

А. И. Баскаков (ТОО «Казгипроцветмет»)

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

Использование программного обеспечения INPHO для задач съемки подробностей и моделирования форм горной геометрии открытых разработок

Дистанционные методы зондирования Земли в настоящее время все в большей степени находят свое применение с целью создания высокодетальных геоинформационных моделей техногенных ландшафтов местности, включающих открытые разработки, объекты инфраструктуры горно-обогатительного комплекса и прилегающие к ним территории [1]. Такие модели успешно используются в качестве фактической цифровой геоподосновы всех элементов ситуации, динамически изменяющейся при эксплуатации рудника. Данные, получаемые на основе материалов космической стереосъемки сверхвысокого разрешения, позволяют на более эффективном уровне решать многие задачи маркшейдерского обслуживания, выполнять оперативный тотальный мониторинг состояния поверхностей карьеров и отвалов, проводить анализ геометрии их подробностей, рассчитывать объемы выемки/насыпи, осуществлять перспективное планирование горных разработок

и т. п. Источником трехмерных данных в этом случае является фотограмметрическая стереомодель местности, которая порождает облако точек, сопоставимое по плотности с результатами воздушного лазерного сканирования. В результате интерпретации облака точек генерируются планово-высотные измерения необходимых структурных подробностей горной геометрии поверхностей открытых разработок. Эти измерения в дальнейшем могут быть непосредственно использованы для выполнения анализа деформаций бортов карьеров в задачах геомеханического мониторинга и пополнения (составления) как погоризонтных, так и сводных маркшейдерских планов горных работ. В целом полученные измерения образуют единую геопространственную основу, используемую для выработки оперативных горнотехнических условий и мероприятий по эксплуатации месторождений и объектов инфраструктуры рудников.

В качестве иллюстрации сказанного на рис. 1 и 2 изображены фрагменты цифровых трехмерных моделей карьера рудника Космурун и прилегающих к нему отвалов вскрышных пород. Эти модели созданы по материалам космической стереосъемки сверхвысокого разрешения предлагаемым ниже образом. Что же касается традиционных наземных методов маркшейдерских съемок, то, как показывает практический опыт, они достаточно трудоемки и не столь оперативны, как дистанционные методы, и в целом уступают им в эффективности. С точки зрения современных методов дистанционного зондирования традиционная съемка наземными методами имеет невысокую детальность и дает весьма приближенное аппроксимационное представление поверхностей горной геометрии. При этом адекватность (точность) этой аппроксимации принципиально зависит от опыта и квалификации исполнителя работ и по этой причине не поддается объективным точностным оценкам. Повышение же детальности съемки путем увеличения числа измерений приводит к значимому росту затрат и входит в противоречие с требованием оперативного отражения динамики изменения горной ситуации при добыче и складировании руды. К тому же в некоторых случаях достаточно затруднительно, а порой и невозможно получить точные измерения подробностей формы карьеров и отвалов в области труднодоступных участков поверхностей откосов, осыпей, оползней, обвалов, а также заполненных пульпой хвостохранилищ и шламонакопителей.

Технология космической стереосъемки, включая обработку и получение высокоточных материалов, имеет в сравнении с традиционными наземными методами значительно более высокую производительность, низкую себестоимость и недоступную для традиционных методов



Рис. 1. Трехмерная модель карьера рудника Космурун



Рис. 2. Трехмерная модель отвалов рудника Космурун

информативность. Комплексное использование при маркшейдерском обслуживании в качестве источников данных фотограмметрической стереомодели местности и наземных методов топогеодезических наблюдений позволяет значительно сократить производственные затраты и оперативно получать геоинформационные материалы необходимого содержания на совершенно новом качественном уровне.

Интегрирование технологии интерпретации материалов космической стереосъемки INPHO в систему мониторинга открытых разработок дает возможность рассматривать фотограмметрическую стереомодель местности в качестве основного (альтернативного) источника массовых измерений геометрии пространственных форм и тем самым значительно

сократить объемы периодически выполняемых наземных топогеодезических наблюдений при съемке подробностей и обмерах горной массы открытых разработок.

Специальное программное обеспечение INPHO включает, в частности, технологический инструментарий модулей MATCH-T_DSM, DT-MASTER_STEREO и SCOP++, предназначенный для генерации облаков точек высокой плотности с последующим их анализом в соответствии с выбранной DTM - или DSM-концепцией интерпретации получаемых измерений. Реализация данной технологии позволяет не только подробно описать характерные формообразующие структурные особенности любых поверхностей техногенного рельефа, но и произвести с использованием математического аппарата распознавания, классификации, фильтрации и интерполяции измерений облака точек [2, 3] полномасштабную и достоверную оценку точности создаваемых моделей этих поверхностей как на уровне отдельно взятых элементов, так и в целом. При выполнении съемок открытых разработок традиционными наземными методами такую оценку нельзя сделать в принципе. Так, ввиду сложности строения техногенных поверхностей и при наличии возможных нарушений их проектной геометрии, исполнитель может пропустить отдельные технологически важные элементы ситуации или не придать соответствующего значения некоторым, на его взгляд, не важным элементам окружающей обстановки. Это обстоятельство в дальнейшем может привести к неполному, а иногда и недостоверному отражению действительного состояния объектов съемки. При интерпретации измерений облака точек, получаемых на основе фотограмметрической стереомодели местности, подобная ситуация полностью исключается в силу

того, что в данном случае выполняется анализ целиком всей сцены съемки и в сомнительных случаях возможно многократно уточнять необходимость отображения того или иного элемента. Таким же естественным образом решается проблема выполнения измерений в недоступных для человека местах: в пределах откосов, обрушений, оползней и т. п.

В соответствии с договором на проектирование объектов инфраструктуры горно-обогатительного комплекса рудников Акбастау и Космурун, заключенным институтом «Казгипроцветмет» с корпорацией «Казахмыс», была выполнена космическая стереоскопическая съемка с аппарата GeoEye-1 указанных рудников, находящихся на территории Аягузского района Восточно-Казахстанской области. Полученная стереопара панхроматических изображений была использована для разработки практического подхода к совместному использованию DSM- и DTM-режимов интерпретации измерений в концепции INPHO с целью создания пространственных моделей поверхностей техногенного рельефа и фактической основы маркшейдерских планов горных работ карьера рудника Космурун с примыкающими к нему отвалами горных пород (рис. 3).

В основу предлагаемого подхода положены достаточно общие объективные свойства поверхностей открытых разработок [4]. А его реализация состоит из описанных ниже технологических операций, имеющих целью сформировать такое множество измерений съемочных точек, которое является достаточным для описания подробностей форм техногенных поверхностей с нужной степенью детальности.

1. По результатам определения параметров проекта INPHO, первичной подготовки файлов изображений и их радиометрической коррекции, выполнения внешнего ориентирования снимков в системе координат



Рис. 3. Карьер Космурун с отвалами

местности в среде DT-MASTER_STEREO создается фотограмметрическая стереомодель территории съемки.

2. Правомерно считать, что области открытых разработок не осложнены наличием растительности, а поверхности карьеров и отвалов можно описать с помощью таких элементов горной геометрии [4], какими являются технологические структурные линии. С учетом характера возникновения, в качестве структурных линий «негладких» перегибов поверхности целесообразно рассматривать:

- верхние и нижние бровки уступов;
- линии, образованные в результате отколов, развалов, осыпей, провалов, оползней, навалов и других нарушений;
- вертикальные разделительные линии сложных откосов;
- линии, ограничивающие транспортные пути и съезды.

С целью получения измерений узлов структурных линий перечисленных типов путем использования модуля MATCH_T в режиме DSM рассчитывается облако точек

измерений поверхности карьера или отвала для выбранного значения параметра XY-factor в пределах от одного до трех пикселей. С использованием стереорежима в среде DT-MASTER_STEREO (монитор Planar SD2620W/ StereoMirror) выполняется картирование трехмерных структурных линий путем набора съемочных пикетов из множества измерений полученного облака точек с учетом всех характерных особенностей формы поверхности. Согласно [5] расстояние между пикетами для М 1:2000 может варьироваться в пределах от 5 до 30 м в зависимости от сложности контуров значимых форм поверхности.

3. Технологические условия проектирования и эксплуатации открытых разработок предполагают «гладкую» геометрию поверхностей берм, откосов, транспортных съездов и горизонтальных площадок, взаимное сопряжение которых выполняется по линиям «гладкого» перегиба. В случае присутствия на этих поверхностях различных нарушений в виде оползней и провалов последние рассматриваются состоящими из отдельных частей, разделенных структурными линиями «негладкого» перегиба. Поверхности же самих осыпей, оползней, а также навалов руды, которые имеют весьма сложную форму, можно считать вполне «гладкими» поверхностями в силу причины их образования.

Для расчета множества измерений массовых точек на указанных «гладких» поверхностях используется режим DTM-модуля MATCH_T с шагом результирующей сетки в пределах от 10 до 15 м, причем полученные в п. 2 структурные линии используются при этом расчете в качестве предопределенных морфологических элементов будущей поверхности.

В процессе MATCH_T генерации измерений и последующем формировании внутренней SCOP/DTM-модели была выполнена оценка точности получаемых значений по 10 контрольным точкам, измеренным наземными

методами на поверхностях карьера и отвалов с малыми уклонами. Из приведенной части протокола генерации DTM-модели (табл.) следует, что гарантированная оценка ошибки расчета высот составила порядка 0,115 м, что более чем соответствует нормативным требованиям [5] для масштаба 1:2000 и величине сечения рельефа 0,5 м.

№	Тип	Point-ID	Point-Z	DEM-Z	dZ (м)
1	F	A1	854.218	854.071	0.147
2	F	A2	812.910	812.915	0.005
3	F	A3	833.053	832.903	0.150
4	F	A4	801.629	801.455	0.174
5	F	A5	824.636	824.475	0.161
6	F	A6	858.597	858.444	0.153
7	F	A7	865.297	865.163	0.134
8	F	A8	873.465	873.304	0.161
9	F	A9	867.879	867.813	0.066
10	F	A10	861.658	861.649	0.009

Табл. Протокол генерации DTM-модели. Число контрольных точек 10

4. Не ограничивая общности, можно считать, что поверхность карьера или отвала с необходимой подробностью можно описать набором непересекающихся плоских треугольников, вершины которых образованы узлами структурных линий из п. 2 и выбранными характерными точками поверхности. Для предотвращения образования в будущей TIN-модели поверхности вырождающихся треугольников с помощью инструментария модуля DT-MASTER из рассмотрения автоматически удаляются те массовые точки, расстояние от которых до узлов структурных линий составляет менее 5 метров. Также в пределах формообразующих «гладких» участков поверхности, которые имеют малые изменения значений уклонов, множество массовых точек при необходимости прореживается

с учетом положения характерных точек особенностей форм, подлежащих картированию. Оставшиеся в результате массовые точки и структурные линии, полученные в п. 2, непосредственно используются для конструирования TIN-моделей поверхностей карьера и отвалов.

Созданные непрерывные кусочно-линейные цифровые трехмерные TIN-модели поверхностей открытых разработок (рис. 4, 5) могут быть непосредственно использованы для расчета объемов выемки/насыпи карьеров, отвалов вскрышных пород и складов полезного ископаемого как по отдельным горизонтам или их частям, так и в целом по каждому из объектов.

Непосредственно сами данные измерений элементов горной геометрии поверхностей

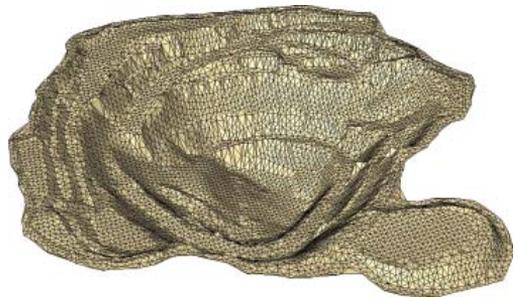


Рис. 4. Карьер Космурун с отвалами. Трехмерная TIN-модель

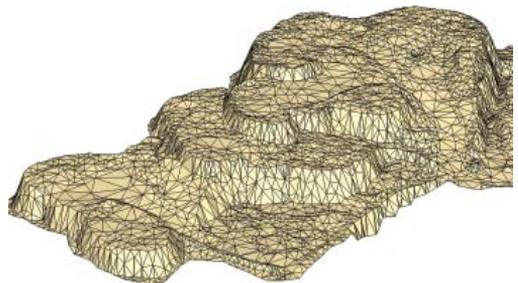


Рис. 5. Отвалы карьера Космурун. Трехмерная TIN-модель



Рис. 5. Фрагмент топографического плана карьера Космурун

в виде структурных линий и характерных массовых точек составляют, по сути, фактическую основу планов горных работ и отражают текущие ситуационные изменения, происходящие в ходе отработки карьера. С использованием указанных данных были созданы сводные топографические планы карьера и отвалов (рис. 6), которые могут быть положены в основу динамически изменяемых при эксплуатации погоризонтных маркшейдерских планов горных работ, используемых для точного расчета производственных параметров выработки, решения задач оперативного и перспективного планирования добычи полезного ископаемого, прогнозирования площади отчуждаемых земель, тотального мониторинга и оценки воздействия на окружающую среду, выполнения мероприятий по рекультивации отвалов и т. п.

В соответствии с требованиями [5] на сводном топографическом плане (Рис. 6) карьера Космурун изображены:

- верхние и нижние бровки уступов и их высотные отметки;
- вертикальные линии откола, уступов, заходок и откосов;
- линии границ обрушений, провалов и оползней;
- характерные точки поверхности карьера на пологих участках и откосах;

- внутренние отвалы, съезды, осыпи, обрушения, оползни;
- фактические границы поля карьера, естественный рельеф и ситуация земной поверхности.

Поскольку добыча руды открытым способом неотвратно влечет за собой техногенное разрушение и преобразование естественных ландшафтов как непосредственно при добыче руды, так и при развитии компонентов инфраструктуры горно-обогатительного комплекса в целом, то возникает необходимость построения единой трехмерной модели всей зоны техногенного воздействия с учетом прилегающих территорий. В этой ситуации рассмотренным выше образом поочередно создаются отдельные фактические основы для каждого из компонентов зоны техногенного воздействия: карьера, отвалов и прилегающей территории — с использованием в каждом случае своего набора управляющих параметров расчета DSM- или DTM-моделей. Затем полученные данные объединяются в единое множество для конструирования целостной пространственной TIN-модели всей зоны техногенного воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В. Е. Создание комплекса геопространственной основы на территорию ОАО «Лебединский горно-обогатительный комбинат» // *Геоматика*. — 2012. — №2(15). — С.35–38.
2. Kraus, K. (1997): *Eine neue Methode zur Interpolation und Filterung mit Daten schiefer Fehlerverteilung*. VGI 85, S. 25–30.
3. Briese, C., Pfeifer, N., Dorninger, P. (2002): *Applications of the Robust Interpolation for DTM determination*. IAPRS, Volume 34, Part 3A, Graz.
4. Ушаков И. Н. *Горная геометрия*. М.: Недра, 1979.
5. Синянян Р. Р. *Маркшейдерское дело*. М.: Недра, 1982.