

**А. И. Баскаков** (ТОО «Казгипроцветмет», Казахстан)

В 1979 г. окончил механико-математический факультет Новосибирского государственного университета по специальности «механика/прикладная математика». В настоящее время — руководитель направления ГИС и ДЗЗ Казахстанского головного института по проектированию предприятий цветной металлургии «Казгипроцветмет», г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан.

## Высокодетальное моделирование рельефа для проектирования объектов инфраструктуры рудников Кундызды и Лиманное на основе данных ДЗЗ\*

Ландшафт территорий рудников, а также наземные и подземные сооружения (дамбы, хвостохранилища, отвалы, шахты, карьеры и т. п.) находятся под постоянным воздействием горно-геологических и гидрологических факторов, имеющих естественную и антропогенную природу. Необходимым условием безопасной эксплуатации объектов инфраструктуры рудников является заблаговременное выявление и учет на этапе проектирования потенциально опасных особенностей ландшафта территорий.

Конъюнктурная привлекательность и практическая эффективность от применения космических технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в проектировании объектов горно-обогатительного комплекса обусловлены, в современных условиях следующими основными причинами:

- \* возросшими требованиями к оперативности и одновременно к качеству проектных решений, реализуемых на значительных по площади территориях;
- \* необходимостью использования трехмерных цифровых моделей местности в качестве основного источника геопространственных

данных при решении задач экономической целесообразности размещения сооружений и учета требований к обеспечению их техногенной и экологической безопасности;

- \* выполнением проектными организациями мониторинга объектов инфраструктуры рудников с оценкой воздействия предприятий на окружающую среду в течение всего периода их эксплуатации.

Получение топогеодезической информации с использованием космических оптико-электронных систем сканерного типа гарантирует предсказуемую точность и высокую плотность измерений, которая обеспечивает необходимую детальность при интерпретации основных геоморфологических особенностей рельефа местности. При этом случайная составляющая ошибки наблюдений при использовании таких систем не зависит от человеческого фактора и может быть достоверно оценена с использованием статистических критериев на основе анализа представительной выборки измерений. Систематическая же составляющая ошибки, обусловленная, например, RFM-моделью съемки, исключается путем выполнения единичных

*\*Статья подготовлена по результатам выполненного проекта — победителя конкурса «Лучшие проекты в области ГИС-технологий и ДЗЗ» в номинации «Лучший отраслевой инновационный проект с использованием космических данных ДЗЗ» в рамках Международного Форума «Интеграция геопространства — будущее информационных технологий».*

наземных измерений с последующей поправкой в виде аффинной трансформации изображений.

Для обеспечения проектных решений и инженерно-геологических изысканий на территориях медно-цинковых месторождений Кундызды и Лиманное, расположенных в Мугаджарском и Хромтауском районах Актюбинской области Казахстана, высокодетальными топографическими моделями рельефа была применена стереоскопическая съемка с космического аппарата КА GeoEye-1. Полученная в итоге цифровая модель местности использовалась в качестве фактической основы для технологически оптимального и безопасного размещения объектов инфраструктуры горно-обогатительных комплексов рудников Кундызды и Лиманное.

В настоящей работе отражены основные моменты использования комплексной технологии получения, интерпретации и представления измерений высот, ядром которой является реализованная в MATCH-T/INPHO объектно-ориентированная вычислительная концепция производства измерений с целью формирования «гибридной» SCOP/DTM-модели естественного рельефа местности. Территории месторождений Кундызды и Лиманное представляют собой два наиболее характерных для Казахстана типа рельефа — мелкосопочный и равнинный (рис. 1), с перепадом высот 190 м и 6 м соответственно. Эти участки были рассмотрены как эталонные с целью практической оценки условий применимости указанного подхода к получению кондиционных измерений высот поверхности рельефа, заложенному

в функциональность SCOP/DTM-модели системы MATCH-T/INPHO. В результате выполненных работ сформулированы типовые правила функционального управления процессом получения и интерпретации измерений при автоматической генерации высот, применение которых позволило создать высокодетальные трехмерные модели естественного рельефа для указанных территорий.

Стереоскопическая съемка участков работ была выполнена в июле 2012 г. с КА GeoEye-1 при полном отсутствии облачности (рис. 2). Каждая стереопара дивергентной съемки охватывает площадь порядка 105 кв. км. Результат съемки представлен как продукт уровня GeoStereo, прошедший радиометрическую и геометрическую коррекцию, выполненную по орбитальным данным с использованием строгой модели съемки. Изображение уровня GeoStereo представляет собой (согласно метаданным) проективную горизонтальную трансформацию «оригинального» изображения на плоскость UTM-проекции с абсолютной геодезической высотой относимости — Reference Height и соответствует положению MBR сцены съемки на Inflated-эллипсоиде. Разрешение изображений составляет 0,5 м для панхроматического диапазона и 2 м для мультиспектрального диапазона.

Полевое геодезическое обоснование района съемки предусматривало выполнение наблюдений двухчастотным GPS-приемником Trimble 5700 в точках наземной привязки, которые выбирались по местоположению компактных и хорошо опознаваемых на изображениях объектов (рис. 3).



Рис. 1. Характерные типы ландшафтов территорий рудников Кундызды (слева) и Лиманное (справа)



Рис. 2. Изображения уровня GeoStereо территорий рудников Кундызды (слева) и Лиманное (справа)



Рис. 3. Идентификация и измерение GPC на местности

По истечении срока формирования окончательных (final) оценок орбит и часов спутников данные GPS-наблюдений обрабатывались удаленно в центре SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center) относительно базовых станций сети IGS, в результате чего были получены координаты опорных точек с точностью до первых сантиметров.

Для выполнения окончательного абсолютно-го ориентирования стереомодели местности использовалась прямая форма RPC-модели

съемки от известных наземных опорных точек путем ее включения в соотношения уточняющей аффинной трансформации [1], реализованной в модуле Exterior\_Orientation. При количестве опорных точек больше трех система линейных уравнений для нахождения коэффициентов аффинной трансформации становится переопределенной, и ее решение находится методом параметрического МНК-уравнивания при условии минимизации ошибки трансформации изображений в опорных точках.

Поскольку ландшафты территорий в районах месторождений Кундызды и Лиманное представляют собой естественные природные формирования и практически не содержат следов скользя-нибудь значительного техногенного воздействия, то для расчета моделей высот на этих участках была использована концепция SCOP/DTM-модели. Данный подход предназначен для автоматической генерации высот и предполагает «нормализацию» изображений с последующим использованием метода автокорреляции для определения соответственных точек на каждом уровне создаваемой пирамиды изображений. В рамках данной модели поверхность естественного рельефа считается непрерывной и имеющей «топографический» порядок гладкости, что означает непрерывность по крайней мере ее первых частных производных. Относительно множества оригинальных измерений предполагается, что оно имеет достаточно «хорошую» пропорцию из точек, относящихся к рельефу и измеренных над его поверхностью, например в области групп деревьев или отдельных небольших строений. Определяемое экспериментально, подходящее значение функционального параметра Feature\_Density позволяет добиться хорошего в указанном смысле качественного состава оригинальных измерений для конкретного ландшафта местности.

Генерация измерений собственно высот рельефа по множеству всех оригинальных измерений выполнялась на основе «надежной» весовой МНК-аппроксимации [3, 6].

Определение степени надежности оригинальных измерений при их интерпретации предполагает оценку достоверности результата автокорреляции, фильтрацию точек класса off-terrain points с использованием «весовой функции» [5], а также локальное сглаживание остаточных особенностей малого размера для устранения эффектов «моли» или «шероховатости». Полученные в результате такой интерпретации измерения, относящиеся к собственно поверхности рельефа, интерполировались методом конечных элементов [2] на регулярную сеть с весовыми коэффициентами надежности [4], после чего результат обобщался в виде SCOP/DTM-модели и сохранялся в файле векторного формата – [\* .dtm .las].

Основополагающим функциональным параметром реализованной в MATCH-T интерполирующей весовой фильтрации [5] является размер ячейки  $\Delta$  результирующей сети определения DTM. Ее величина должна выбираться

таким образом, чтобы влияние измерений класса off-terrain points на модель высот рельефа было сведено к минимуму. Как правило, если размер  $\Delta$  больше половины величины максимального из исключаемых объектов класса off-terrain points, то это дает хороший результат. Для рассматриваемых территорий размер ячейки  $\Delta$  фильтрующей сети интерполяции выбирался в пределах диапазона от 5 до 10 м, в зависимости от размеров исключаемых особенностей, представленных в основном редкой кустарниковой растительностью, небольшими группами деревьев и одиночными полуразрушенными строениями.

Параметр Terrain\_Type является вторым по значимости, от которого зависит качество DTM. Он представляет априорную оценку типа местности в смысле величины возможных значений относительных превышений высот в области расчета DTM. По значению этого параметра MATCH-T определяет в соответствии с указанным типом местности наиболее оптимальный вид весовой функции и уровень предельных значений параллаксов для исключения возможных ошибок типа Gross\_Eggers, возникающих при сбоях механизма автокорреляции.

В качестве вспомогательных данных при создании моделей высот использовались предварительно подготовленные измерения геоморфологических особенностей, отражающих основные структурные элементы поверхности естественного рельефа. Морфометрический анализ поверхности рельефа выполнялся путем стереофотограмметрических измерений в рамках функциональных возможностей модуля DT\_Master/INPHO. Рассчитанные в автоматическом режиме DTM-модели территорий были подвергнуты анализу и окончательной редакции в «ручном» варианте с использованием стереоскопической системы визуализации Planar SD2620W. Растровые изображения полученных цифровых моделей высот естественного рельефа, будучи пересчитанными в целочисленные значения диапазонов RGB-интенсивностей, представлены на рис. 4.

Пересчет отметок из геодезической системы высот в ортометрическую выполнялся с использованием гравитационной модели земли EGM\_2008, рассчитанной по градусной сетке:  $h^o = h^c - h^{GM}$ . Для перехода к нормальной системе высот использовалась поправка  $\Delta h$ , определяющая величину сдвига квазигеоида относительно геоида и вычисляемая для каждой из территорий с использованием данных наземной тахеометрической съемки:  $h = h^N + \Delta h^o$ . Заметим, что в этом случае при переходе к нормальной системе высот мы учитываем также среднюю

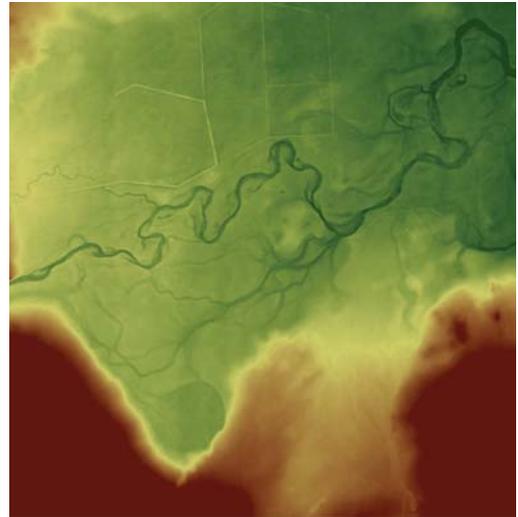
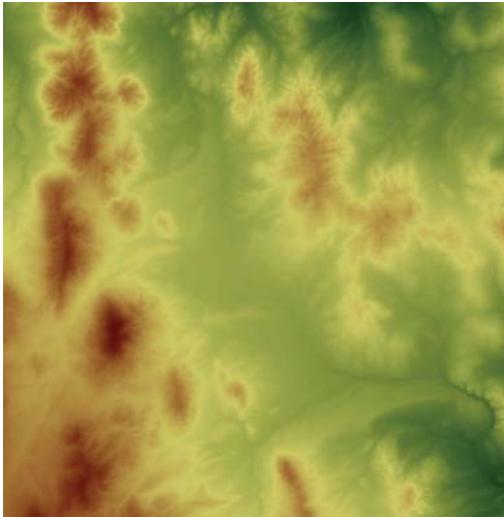


Рис. 4. Модели высот территорий рудников Кундызды (слева) и Лиманное (справа)

величину погрешности в определении высот DTM относительно данных наземной съемки, которая неявным образом присутствует в значении  $\Delta h$ .

В качестве эталона для оценки точности полученной модели нормальных высот рельефа использовались данные в пределах одного планшета наземной тахеометрической съемки масштаба 1:2000, выполненной в центральной части месторождения Кундызды в 2008 г. Для формирования представительной выборки измерений высот было отобрано порядка 400 контрольных точек. Среднее расстояние между измерениями тахеометрической съемки составило порядка 35 м. Поскольку рассчитанная DTM представлена измерениями в узлах регулярной сети с шагом 5 м, то для более корректного сравнения двух поверхностей рельефа высоты контрольных точек были интерполированы на такую же сеть с использованием процедуры `Topo_to_Raster/ArcGIS`. После чего были определены значения разности высот (ошибки DTM) в узлах регулярной сети, общим числом порядка 80 тыс. измерений. На рис. 5 представлена гистограмма распределения полученных ошибок и значения ее основных статистических параметров. Для выборки ошибок были рассчитаны основные статистические оценки (табл. 1) и величина RMSE средней квадратичной ошибки, которая также используется в качестве критерия оценки достоверности наблюдений.

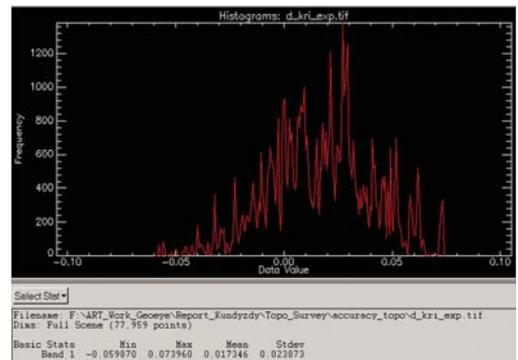


Рис. 5. Гистограмма распределения ошибок измерений высот DTM

Точность созданной DTM, понимаемая в обычном смысле, интерпретируется как величина оценки значения стандартного отклонения  $\sigma$ . На основе  $\sigma$  могут быть получены критерии оценки точности DTM с различными уровнями значимости (доверительными интервалами). Однако правомерность интерпретации стандартного отклонения как показателя оценки точности наблюдений определяется степенью близости закона распределения случайной величины ошибки к нормальному закону распределения. В качестве критерия оценки «нормальности» закона распределения

случайной величины согласно [7] используется теоретически определяемое соотношение между стандартным отклонением и средним:  $\sigma/\mu = 1,25$  – для нормального закона распределения. Если сравнить реальное вычисленное значение отношения  $\sigma/\mu$  с теоретическим 1,25, то по величине отклонения можно судить о степени близости закона действительного распределения ошибок к нормальному закону. В табл. 1 приведены значения доверительных интервалов и критерия оценки «нормальности» закона распределения. Полученное значение критерия  $\sigma/\mu = 1,35$  достаточно хорошо согласуется с теоретическим значением для нормального закона распределения:  $\Delta\sigma/\mu = (1,35 - 1,25) = 0,1$ , что позволяет говорить о правомерности использования стандартного отклонения в качестве оценки точности DTM в данном конкретном случае.

Критерий оценки точности DTM	Знач. м
Среднее – $\mu$	0,017
Стандартное отклонение – $\sigma$ (St.dev)	0,023
$\mu + \sigma$ (68%-й доверительный интервал)	0,04
$\mu + 2 \cdot \sigma$ (95%-й доверительный интервал)	0,063
$\mu + 2.5 \cdot \sigma$ (99%-й доверительный интервал)	0,077
$\mu + 3 \cdot \sigma$ (критерий отбраковки выбросов — 99,73%)	0,086
$\sigma/\mu$ – критерий «нормальности» закона распределения	1,35
RMSE	0,041

Табл. 1. Оценки точности DTM

Таким образом, выполненный анализ оценки точности созданной DTM естественного рельефа в окрестностях месторождения Кундызды

позволяет утверждать, что 95% измерений модели высот имеют погрешность не более 6,3 см. Следует, конечно, иметь в виду, что столь высокая точность в определении высот DTM стала возможной в результате компенсации усредненной систематической составляющей ошибки, выполненной, как показано выше, при переходе от ортометрических высот к нормальным с использованием достаточно большого числа наземных измерений.

Созданные в «гибридном» SCOP/DTM-формате цифровые модели рельефа были использованы для производства ортофотопланов, конструирования TIN-поверхностей и создания векторных топографических карт масштаба 1:2000. Композиция модели высот и ортофотоплана обеспечивает адекватное трехмерное представление цифровой модели местности. Пространственная классификация измерений DTM по диапазонам высот позволяет выполнить гипсометрический анализ рельефа с целью определения основных геоморфологических объектов, присутствующих на его поверхности. Указанные геопространственные данные (рис. 6, 7) охватывают значительные территории и вместе с тем обладают высокой детальностью и точностью воспроизведения особенностей местности. На их основе может быть выполнен качественный и метрический анализ ландшафта района проектирования, становится возможным автоматизированный расчет объемов выемки-насыпи грунта, а также получение эффективных решений по размещению объектов инфраструктуры предприятий горно-обогатительных комплексов с учетом обеспечения техногенной, природной и экологической безопасности.

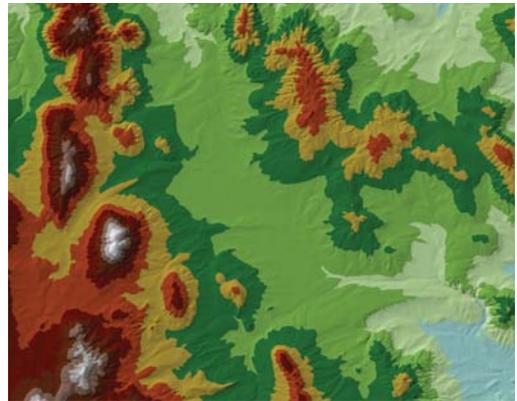
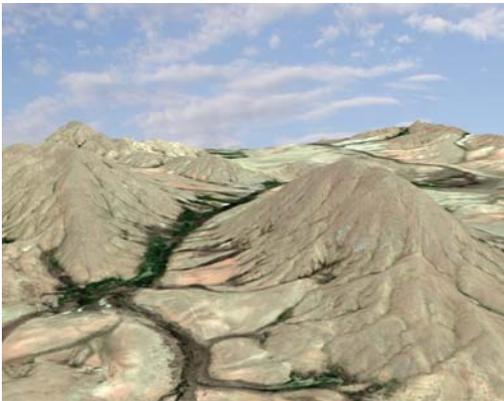


Рис. 6. Цифровая модель местности (слева) и гипсометрическая картограмма (справа) территории рудника Кундызды

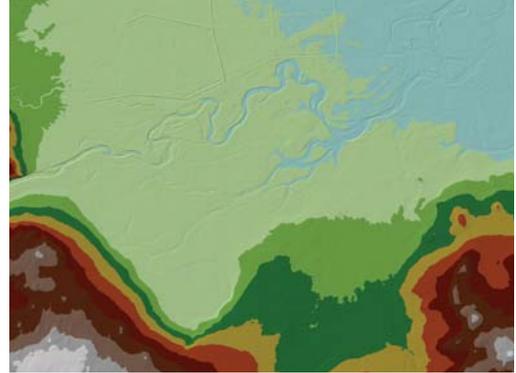


Рис. 7. Цифровая модель местности (слева) и гипсометрическая картограмма (справа) территории рудника Лиманное

Полученные цифровые модели местности (рис. 6, 7) были использованы в качестве фактической основы для производства векторных топографических карт масштаба 1:2000. Картографирование местности выполнялось путем дешифрирования ортофотопланов с последующей векторизацией контурной части сооружений, дорожной сети, техногенных нарушений естественного рельефа и других объектов ситуации. Кроме того, по результатам морфометрического анализа цифровой модели рельефа были дополнительно определены и обозначены такие особенности ландшафта территорий, как линии тальвегов, водоразделов, гидрологическая сеть и области водосборов. Общий размер площади картографирования в районах месторождений Кундызды и Лиманное составил порядка 210 кв. км, что соответствует 210 листам планшетов М 1:2000 стандартной прямоугольной разграфки (рис. 8) с размером стороны рамки планшетов, равным 50 см.

Цифровое картографирование территории

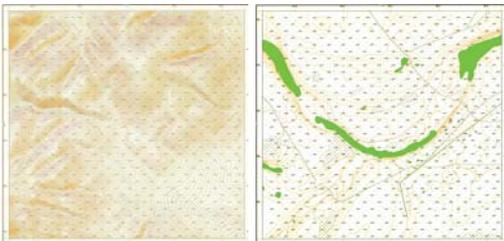


Рис. 8. Образцы планшетов топографических карт М 1:2000 территорий рудников Кундызды (слева) и Лиманное (справа)

производилось согласно с этими требованиями инструкции по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов, в соответствии [8].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ORIENTATION MODELS OF OPTICAL HIGH RESOLUTION SATELLITE IMAGERY: DEFINITION, IMPLEMENTATION AND VALIDATION OF ORIGINAL ALGORITHMS Francesca Fratarcangeli DITS – Area di Geodesia e Geomatica – Università di Roma “La Sapienza” – via Eudossiana 18 – Rome, Italy francesca.fratarcangeli@uniroma1.it
2. Ebner, H. and Reiss, P. (1978). Height interpolation by the method of finite elements. In *Proceedings of the Digital Terrain Modelling Symposium, St. Louis, pages 241–254.*
3. Kraus, K. (1998). *Interpolation nach kleinsten Quadraten versus Krige-Schatzer. Osterreichische Zeitschrift fur Vermessung & Geoinformation, 1.Dadsad.*
4. Ackermann, F., K. Kraus, (2004): *Reader Commentary: Grid Based Digital Terrain Models. Geoinformatics, Vol. 7, Copy 6, pp. 28-31.*
5. Kraus, K. (1997): *Eine neue Methode zur Interpolation und Filterung mit Daten schiefer Fehlverteilung. VGI 85, S. 25-30.*
6. Briese, C., Pfeifer, N., Dorninger, P. (2002): *Applications of the Robust Interpolation for DTM determination. IAPRS, Volume 34, Part 3A, Graz.*
7. Большаков В.Д. *Теория ошибок наблюдений.* — М: Недра, 1983. — 223с.
8. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. ГКИНП(ГНТА)-02-036-02. — М.: ЦНИИГАуК, 2002.