

## Технология построения трехмерных карт внутренних помещений объекта «Укрытие»

Т. А. Кравчук<sup>1</sup>, А. Н. Ненахов<sup>1</sup>, Г. Л. Гимельфарб<sup>2</sup>, Б. О. Михалевич<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Межотраслевой научно-технический центр «Укрытие» НАН Украины, Чернобыль

<sup>2</sup>Center for Image Technology and Robotics, Department of Computer Science,  
Tamaki Campus, University of Auckland, Auckland, New Zealand

<sup>3</sup>German Aerospace Center (DLR), Institute of Space Sensor Technology and Planetary Exploration,  
Department of Passive Sensor Systems, Berlin, Germany

Известные в настоящее время программы автоматического восстановления рельефа, входящие в состав коммерческих фотограмметрических пакетов, не позволяют проводить фотограмметрическую обработку снимков закрытых помещений, и рассчитаны на использование специализированной съемочной аппаратуры (фотоаппаратов и сканеров). Основные области их применения — картография и дистанционное зондирование Земли, где эти пакеты используются для восстановления цифровых моделей рельефа земной поверхности по стереоскопическим аэрокосмическим снимкам. В этих приложениях восстанавливаемую поверхность можно рассматривать как непрерывную, видимую во всех точках стереоскопически и почти не имеющую на каждом из снимков стереопары участков, загороженных другими участками.

При трехмерном построении карт закрытых помещений чаще всего эти условия не выполняются: в этих случаях большинство поверхностей имеют разрывы из-за взаимного загромождения по отношению к каналам стереосъемки.

В традиционной фотограмметрии используются, как правило, высокоточные и потому дорогие фотокамеры воздушного и наземного базирования. Предлагаемая технология предполагает, что исходные стереосъемки производятся неспециализированными недорогими фотоаппаратами (бытовыми или профессиональными). Применение неспециализированной техники значительно снижает затраты на проводимые работы (в особенности если радиационная обстановка в местах съемки не позволяет в дальнейшем использовать эту технику) и выполнять съемки в тех труднодоступных местах, в которые невозможно пройти с громоздкими специализированными фотограмметрическими приборами. Разумеется, использование неспециализированной съемочной аппаратуры приводит к определен-

ной потере точности измерений и существенно изменяет процедуры калибровки аппаратуры. Для проведения фотограмметрических работ невозможно использовать оцифрованные материалы видеосъемки из-за их очень низкого пространственного разрешения и крайней сложности ориентирования.

В частности, съемки внутренних помещений объекта «Укрытие» должны выполняться бытовыми или профессиональными фотоаппаратами с ручной (и неизменной в процессе начальной калибровки и собственно съемки) настройкой по резкости, диафрагме и выдержке.

Работы могут выполняться как по черно-белым, так и по цветным снимкам. Использование цветных снимков позволяет значительно ускорить и повысить качество обработки за счет лучшей интерпретации ситуации оператором (по сравнению с черно-белыми снимками) и получить дополнительную информацию об объектах за счет цветовой кластеризации.

Рабочей платформой для данной технологии является компьютер на основе процессора класса Pentium, оснащенный графической видеосистемой высокого разрешения и стереоскопической приставкой.

Технология цифровой фотограмметрической обработки стереоскопических снимков преследует такие цели:

- упростить процесс построения карт рельефа и трехмерных моделей закрытых помещений объекта «Укрытие» по материалам многократных стереофото съемок;
- использовать для этих работ результаты стереосъемок, проведенных с помощью обычных (неспециализированных) фотоаппаратов.

Внедрение такой технологии позволит:  
— сократить длительность и уменьшить стоимость проведения измерительных работ, которые должны

выполняться на объекте «Укрытие» в экстремальных радиационных условиях;

— получить результаты измерений пространственного рельефа помещений с высокой скоростью и достаточной для практики точностью;

— упростить ввод данных в современные системы автоматизированного инженерного проектирования и геоинформационные системы (ГИС);

— получить результаты стереоскопических измерений, которые недоступны без использования технологий цифровой фотограмметрии.

Предлагаемая технология частично основана на оригинальных результатах, которые обладают лицензионной чистотой и не имеют аналогов среди известных отечественных и зарубежных работ. К ее основным особенностям относятся:

— использование цифровой фотограмметрии для построения трехмерных моделей закрытых помещений при заранее неизвестном и заведомо резко ограниченном объеме данных, требуемых для калибровки съемочной аппаратуры;

— необходимость использования неспециализированных фотокамер для проведения фотограмметрических съемок;

— необходимость объединения в едином технологическом процессе интерактивного и автоматического восстановления рельефа и пространственного положения объектов сцены.

Основным звеном технологии является комплекс программ, позволяющих проводить калибровку съемочной фотоаппаратуры; ориентирование и трансформирование снимков; получать по цифровой стереопаре координаты объектов, восстанавливать пространственный рельеф поверхности и строить трехмерную графическую модель наблюдаемого помещения в интерактивном и автоматизированном режимах.

Технология получения трехмерных карт помещений объекта «Укрытие» основана на следующих основных этапах получения и обработки стереоснимков и сопутствующих данных:

— подборе съемочной аппаратуры и предварительной калибровке;

— предварительном анализе особенностей конкретного помещения и выработке требований к сбору снимков;

— окончательной калибровке аппаратуры с возможной адаптацией программно-алгоритмического обеспечения;

— разработке методики, планированию и проведению натурной стереосъемки, подготовительных работах;

— фотографической обработке и фотопечати снимков;

— оцифровке фотоматериалов;

— внутреннем и взаимном ориентировании сним-

ков стереопар, приведение к базисной геометрии, внешнем ориентировании, пространственная фото-триангуляция и построения единой фотограмметрической модели;

— интерактивном построении цифровой карты помещения по набору снимков, автоматическом восстановлении рельефа на отдельных участках;

— интерактивном редактировании цифровой карты и формировании цифровой трехмерной графической модели помещения.

Для получения пространственных координат точек (объектов) и пространственного рельефа закрытого помещения по снимкам производится стереоскопическая фотосъемка. Стереосъемка выполняется одним или двумя аппаратами из различных точек, отстоящих на определенное расстояние (базис стереосъемки), при этом поля зрения должны иметь перекрытие и оптические оси должны быть параллельными.

Основные условия съемки, определяющие точность результатов: длина базиса, величина фокусного расстояния, размер используемого фотоматериала.

Длина базиса должна быть сопоставима с размерами измеряемых объектов, фокусное расстояние фотоаппарата для метрической стереосъемки должно быть порядка 50...100 мм. Длина базиса и фокусное расстояние оказывают совместное влияние на величину стереоскопического перекрытия, которое должно составлять 60...80 % снимаемой поверхности. В частности, для контрольной стереопары, полученной с помощью бытового фотоаппарата «Minolta» с фокусным расстоянием 50 мм и кадром 24×36 мм, были выполнены следующие операции:

— оцифровка фотоотпечатков снимков стереопары формата 9×12 см с помощью сканера с разрешающей способностью 0.085 мм на точку;

— предварительная обработка с целью выравнивания фотографического тона и улучшения визуального восприятия стереопары;

— внутреннее ориентирование снимков (определение положения центра снимка и масштабов по осям);

— взаимное ориентирование и трансформирование снимков стереопары для приведения к базисной геометрии;

— интерактивное восстановление пространственных координат отдельных точек наблюдаемой сцены в режиме ручного цифрового стереокомпаратора;

— проверка точности восстановления путем сравнения полученных и известных размеров отдельных объектов;

— построение трехмерной каркасной модели отдельных выделенных объектов для использования в

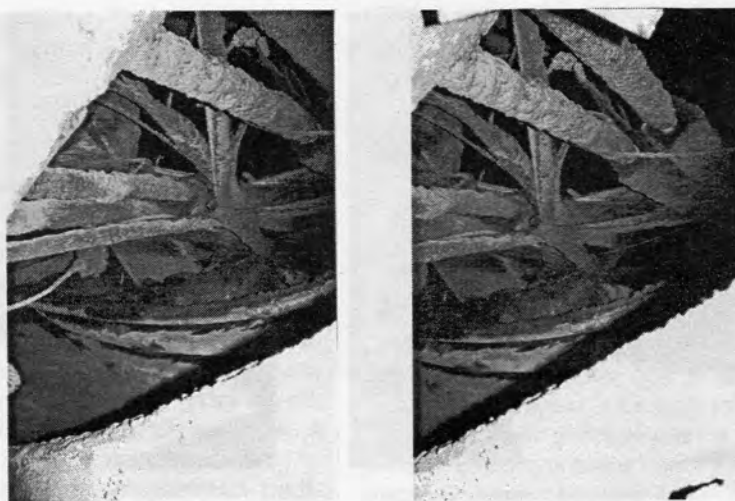


Рис. 1. Исходная стереопара

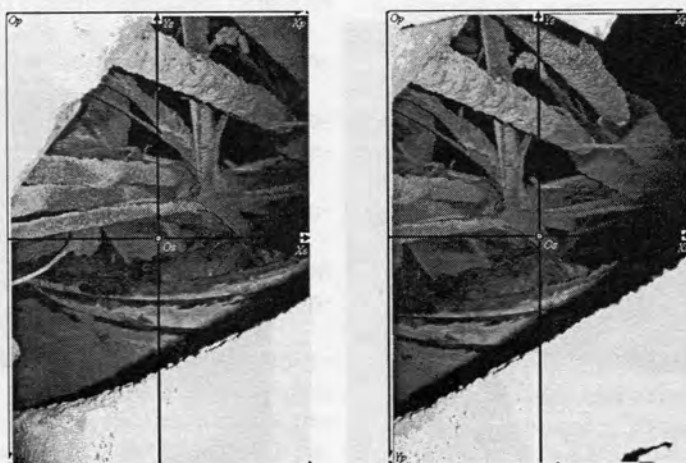


Рис. 2. Изображения стереопары с системами координат цифровых изображений  $O_p X_p Y_p$  и исходных фотоснимков  $O_S X_S Y_S$

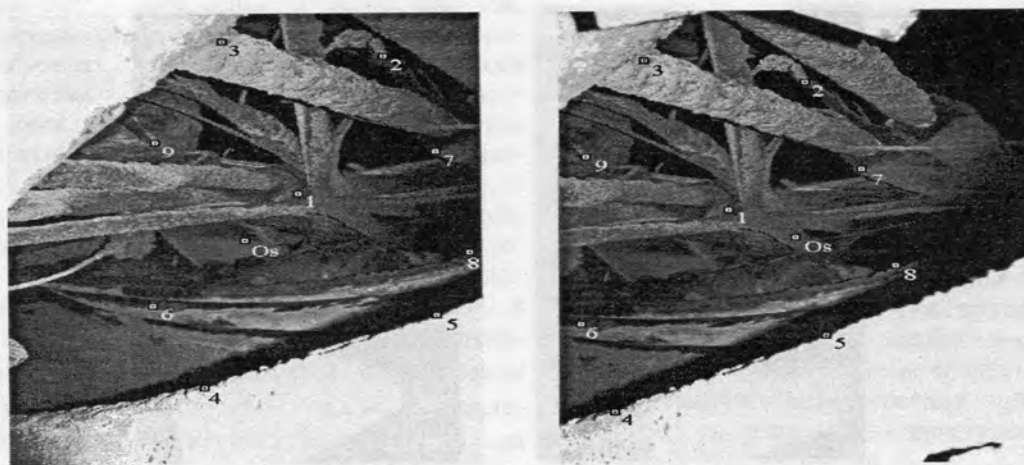


Рис. 3. Исходная стереопара с обозначенными соответственными точками и центрами снимков  $O_S$

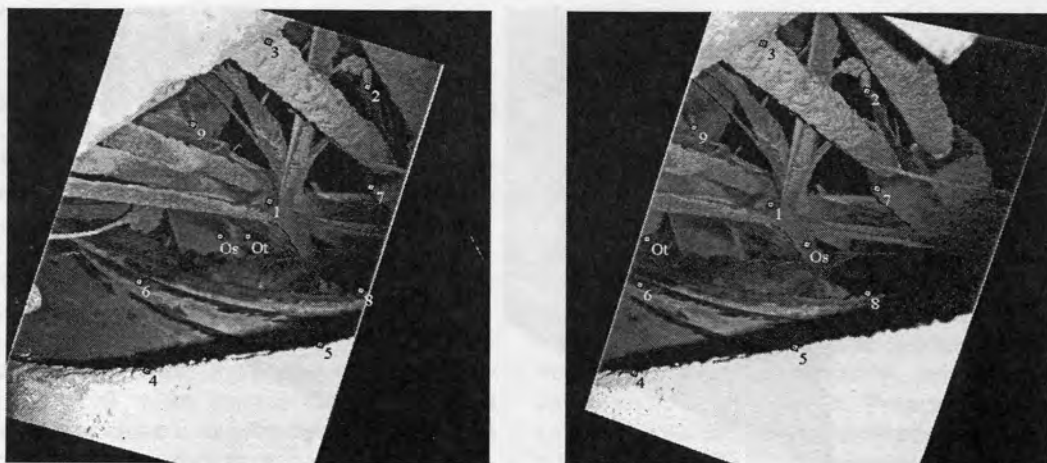


Рисунок 4. Трансформированная стереопара с обозначенными соответственными точками, центрами исходных  $O_S$  и трансформированных снимков  $O_T$

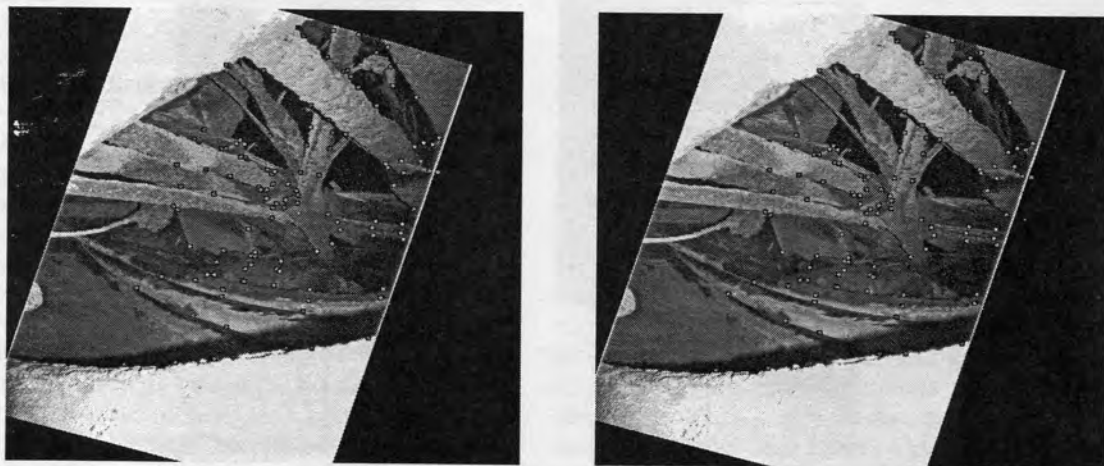


Рис. 5. Изображения стереопары с обозначенными соответственными точками

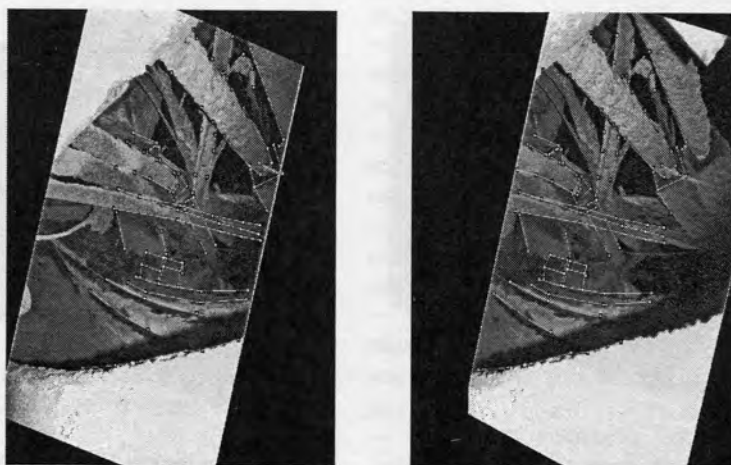


Рис. 6. Изображения стереопары с прорисованными контурными линиями

системе AutoCAD.

Внешнее ориентирование снимков не производилось из-за отсутствия необходимых измерений на местности, хотя в программном обеспечении эти параметры учитываются. В качестве параметров внешнего ориентирования в эксперименте использовались реальное значение базиса стереосъемки и условные координаты центров проектирования.

В состав разработанного программного обеспечения входят следующие автономные модули:

— цифровой стереокомпаратор, позволяющий определять координаты точек трехмерной сцены по координатам соответствующих точек на снимках, продольные и поперечные параллаксы этих точек снимков и визуализировать снимки стереопары в стереоскопическом и анаглифическом режимах;

— программа внутреннего ориентирования цифровых снимков;

— программа взаимного ориентирования снимков стереопары;

— программа внешнего ориентирования цифровых снимков;

— программа пространственного трансформирования цифровых снимков (используется для приведения к базисной геометрии);

— программа определения пространственных координат по координатам точек на снимках;

— программа построения трехмерной каркасной модели в формате DXF по пространственным координатам узловых точек.

Полученные снимки были отпечатаны на фотобумаге формата  $9 \times 12$  см и оцифрованы сканером EPSON GT-6000 в режиме «GrayScale» с разрешением 300 DPI. Размер цифровых изображений равен  $1200 \times 1800$  пкл, объем одного изображения составляет 2.1 МВ. Для работы выбрана стереопара, показанная на рис. 1.

Проведено внутреннее ориентирование снимков. По координатам углов фотоотпечатков на цифровых изображениях и размерам кадрирующей рамки фотоаппарата были определены направления координатных осей, рассчитаны координаты центров снимков и эквивалентный масштаб цифровых изображений.

На рис. 2 показаны углы и центры снимков, координатные оси фотоснимков и цифровых изображений. Рис. представляет соотношение координатных систем цифровых изображений  $O_p X_p Y_p$  и исходных снимков  $O_s X_s Y_s$ . Начало координат цифрового изображения  $O_p$  находится в его левом верхнем углу. Ось  $X_p$  — горизонтальная, направлена вправо. Ось  $Y_p$  — вертикальная, направлена вниз. Единица измерений — пиксель. Начало координат фотоснимка  $O_s$  совпадает с точкой, через которую проходит оптическая ось фотоаппарата

(луч выходящий из центра проекции и перпендикулярный плоскости фотопленки). Оси данной системы параллельны сторонам прижимной рамки фотоаппарата. Ось  $X_s$  — горизонтальная, направлена вправо. Ось  $Y_s$  — вертикальная, направлена вверх. Единица измерений — миллиметр. В общем случае оси фотоснимка и оси цифрового изображения могут не быть параллельными.

Взаимное ориентирование выполняется для устранения разворотов снимков и приведения снимков к базисной геометрии, т. е. к «идеальной» стереопаре. При этом снимки располагаются в одной плоскости, оптические оси взаимно параллельны и перпендикулярны к базису стереосъемки. Приведение снимков стереопары к базисной геометрии делает более удобной работу оператора и упрощает последующие расчеты.

Взаимное ориентирование снимков предполагает нахождение пяти угловых элементов взаимного ориентирования, определяющих взаимные повороты снимков в пространстве. Оно проводится по координатам соответственных точек снимков методом последовательных приближений с использованием расчета приращений угловых элементов взаимного ориентирования, направляющих косинусов и трансформированных координат. Критерием взаимного ориентирования являются «остаточные» поперечные параллаксы.

На контрольной стереопаре были выбраны девять пар соответственных точек. По элементам взаимного ориентирования было выполнено трансформирование исходных снимков. Исходные и трансформированные снимки с указанными на них соответственными точками представлены на рис. 3 и 4.

В процессе взаимного ориентирования также было уточнено значение фокусного расстояния фотоаппарата (паспортное 50 мм). Уточнение производилось путем последовательных приближений по минимуму остаточных поперечных параллаксов. Минимум достигался при значении фокусного расстояния равного 47.35 мм.

Внешнее ориентирование снимков проводится по опорным точкам местности с известными координатами во внешней трехмерной системе координат (геодезической или местной) с целью определения пространственного положения фотоаппарата и оптической оси относительно данной системы на момент проведения съемки, т. е. привязки снимков к местности и привязки определяемых координат объектов к внешней системе координат. К параметрам внешнего ориентирования принадлежат три метрических элемента — пространственные координаты центра проекции  $X_s, Y_s, Z_s$  и три угловых элемента, определяющие пространственное направление оптической оси, —  $\alpha, \omega, \kappa$ .

На обрабатываемую контрольную стереопару нет данных по опорным точкам местности, поэтому внешнее ориентирование снимков не производилось. Координаты центров проекции и рассчитываемые координаты точек объектов заданы в фотограмметрической системе координат. Ее начало совпадает с центром проекции левого снимка, оси  $X$  и  $Y$  этой системы параллельны соответствующим осям левого снимка, ось  $Z$  перпендикулярна плоскости левого снимка и проходит через центр проекции. В такой системе координат ось абсцисс и базис стереосъемки совпадают.

Дальнейшая обработка стереопары проводилась с использованием программы реализующей функции цифрового стереокомпаратора. Программа позволяет отображать снимки стереопары в стереоскопическом и анаглифическом режимах, определять координаты точек на цифровых и исходных фотоснимках, получать значения продольных и поперечных параллаксов, рассчитывать пространственные координаты точек на местности.

На изображениях стереопары было выбрано 119 контурных точек (края труб, углы блоков и т. п.). На рис. 5 представлены изображения с отмеченными соответственными точками, на рис. 6 — с прорисованными контурными линиями. Для каждой точки были измерены координаты на левом и правом цифровых изображениях. По этим координатам и элементам внутреннего ориентирования было рассчитано положение точек на фотоснимках. Перевод координат точки из системы координат цифрового изображения в систему координат снимка осуществляется по формулам:

$$X_s = (X_p - XO_{S_p})m_x;$$

$$Y_s = (Y_p - YO_{S_p})m_y,$$

где  $X_s$  и  $Y_s$  — координаты точки на снимке,  $X_p$  и  $Y_p$  — координаты точки на цифровом изображении,  $XO_{S_p}$  и  $YO_{S_p}$  — координаты центра фотоснимка на цифровом изображении,  $m_x$  и  $m_y$  — масштабные коэффициенты.

В соответствии с формулами  $p = x_1 - x_2$  и  $q = y_1 - y_2$  по координатам точек на снимках были рассчитаны продольные и поперечные параллаксы. Отсутствие поперечных параллаксов свидетельствует о

том, что данная стереопара приведена к базисной геометрии (к «идеальной» стереопаре).

По координатам точек и продольным параллаксам на снимках было рассчитано их пространственное положение относительно центра съемки левого снимка, принятого за начало местной системы координат. Для расчета использовались упрощенные формулы, применяемые в случае идеальной стереопары:

$$Z = \frac{fB}{p}, \quad X = \frac{xZ}{f}, \quad Y = \frac{yZ}{f}$$

или

$$Z = \frac{fB}{p}, \quad X = \frac{xB}{p}, \quad Y = \frac{yB}{p},$$

где  $B$  — базис съемки,  $f$  — фокусное расстояние фотоаппарата,  $x$  и  $y$  — координаты точки на левом снимке;  $p$  — продольный параллакс;  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  — координаты точки на местности.

Для проверки точности определения положения точек объектов были рассчитаны расстояния между некоторыми из них. Расстояние рассчитывалось как евклидова дистанция в трехмерном пространстве:

$$L = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2}.$$

Из объектов, изображенных на снимках, истинные размеры известны только для графитовых блоков, находящихся в центре изображения (таблица).

Среднее значение относительной ошибки составляет 6 %. Наибольшие значения ошибок получены при измерении объектов, находящихся в тени и имеющих разрушенные края, т. е. в ситуации, когда невозможно осуществить точное отождествление измеряемых точек. Это связано с дискретностью цифрового изображения и невозможностью наведения на точку с точностью, превышающей размеры элемента дискретизации. С повышением разрешающей способности сканирования точности ориентирования снимков и использовании стереоскопического наблюдения можно повысить точность получаемых результатов и уменьшить ошибки.

По трехмерным координатам точек объектов с помощью программы-конвертера была построена трехмерная векторная модель измеряемых объектов. Записанная в формате DXF модель была вве-

Расстояния между точками объектов

Точки	Объект	Расчетное расстояние, мм	Реальное расстояние, мм	Абсолютная ошибка, мм	Относительная ошибка
87—88	Графитовый блок	266.060	250.000	-16.060	6.4
89—90	Графитовый блок	321.879	250.000	-71.879	28.7
93—94	Графитовый блок	250.493	250.000	-0.493	0.0
95—96	Графитовый блок	249.764	250.000	0.236	0.0

дена в систему автоматического проектирования AutoCAD. Средствами AutoCAD модель была записана в формате DWG.

#### Выводы

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что внедрение предлагаемой цифровой стереофотограмметрической технологии на объекте «Укрытие» позволит:

Получать трехмерные карты закрытых помещений по материалам специально организованной стереофотосъемки;

Использовать недорогие бытовые неспециализированные фотоаппараты, а дальнейшую обработку материалов проводить с использованием персональной компьютерной техники и минимума нестандартного оборудования;

Использовать разработанное программное обеспечение, наиболее полно учитывающее особенности

помещения и применяемого для исследования оборудования;

Получать результаты, принципиально недоступные без использования цифровых методов, упростив ввод получаемых результатов в САПР и ГИС;

Существенно снизить время пребывания людей в помещениях с высоким уровнем загрязнения и повысить эффективность выполняемых работ, ограничив пребывание на объекте «Укрытие» подготовкой и проведением съемки;

Сосредоточить в «чистых» условиях основные операции по обработке фотоматериала, измерениям пространственных координат, построению модели и карты помещения.

Технология съемки загрязненных помещений объекта «Укрытие» проста в исполнении и максимально снимает дозовые нагрузки на персонал при последующих технологических операциях. Обучение навыкам работы с предлагаемой технологией не требует специальных знаний и подготовки персонала.