневзвешенного расстояния четырех ближайших опорных точек и по методу коллокации при различной густоте опорных точек (через 20 м, 50 м, 100 м, 250 м, 500 м, 1000 м). Было выполнено сравнение полученных результатов и рассчитаны средние квадратические ошибки (СКО) интерполирования высот, СКО трансформирования из-за ошибки интерполяции, СКО трансформирования по методу интерполирования линейных отклонений. Результаты вычислений приведены в таблице 2.

Табл.2. Сравнение двух методов трансформирования

Сто-рона сетки, м	СКО определения высоты, м		СКО трансформирования из-за интерполяции, м		СКО трансформирования интерполирования линейных отклонений, м
	метод обратных расстояний	метод коллокации	метод обратных расстояний	метод коллокации	
для первого варианта апробации					
20	0,3	0,3	0,043	0,051	0,108
50	0,7	0,4	0,101	0,062	0,150
100	1,3	0,5	0,186	0,075	0,195
250	4,9	1,4	0,702	0,202	0,345
500	10,4	2,8	1,502	0,400	0,498
1000	21,5	6,9	3,097	0,993	0,961
для второго варианта апробации					
20	0,6	0,3	0,088	0,046	0,113
50	2,1	0,8	0,296	0,119	0,128
100	3,8	1,8	0,552	0,253	0,259
250	6,6	4,9	0,953	0,703	0,704
500	15,8	6,5	2,272	0,936	0,935
1000	28,3	11,7	4,199	1,687	1,663

Как видно из таблицы 2, при использовании формулы (3) для трансформирования большое значение имеет метод интерполяции высот, в данном случае интерполяция высот методом коллокации дает лучший результат практически в 2 раза по сравнению с интерполяцией по методу обратных расстояний. Но данный метод при интерполяции высот методом коллокации для пологого рельефа (модели) дает лучший результат почти в 2 раза при густоте опорных точек до 250 м, чем метод интерполяции линейных отклонений. Для реального рельефа и при густоте опорных точек больше 250 м оба метода дают практически одинаковые результаты. При использовании формулы (3) не были учтены ошибки определения высот, что приведет к ухудшению получаемых результатов.

Метод интерполяции линейных отклонений был применен при трансформировании космического изображения г. Константиновка, полученного со спутника QuickBird (тип Standard Ortho Ready). Для чего было измерено 6295 линейных отклонений космического изображения от дежурного кадастрового плана, при этом СКО линейных отклонений составила 6,97 м. Вычислены отклонения на опорных точках с использованием метода интерполяции линейных отклонений по отклонениям ближайших опорных точек. Затем были найдены разности рассчитанных и измеренных отклонений, СКО разностей составила 1,8 м. Что доказывает эффективность использования предлагаемого метода для исправления космического изображения и не приносит в исправленное изображение ошибок получения ЦМР.

Библиографический список

1. **Концепція** розвитку земельних відносин в Україні // Землевпорядний вісник. – 2008. – №2. – С. 4-10.
2. **Проект** «Державна програма розвитку земельних відносин в Україні на 2006-2015 роки» // Землеустрій і кадастр. – 2006. – №1. – С. 100-128.
3. **Закон України** «Про розмежування земель державної та комунальної власності» від 5 лютого 2004 року № 1457-IV // Відомості Верховної Ради (ВВР). – 2004. – № 35. – Ст.411.
4. **Яцук І.** Держагенство підійшло до найвідповідальнішого етапу діяльності... // Землевпорядний вісник. – 2007. – №6. – С. 24-28.
5. **Т.Топчій** На часі – встановлення меж населених пунктів // Землевпорядний вісник. – 2008. – №2. – С. 24.
6. **Методичні рекомендації** щодо розробки проектів землеустрою щодо розмежування земель державної та комунальної власності, затверджені наказом Держкомзему України від 16 березня 2006 року № 103 // <http://myland.org.ua/ukr/13/213/311/4583/> (12.06.2008)
7. **Джос А.М.** Щодо методики встановлення і зміни меж міст. - <http://myland.org.ua/ukr/13/213/313/4928/> (12.06.2008)
7. **Карпінський Ю., Ляшенко А.** Стратегія формування національної інфраструктури геопроцесорних даних в Україні. – К.: НДІГК, 2006. – 108 : іл. – (Сер. «Геодезія, картографія, кадастр»).
8. **Сайт компанії ECOMM Co.** - <http://www.ecomm.kiev.ua> (15.05.2008)
9. **Аристов М.** Быстрее, точнее, дешевле // Геопрофиль. – 2008. – май-июнь. – С. 10-24.
10. **Болсуновский М.А.** Геометрическая коррекция данных со спутника QuickBird. <http://sovzond.ru/dzz/publications/542/3072.html> (12.03.2006)
11. **WorldView-1 Imagery Products Guide.** - <http://www.eurimage.com/products/docs/worldview-1.pdf> (15.05.2008)
12. **IKONOS Imagery Products Guide.** - <http://www.geoeye.com/CorpSite/products/products/satellite-imagery/Default.aspx> (15.05.2008)
13. **Карпінський Ю.О., Скакодуб Л.О., Єгоров А.В.** Досвід використання космічних знімків із супутника QuickBird (Standard) для великомасштабного картографування // Вісник геодезії та картографії. – 2007. – №2 (47). – С. 22-29.
14. Критерии выбора данных ДЗЗ для топографического картографирования. **Андрон В.Н., Каррионов Ю.И., Титаров, А.Д. Чекурин** - http://www2.racurs.ru/www_download/articles/remote_sensing_data_choice_criteria.pdf (30.03.2007).
15. **К. Jacobsen** Understanding Geo-Information from High Resolution Optical Satellites. In: GIS Development Asia Pacific (2006), S. 24-28. - http://www.ipi.uni-hannover.de/uploads/txtkpublikationen/GeoInf_VHR_KJ.pdf (05.03.2007)

16. Geometric modeling and photogrammetric processing of high-resolution satellite imagery. **X. Niu, J. Wang, K. Di, Jin-Duk Lee, R. Li** - http://shoreline.eng.ohio-state.edu/publications/isprs2004_quickbird.pdf (25.09.2007)
17. **T. Toutin** Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. INT. J. REMOTE SENSING, may, 2004, Vol. 25, No. 10, 1893–1924.
18. **П.С. Титаров** Практические аспекты фотограмметрической обработки сканерных космических снимков высокого разрешения. - http://www2.racurs.ru/www_download/articles/scan_pract.pdf (30.03.2007).
19. **Сайт компании EROS Data Center.** - <http://edcwww.cr.usgs.gov/eros-home.html>
20. **Стрельцов В.И., Могильный С.Г.** Маркшейдерское обеспечение природопользования недр. – М.: Недра, 1989. – 205 с.: ил.

© Пиличева М.О. 2009