



УДК 550.370; 550.379; 528.71

ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ПЛОЩАДНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ

В. С. Степченков¹, Д. К. Большаков¹¹Геологический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

В сообщении приведены результаты практического применения наземной фотограмметрии для получения оценок взаимного пространственного расположения электродов площадной расстановки при измерениях методом электротомографии. Описаны основные общие особенности полевой методики получения первичных данных наземной фотограмметрической съемки с целью определения пространственных координат точечных электродов, расположенных на дневной поверхности участка детальных площадных электроразведочных исследований. Рассмотрены специфические особенности обработки данных наземной фотограмметрии, связанные с расположением и состоянием участка работ, условиями проведения съемки. Результаты съемки представлены в виде изометрической проекции дневной поверхности площади участка геофизических исследований с указанием расположения электродов, а также, совместно с данными метода электротомографии. По результатам использования наземной фотограмметрии для сопровождения детальных площадных геофизических работ сделаны выводы о производительности, качестве и точности данных, возможности совершенствования методики их получения, даны практические рекомендации по применению фотограмметрии в аналогичных условиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: НАЗЕМНАЯ ФОТОГРАММЕТРИЯ, ДНЕВНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ, ТРЕХМЕРНАЯ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЯ

EDN: ZQONLJ

1. ВВЕДЕНИЕ

Основным результатом электротомографических измерений на площади [Большаков и др., 2019] является пространственное распределение значений удельного электрического сопротивления (объемная модель), отражающее особенности геологического строения приповерхностной части исследуемого при инженерно-геологических изысканиях участка работ. Неотъемлемая часть геометрии, объемной (трехмерной) модели, – дневная поверхность. Для ее построения, как правило, используются данные геодезической съемки или готовые детальные карты (геоподоснова). При проведении площадных опытно-методических работ с целью выявления оптимальной методики получения трехмерных электротомографических данных авторы настоящего сообщения не располагали ни аппаратурой, ни временем для проведения геодезических измерений, а доступ к детальным картам территории отсутствовал. Среди нескольких альтернативных способов получения данных о рельефе дневной поверхности нашего участка опробования площадных методик электротомографии, с учетом особенностей измерений на площади, современных возможностей

Электронная почта авторов для переписки:

Степченков Владимир Сергеевич, e-mail: v-stepchenkov@list.ru
Большаков Дмитрий Константинович, e-mail: dkbolshakov@yandex.ru<https://elibrary.ru/zqonlj>Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

наземной фотограмметрии [Gruen, 2012] и имеющегося практического опыта [Степченков и Валганов, 2019] был выбран именно этот способ. В данном сообщении описан опыт применения метода наземной фотограмметрии для получения значений относительных превышений электродов площадной расстановки метода электротомографии.

Развитие фотограмметрии, особенно заметное в последние два десятилетия, связано с интенсивным развитием и внедрением новых разработок и технологий, программных, технических приложений, во многих сопутствующих научно-практических областях. Трехмерная визуализация стала важной частью почти всех этапов большинства научных исследований, а особенно, представления результатов, которые, в настоящее время, получаются благодаря применению динамично обновляющихся практических приложений, реализующих как усовершенствованные алгоритмы цифровой обработки данных, так и новые, ориентированные на использование преимуществ искусственного интеллекта. При этом, сами полевые экспериментальные данные собираются, все чаще, с применением телеметрических систем и беспилотных летательных аппаратов. Совершенствование технологий и уверенное развитие в области создания электронных компонентов, программных алгоритмов и компьютерных приложений является хорошей динамично развивающейся потенциальной основой для появления новых и модернизации уже имеющихся методов и способов решения прикладных задач, в том числе электротомографии и фотограмметрии. С помощью фотограмметрии создаются точные цифровые модели местности, ортофотоснимки и ортофотопланы для документирования, визуализации, анализа, обработки и демонстрации.

2. ВОЗМОЖНОСТИ И ОСОБЕННОСТИ ФОТОГРАММЕТРИИ

Возможности фотограмметрии широко используются не только при подготовке и изготовлении картографических материалов. Не претендуя на полноту изложения этого вопроса, отметим основные моменты и особенности применения метода фотограмметрии, который, как и большинство прикладных направлений, фактически, представляет собой технологию, состоящую из нескольких обязательных последовательных шагов (этапов), требующих при их прохождении обязательного соблюдения определенных правил и требований (методических рекомендаций). Именно следование этим рекомендациям, сформулированным в некоторых публикациях, к сожалению, лишь в общем виде, позволяет использовать весь спектр возможностей метода, которые открываются после получения результата фотограмметрической съемки.

В настоящее время фотограмметрические работы являются основной составной частью современных технологий создания и обновления топографических карт. Именно результаты фотограмметрии являются базовой основой при создании цифровых топографических карт и планов, изготовлении фотокарт и специализированных планов. Возможности фотограмметрии по сбору топографической информации в цифровом виде, ее обработке, представлению результатов широко используются в современном производстве картографической продукции разных масштабов (1:25 000, 1:10 000, 1:5 000, 1:2 000, 1:1 000, 1:500) и назначений. В частности, например, ортофотопланы и трехмерные цифровые модели рельефа дневной поверхности активно используются для геоинформационного анализа, точных измерений и разнообразных дополнительных исследований. Высокое качество регистрации (документации) геометрии объектов, изменений рельефа и микрорельефа различных поверхностей, реальных условий, особенностей участков исследований реализуется в цифровых трехмерных моделях изготавливаемых для решения разнообразных прикладных задач во многих других областях (архитектура, строительство, проектирование, дизайн, медицина, археология, компьютерные игры и др.). Возможность отображения с высокой точностью и многоуровневой детализацией (основных особенностей и мельчайших деталей) практически любых объектов различных размеров и форм позволяет демонстрировать и изучать эти объекты дистанционно, используя их виртуальные высококачественные трехмерные копии, которые, в некоторых случаях, благодаря обилию деталей и качественной цветопередаче выглядят настолько реалистично, что практически не отличаются от оригиналов.

Независимо от области применения фотограмметрии, цифровые трехмерные модели создаются на основе двумерных фотоснимков. Высокая степень детальности моделей обеспечивается соответствующим качеством первичного полевого материала и цифровой компьютерной обработкой. Благодаря задокументированному с высокой точностью состоянию поверхности изучаемого участка (объекта), разрешению и качеству получаемых цифровых моделей открываются возможности для

выявления деталей и особенностей геометрии, проведения точных измерений, других дополнительных исследований. Таким образом, метод фотограмметрии в настоящее время активно используется из-за широкого спектра предоставляемых возможностей для решения прикладных задач самой разнообразной направленности. Результаты применения фотограмметрии востребованы во многих производственных, научно-исследовательских и других областях человеческой деятельности.

Основной особенностью всей технологии фотограмметрии и каждого из ее этапов является направленность на получение удовлетворительного конечного результата, который зависит как от объективных факторов и условий, так и от специфики решаемой прикладной задачи, уникальных особенностей (состояние, геометрия, свойства) территории (объекта) исследования. Таким образом, окончательный результат зависит от качества последовательно получаемых промежуточных результатов на каждом из этапов технологии. Именно это обстоятельство, эта зависимость, подчиненность результатов диктует основное, на наш взгляд, главное правило, которым следует руководствоваться при использовании метода, – не следует перекладывать трудности прохождения текущего этапа на следующий. Фактически это означает, что каждый промежуточный результат следует получать в наилучших (из возможных) объективных условиях, используя (или специально выбирая, создавая) наиболее благоприятные моменты и обстоятельства, способствующие улучшению качества результата проводимых действий и процедур.

Практическое применение фотограмметрии разделено на два основных этапа: полевой (сбор первичных данных) и камеральный (обработка данных, получение и представление результата). Однако, несмотря на такое традиционное разделение, каждая прикладная задача имеет свои специфические особенности и, на наш взгляд, независимо от варианта съемки (аэро, наземная, студийная и др.) требует некоторой дополнительной специальной подготовки полевого этапа, что положительно отразится на его результатах и, следовательно, благоприятно повлияет на результаты камерального этапа. На подготовительном этапе необходимо проанализировать и использовать имеющуюся априорную информацию об участке (объекте) исследований для планирования и корректировки, сложившейся благодаря многолетней практике применения, универсальной последовательности действий полевого этапа, сформировать оптимальную последовательность сбора первичного материала, спланировать необходимые дополнительные работы. В некоторых публикациях по фотограмметрии указанную универсальную последовательность действий называют «сценарием съемки», но нам, как геофизикам, ближе термин «методика». Таким образом, на подготовительном этапе применения наземной фотограмметрии, следует планировать методику получения первичных полевых данных с использованием общих рекомендаций и информации об уникальных особенностях участка исследований.

Необходимо отметить, что методика применения фотограмметрии для подготовки картографического материала различных масштабов регламентирована нормами и правилами, оформленными в виде соответствующих утвержденных инструкций. К сожалению, особенности фотограмметрической съемки и методические рекомендации для подготовки карт и планов масштаба крупнее 1:500 в них отсутствуют. Аналогичные инструкции, публикации с указанием особенностей применения именно наземного варианта метода с целью построения карты относительных превышений в нужном нам масштабе 1:100, обнаружить не удалось. Однако, общие основные особенности методики наземной фотограмметрии для построения карт рельефа дневной поверхности масштаба 1:100, можно сформулировать взяв за основу общие методические рекомендации для подготовки карт масштаба 1:500, изложенные в двух инструкциях по фотограмметрическим работам. Первая из них [Инструкция, 1974], утвержденная Главным управлением геодезии и картографии при совете министров СССР являлась обязательной «для всех ведомств и учреждений СССР», а вторая [Инструкция, 2002], пришедшая ей на смену, утверждена приказом (№ 84-пр. от 11.06.02) руководителя Федеральной службы геодезии и картографии России и введена в действие с 1 августа 2002 г. «для исполнения всеми субъектами геодезической и картографической деятельности». Проанализировав указанные инструкции, опираясь на собственный опыт применения наземной фотограмметрии для создания (около 50 шт.) трехмерных цифровых моделей археологических объектов [Степченков и Валганов, 2019], аналогичную информацию из доступных публикаций и руководств к программному обеспечению для анализа и обработки данных фотограмметрии [Agisoft..., 2018] мы собрали и обобщили основные положения, рекомендации и требования, соблюдение которых необходимо для получения удовлетворительного результата. Руководствуясь этой обобщенной информацией, нами сформулированы методические рекомендации по выполнению наземной фотограмметрической съемки для построения карты относительных превышений рельефа дневной

поверхности масштаба 1:100, необходимой для представления, обработки и корректной интерпретации данных площадных опытно-методических работ методом электротомографии.

3. РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КАРТЫ ВЫСОТ МАСШТАБА 1:100

Построение карты высот выполняется специальным программным обеспечением с использованием результатов обработки первичных данных метода фотограмметрии и является одной из неотъемлемых частей процесса создания трехмерной цифровой модели. Детальность и требуемая точность этих результатов обеспечивается процедурами цифровой компьютерной обработки фотографий высокого разрешения, полученных на полевом этапе со значительными перекрытиями.

Перекрытие снимков

Методические рекомендации по выполнению полевых работ методом наземной фотограмметрии направлены на выполнение требований, предъявляемых программным обеспечением к первичным данным. Эти требования связаны с особенностями применения современных алгоритмов цифровой обработки и обеспечивают получение конечного результата, соответствующего действующим нормам и правилам, указанным в утвержденных инструкциях. В частности, одним из требований инструкций, предъявляемых к первичным полевым данным метода фотограмметрии, является обязательное выполнение съемки по маршруту с получением фотографий поверхности изучаемого участка, объединенных в серию. При этом каждая последующая фотография в серии должна иметь область (площадь) перекрытия с предыдущей около 60%. Некоторые разработчики программного обеспечения в описаниях к своим программам утверждают, что алгоритмы обработки справятся не только с маршрутными данными, но и с хаотично выполненными снимками, предлагая увеличить область перекрытия фотографий до 80%, а перекрытие в 60% считать нижним пределом. В то время как, утвержденные инструкции рекомендуют значение нижнего предела поперечного (между соседними маршрутами) перекрытия фотоснимков не менее чем 30%. Оставив в стороне обсуждение недостатков и преимуществ «хаотичного накопления» полевого материала, авторами настоящего сообщения предлагается при выполнении наземной фотограмметрической съемки придерживаться маршрутной методики с получением серий последовательно сделанных фотографий, перекрывающихся не менее чем на 60%. Отметим только, что для нас привычнее называть такую наземную методику съемки профильной. При этом маршруты, проходятся вдоль профилей – воображаемых параллельных друг другу линий, закрепленных на участке исследований, например, деревянными кольшками. В соответствии с утвержденными инструкциями, поперечное перекрытие между сериями фотографий вдоль соседних профилей – не менее 30%.

Шаг по профилю и межпрофильное расстояние

Что практически означают значения указанных перекрытий? С каким шагом вдоль профиля нужно фотографировать и какое расстояние выбрать между профилями? Для ответа на эти вопросы нужно знать размеры прямоугольной области, которая попадает в кадр фотоаппарата. Размеры эти связаны с высотой размещения камеры и ее ориентацией относительно фотографируемой поверхности. Пробные снимки цифровой камерой ориентированной осью объектива перпендикулярно к плоскости фотографируемой поверхности с высот 1.3 и 2.4 м позволили оценить линейные размеры охватываемых прямоугольных областей, которые составили 1.2 x 0.9 м и 2.4 x 1.8 м, соответственно. Отметим, что отношение длины большей стороны охватываемой прямоугольной области к длине меньшей составляет в обоих случаях 1.33, а значения площадей равны, соответственно, 1.08 и 4.32 кв. м. При перемещении камеры вдоль профиля на расстояние равное половине одной из сторон прямоугольной области охвата площадь перекрытия соседних снимков фотографируемой поверхности (с учетом точности перемещения 0.1-0.25 м) составит около 50%. Следовательно, выбрав шаг по профилю равным половине длинной стороны прямоугольной области охвата (0.6 и 1.2 м, соответственно) и уменьшив это значение до величины удобной при практическом использовании (0.5 и 1 м, соответственно) получим следующие оценки площади перекрытия соседних снимков.

При перемещении камеры вдоль длинной стороны площади охвата на высоте 1.3 м с шагом 0.5 м площадь перекрытия соседних фотографий – 0.63 кв. м, что составляет около 60% (58.33%) от площади снимка (1.08 кв. м). Аналогично, при перемещении камеры на высоте 2.4 м с шагом 1 м площадь перекрытия соседних фотографий – 2.52 кв. м, что также составляет около 60% (58.33%) от

площади снимка (4.32 кв. м). Таким образом, для имеющейся у нас в доступе цифровой камеры фотограмметрическую наземную съемку на высотах 1.3 и 2.4 м следует проводить с шагом вдоль профиля 0.5 и 1 м, соответственно.

Необходимо отметить, что при незначительном увеличении высоты съемки площадь перекрытия соседних снимков увеличится. Следовательно, выполнение съемки на высотах, например, 1.5 и 2.5 м, пусть и незначительно, но снизит требования к позиционированию камеры (к соблюдению точных значений шага, высоты, ориентации), что позволит сократить время на выполнение полевых работ без потери качества первичного материала. В нашем случае, при выборе значения межпрофильного расстояния совпадающего со значением шага вдоль профиля, перекрытие фотографий на соседних профилях (поперечное перекрытие) фотограмметрической съемки значительно, «с запасом», превысит необходимое, утвержденное в инструкциях и указанное в руководствах значение (не менее 30%). Действительно, для высоты камеры 1.3 м площадь поперечного перекрытия снимков – 0.48 кв. м, что составляет 44.4% от площади области охвата (1.08 кв. м), а для высоты камеры 2.4 м – 2.16 кв. м, что составляет 50% от площади области охвата (4.32 кв. м). Очевидно, что эти значения весьма избыточны и шаг между профилями фотограмметрической съемки следует увеличить. И все же, мы рекомендуем этого не делать, так как такие значения избыточных поперечных перекрытий позволяют при выполнении полевых работ снизить требования к точности позиционирования камеры в поперечном направлении, что, по нашему мнению, является важным преимуществом, значительно упрощает съемку и экономит время, требующееся на получение каждого отдельного снимка в серии. Таким образом, фотограмметрическую наземную съемку на высотах 1.3 и 2.4 м с имеющейся в доступе цифровой камерой следует проводить вдоль профилей с межпрофильным расстоянием равным шагу по профилю – 0.5 и 1 м, соответственно. Определившись с главными методическими параметрами для выполнения наземной фотограмметрической съемки масштаба 1:100, кратко рассмотрим другие основные параметры, влияющие на окончательный результат и связанные с методикой, аппаратурой и условиями проведения полевых работ.

Объем данных, время и условия съемки, характеристики аппаратуры

В нашем случае размеры участка фотограмметрической съемки и объем данных определяются размерами площадной расстановки электродов для проведения измерений методом электротомографии. Общее количество электродов – 240 шт. Они расположены по равномерной прямоугольной сети с одинаковым межэлектродным расстоянием (1 м) так, что площадь, занятая электродами (207 кв. м), представляет собой прямоугольник, вдоль длинной стороны (23 м) которого установлено 24 электрода, а вдоль короткой (9 м) – 10 электродов. Одним из основных требований разработчиков программного обеспечения для обработки данных фотограмметрии является обязательное наличие в первичном полевом материале снимков областей, прилегающих к участку съемки. Фактически, это требование, являясь важным указанием-напоминанием, дублирует требование о перекрытии фотографий. В практическом смысле оно означает, что методика получения фотографий на краях участка не должна отличаться от методики получения снимков центральной части участка, что обеспечит качество и однородность всего полевого материала. Следовательно, обобщая эти замечания, получаем еще одно важное методическое условие-требование о том, что начинать и заканчивать съемку вдоль каждого профиля следует так, чтобы первый и последний снимок профильной серии охватывал площадь только за пределами участка, а одна из сторон прямоугольной области охвата лежала на границе участка. Это означает также, что первый и последний профили фотограмметрической съемки следует располагать за пределами исследуемого участка. С учетом сделанных замечаний, линейных размеров нашего участка исследований и значения шага фотограмметрической съемки (0.5 м) с высоты 1.3 м количество снимков в серии вдоль одного профиля составляет 2 шт. x 24 эл. + 1 шт. = 49 ПК, а число профилей – 10 ПР + 9 между ПР = 19 ПР. Общий объем данных для высоты камеры 1.3 м составляет 49 ПК x 19 ПР = 931 фото. Результаты аналогичных оценок для съемки с шагом 1 м с высоты 2.4 м следующие: 1 + 24 эл. + 1 = 26 фотографий вдоль профиля, 1 + 9 + 1 = 11 профилей, общий объем – 26 ПК x 11 ПР = 286 фото. Отметим, что с увеличением высоты съемки на 1 м (с 1.3 м до 2.4 м), – почти в два раза, – общий объем фотографий поверхности участка уменьшается более чем в три раза (от 931 до 286 фото). При этом отношение шагов съемки – 2, а отношение площадей прямоугольных областей, охватываемых снимком – 4. Таким образом, в нашем случае, предпочтительнее выполнение фотограмметрической съемки с высоты 2.4 м.

Какое же время необходимо чтобы сделать почти 300 фотографий, перемещая камеру на высоте около 2.5 метров вдоль прямой линии на 1 м, ориентируя ее ось и выравнивая площадь охвата перед

каждым снимком? Сколько времени нужно на выполнение всех этих операций? Можно ли их выполнять автоматически? Возможно ли сделать это один раз, например, перед каждым профилем и получить серию снимков с максимально возможной скоростью и комфортом. Да, именно комфортом! Удобство, легкость выполнения съемки, простота осуществления контроля за соблюдением параметров методики и качеством получаемого материала означает минимальную утомляемость оператора. Чем позже устанет оператор, тем позже ослабнет контроль. Уставший оператор совершает ошибки, с исправлением которых обработка может и не справиться. Предположим, что переход с одного пикета на другой выполняется за 20 секунд. Это означает, что на получение фотографий вдоль одного профиля потребуется $20 \text{ с} \times 26 \text{ фото} = 520 \text{ с} \sim 9 \text{ минут}$. Около 10 минут – на один профиль длиной 23 м. При таком темпе прохождение всех профилей займет $10 \times 11 \text{ ПР} = 110 \text{ мин.}$, т.е. около двух часов. Весьма оптимистичная получилась оценка для высоты съемки в 2.4 м. Для высоты съемки в 1.3 м аналогичная оценка составляет $(20 \text{ с} \times 49 \text{ ПК}) \times 19 \text{ ПР} \sim 310 \text{ мин.}$, т.е. около пяти с половиной часов.

Возможно, при решении прикладной задачи требующей выполнения только фотограмметрии, полученная временная оценка приемлема, но в нашем случае, когда основной целью полевого этапа (пусть и опытно-методических) работ, является проведение измерений методом электротомографии, пять с половиной часов для получения первичных данных о рельефе дневной поверхности – это очень много, так как для 240 измерений с геодезической аппаратурой, пусть даже и по 20 с на отсчет, общее время составит 80 мин. (= 1 час 20 мин.) И дело не только в этом, и не в утомляемости оператора, которого можно менять раз в пару часов, или даже чаще... Основной момент здесь в том, что за такое длительное время условия съемки изменятся, и не просто поменяются с одного состояния на другое, а многократно, несколько раз. Важным следствием таких «пульсаций», например, интенсивности освещения, является неоднородность получаемого первичного полевого материала, в котором все, даже незначительные, изменения зафиксируются с присущим методу фотограмметрии высоким качеством и откликнутся в характеристиках фотографий. К сожалению, нет уверенности, что применение современных процедур обработки, выправит эту ситуацию и весь объем полевого материала окажется пригодным для использования и получения конечного результата.

Именно поэтому, в описаниях к программному обеспечению разработчики специально перечисляют (пусть иногда и не полностью) «основные правила», которые следует соблюдать (хотя бы придерживаться) для того, чтобы «исходные данные» в полном объеме использовались при обработке и получении окончательного результата. Среди этих правил и конкретные методические указания, и просто пожелания. В частности, например, рекомендуется «избегать нежелательных объектов на переднем плане и перемещений объектов». В нашем случае это означает, что во время фотограмметрической съемки другие измерения, например, методом электротомографии (требующие около шести часов), не проводятся, так как необходимые при площадных измерениях методом электротомографии, перемещения двух оранжевых проводов, по участку работ, фиксируются на фотографиях. Указанные и другие особенности (тени, дождь, ветер и пр.), связанные с изменениями условий съемки, к сожалению, трудно контролировать, но они влияют на качество первичного материала и, следовательно, на окончательный результат. Уменьшить это влияние возможно, как благодаря выбору подходящего периода для проведения съемки (сезон, время суток, погода и др.), так и благодаря выбору таких методик и технологий выполнения работ, при которых на сбор первичного полевого материала тратится минимальное время. Таким образом, с учетом сделанных замечаний, из двух рассмотренных методик наземной фотограмметрии наиболее предпочтительной является методика с расположением камеры на высоте 2.4 м над поверхностью участка исследований, обеспечивающая наименьшее время измерений.

Весьма важными, влияющими на качество и общую пригодность фотографий для обработки и построения трехмерной цифровой модели, являются характеристики и «внутренние параметры» аппаратуры, используемой при выполнении фотограмметрических работ. При получении первичного материала фотограмметрической съемки программистами-разработчиками рекомендуется делать фотографии с максимально возможным разрешением, используя камеры с матрицами высокого разрешения (более 5 МПикс). Современные камеры фотоаппаратов и смартфонов (с матрицами 7-12 МПикс и более) комплектуются системами автоматического определения и установки параметров экспозиции. Однако, при фотограмметрической съемке использование таких автоматических систем недопустимо, так как крайне желательно, необходимо получить весь полевой материал без изменений параметров регистрации. Следовательно, одной из обязательных характеристик используемой для полевых работ аппаратуры является возможность установки параметров экспозиции вручную.

Дополнительно, весьма полезной и желательной является функция закрепления, фиксации установленных значений на все время съемки, что делает невозможным случайное изменение выставленных значений. По нашему мнению, перед началом съемки следует выполнить несколько пробных снимков и подобрать оптимальные значения для параметров экспозиции (фокусное расстояние, диафрагма, выдержка, чувствительность). Использование методики с минимальным временем сбора данных со всего участка позволяет надеяться на то, что незначительные изменения условий съемки за время ее проведения, не потребуют перенастройки этих оптимальных значений. В руководствах к программному обеспечению для некоторых параметров аппаратуры рекомендуются допустимые пределы изменения, для других – конкретные значения, которые следует установить, не сомневаясь в их правильности. В частности, предпочтительно использование широкоугольных (короткофокусных) и нормальных объективов с фиксированным фокусным расстоянием (желательно 50 мм). Значение чувствительности (ISO) и диафрагмы рекомендуется устанавливать минимально возможными для минимального влияния дополнительных шумов и максимальной глубины резкости, соответственно. Избежать эффекта размытия фотографии от дрожания и при случайном движении (например, из-за нажатия кнопки) помогут короткая выдержка и надежная фиксация камеры, а использование соответствующих форматов (RAW, TIFF и др.) цифровых снимков гарантирует минимальное количество нежелательных шумов и исключает потерю информации при сжатии данных. Идеальные полевые условия для наземной фотограмметрической съемки складываются лишь в облачную погоду, при которой обеспечивается равномерное, рассеянное освещение [Степченков и Валганов, 2019].

Окончательным результатом для нас является не цифровая трехмерная модель, а карта рельефа дневной поверхности участка работ с относительными значениями координат электродов (без указания абсолютных отметок и точной координатной привязки). Получение этого результата методом наземной фотограмметрии возможно при наличии первичных полевых данных точно такого же объема и качества, как и для построения детальной трехмерной цифровой модели. Именно поэтому обобщенные методические рекомендации для проведения наземных фотограмметрических работ изложены так, чтобы ими можно было воспользоваться и получить оба результата. В действительности, объем полевого материала для построения карты относительных измерений рельефа дневной поверхности получаемый благодаря применению предлагаемой методики является крайне избыточным. Более того, указанные методические особенности фотограмметрической съемки для нашего участка сформулированы уже после выполнения работ, так как решение об их проведении было вынужденным, принималось спонтанно в полевых условиях без анализа и конкретных оценок. Однако, пусть и с опозданием, общие методические рекомендации сформулированы и изложены. Конкретные оценки объемов данных, времени съемки (и др.) сделаны, в том числе и для того, чтобы сравнить насколько соответствуют наши представления тому, что реально было получено на участке работ, насколько велики отличия и как это сказалось на окончательном результате.

4. НАЗЕМНАЯ ФОТОГРАММЕТРИЯ ДЛЯ ПЛОЩАДНОЙ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ

Участок измерений методом электротомографии

Опытнo-методические работы по опробованию вариантов площадных методик получения трехмерных электротомографических данных выполнены летом 2024 года во время проведения учебной практики студентов геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на звенигородской биологической станции (Московская обл., Одинцовский городской округ, пос. Луцино). Площадная расстановка электродов для измерений методом электротомографии (рис. 1),

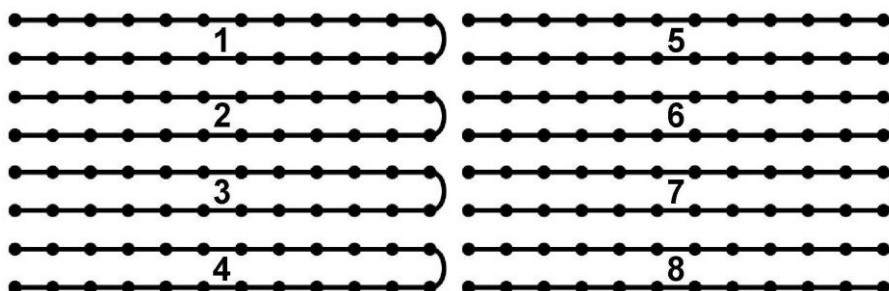


Рис. 1. Схема площадной расстановки электродов (черные кружки, 192 шт.) из восьми сегментов

размещалась на территории проведения одной из учебных задач практики («Экологическая задача») для возможности быстрой установки и непрерывного обслуживания геофизической аппаратуры, постоянного контроля сохранности оборудования, демонстрации студентам процесса подготовки и проведения площадных измерений, одновременного проведения и опытно-методических работ, и учебной задачи. Измерения методом электротомографии выполнены на расстановке из 240 электродов (десять сегментов), установленных на площади вдоль склона (терраса Москва-реки, правый берег) по равномерной сети с шагом 1 x 1 м. Для подключения электродов к станции использовано уникальное оборудование (рис. 2, www.geoscan.su), изготовленное и опробованное в 2019 г. [Большаков и др., 2020]. Последовательное попарное подключение десяти сегментов электроразведочных кос (по 24 электрода на сегмент) к станции «Омега-48М» (www.logsys.ru) осуществлялось с помощью двух удлинителей (www.geodevice.ru).



Рис. 2. Комплект оборудования (электроды, провода) из десяти площадных сегментов (макс. шаг по x – 2 м)

Для достижения удовлетворительной точности расположения электродов на местности (без использования геодезической аппаратуры), обильный травяной покров на участке работ (рис. 3) был скошен (рис. 4, 5), в некоторых местах почти полностью удален (рис. 4-6).



Рис. 3. Участок работ перед началом подготовки измерений (вид с северной стороны)



Рис. 4. Внешний вид западной части участка работ после удаления растительности (вид из центра участка)



Рис. 5. Участок работ после удаления растительности (вид с СЗ угла)

Благодаря подготовительным работам по расчистке участка и ликвидации растительности, средняя точность установки электродов составила около 2 см.



Рис. 6. Внешний вид участка работ после размещения электродов (вид с ЮЗ угла)

Из-за жаркой сухой погоды и необходимости обеспечения удовлетворительных, низких значений переходных сопротивлений, глубина погружения электродов в грунт составляла более половины их длины. При длине электрода около 25 см, на поверхности оставалось 5-10 см (рис. 7), что позволило увеличить площадь гальванического контакта, получить значения сопротивления заземлений менее 3 кОм и обеспечить условия для нормальной работы электроразведочной станции без дополнительного увлажнения почвы и группирования электродов.



Рис. 7. Внешний вид установленного на местности электрода (видна лишь четверть длины)

Таким образом, участок работ методом электротомографии в плане представлял собой прямоугольник со сторонами 23 и 9 м, на котором по равномерной сети (1 x 1 м) были заземлены 240 электродов. Границы участка на местности были обозначены белыми мерными лентами руловок. Информация о рельефе дневной поверхности обследуемой территории, необходимая для представления полевых данных метода электротомографии, корректного проведения двумерной инверсии и последующего построения объемной модели строения приповерхностных геологических образований, получена по результатам обработки данных фотограмметрии.

Методика наземной фотограмметрической съемки и объем данных

Наземная фотограмметрическая съемка участка опробования площадных методик электротомографии выполнялась фотоаппаратом Canon EOS 700D (матрица 12 МПикс) с объективом Sigma DC 18-250 MACRO HSM на высотах от 0.4 м до 1.8 м без использования дополнительных приспособлений и оборудования. Было выполнено общее и детальное фотографирование участка. При общем фотографировании самого участка, его периметра и прилегающей к периметру территории (1-2 м) снимки выполнялись с шагом около одного метра на нескольких высотах и в разных направлениях. Этот полевой материал использовался для создания общей трехмерной аппроксимации дневной поверхности участка. При детальном фотографировании участка, снимки выполнялись вдоль профилей электротомографии (длина 23 м) со сгущением шага съемки до 0.5 м, в зависимости от наличия и количества деталей. Этот полевой материал использовался для детализации общей трехмерной аппроксимации дневной поверхности участка работ.

Для получения однородных первичных данных параметры экспозиции выставлялись вручную, без использования автоматических настроек, что исключило возможные случайные изменения и перенастройки камеры. Общий объем полевого фотограмметрического материала для создания аппроксимации дневной поверхности участка составил 2165 фотографий. Он был отснят оператором электроразведочной станции короткими сериями снимков во время проведения измерений методом электротомографии. Общее время наземной фотограмметрической съемки составило около двух часов.

Необходимо отметить условия проведения съемки и основные особенности получения первичного материала. Фотографирование участка проведено в ясную, практически безоблачную погоду, что повлияло на отсутствие снимков (не выполнялись!) из таких положений (направлений), в которых тень, отбрасываемая оператором, занимала более 50% кадра. Жара и полное отсутствие ветра привели к сильному нагреву и фотограмметрической, и электроразведочной аппаратуры. Несмотря на организованную защиту от прямого попадания солнечных лучей, вся имеющаяся аппаратура работала на пределе возможностей, со сбоями и только благодаря принудительному охлаждению. Удаление растительности на участке работ было выполнено с целью создания благоприятных условий для разбивки регулярной сети без использования геодезического оборудования. Да, это обеспечило достижение удовлетворительной точности размещения электродов (около 2 см) на местности, но оказалось совершенно недостаточным для создания благоприятных условий проведения фотограмметрической съемки. Оставшийся (в некоторых местах довольно густой) травяной покров препятствовал получению изображений дневной поверхности, подлежащей восстановлению (реконструкции) средствами компьютерной обработки фотографий, полностью скрывая ее. Однако, решение о проведении наземных фотограмметрических работ все-таки было принято, а сама съемка проведена без полного освобождения дневной поверхности участка работ от травяного покрова. Таким образом, в некоторых местах участка работ дневная поверхность просматривалась, но на большей части площади фотографируемой территории этому препятствовал оставшейся травяной покров (10-15 см). Фактически, с некоторых ракурсов были выполнены такие снимки, на которых и дневная поверхность отсутствует (полностью или частично), и электроды визуальным образом плохо распознаваемы или вообще не просматриваются (траву фотографировали, к сожалению, а не грунт с электродами!). Указанные особенности проведения наземной фотограмметрической съемки и крайняя необходимость в получении удовлетворительного результата вынудили нас к повторному получению некоторых серий снимков, фактически, дублированию данных, что отразилось в избыточности объема первичного полевого материала, качество которого анализировалось компьютерной программой в камеральных условиях на этапе обработки.

Общие особенности обработки данных фотограмметрии

Для получения результатов фотограмметрической съемки первичные полевые данные необходимо обработать, используя специальное программное обеспечение, содержащее набор процедур, в которых реализованы алгоритмы анализа, отбора, коррекции, совмещения снимков и расчетов геометрии пространственной математической аппроксимации исследуемого участка (объекта). Последовательное применение процедур автоматической и ручной обработки к каждой серии изображений позволяет последовательно, шаг за шагом, отобрать из серии снимков пригодные для обработки фотографии, выявить характерные точки реконструируемой поверхности участка на нескольких снимках, правильно ориентировать отобранные снимки, определить внешние и внутренние параметры камеры (положение, ориентация, фокусное расстояние и др.), рассчитать пространственные координаты характерных точек поверхности, визуализировать результаты расчетов в виде изометрической проекции восстанавливаемой поверхности, рассчитать цифровую трехмерную модель. Обнаружение характерных точек, их сопоставление, создание объемной аппроксимации поверхности и построение трехмерной модели осуществляется программным обеспечением, как правило, в несколько этапов с привлечением связанных последовательностей изображений, имеющих перекрытия. Благодаря перекрытиям одни и те же точки аппроксимируемой поверхности видны под разными углами. Применение алгоритмов сопоставления характерных точек в парах двумерных изображений и алгоритмов распознавания совпадающих точек, а также вычисления положений, внутренних и внешних параметров камеры выполняются в автоматическом режиме и требуют использования мощного компьютера. Продолжительность вычислений зависит как от качества и количества имеющихся изображений, так и от заданного качества и детальности результирующей цифровой модели, количества и размеров воспроизводимых особенностей, доступных для документации, визуализации и анализа.

Особенности программного обеспечения для обработки данных фотограмметрии

Общее время, затраченное на обработку наших данных с использованием компьютера Lenovo Legion Y9000P (Intel Core i9, 5.4 ГГц, 64Гб RAM, Nvidia GeForce RTX 4060) составило около 8 часов, два из которых – расчеты программы. Обработка полевых данных наземной фотограмметрической съемки дневной поверхности проведена с использованием программного обеспечения

Agisoft Metashape (PhotoScan), разработанного российской компанией Agisoft (www.agisoft.com). Полный цикл обработки включает последовательное прохождение нескольких процедур, в каждой из которых реализованы алгоритмы анализа, отбора первичных данных, расчетов геометрии, а также процедур ручного ввода дополнительных данных и значений характерных параметров (например, требуемой точности, детальности и др.), необходимых для автоматического проведения вычислений и получения удовлетворительного результата. К сожалению, ни в одном из последних руководств к программе (например, 2018 года [Agisoft ..., 2018]), ни в более ранних, принципы построения и работы реализованных в процедурах алгоритмов не раскрываются, что является серьезным препятствием для развития и совершенствования приемов сбора первичного материала наилучшим образом подходящего и соответствующего особенностям именно этого программного обеспечения.

Одной из особенностей использованной программы является предварительная проверка пригодности полевого материала для проведения обработки. По каким конкретно критериям производится эта проверка программисты-разработчики не указывают, однако из «общих соображений» возможно предположить, что контролируется соблюдение основных методических рекомендаций для серий, выполненных последовательно, с перекрытиями, фотографий и, по-видимому, качество каждого отдельного снимка. Среди одиннадцати требований к «исходным данным», указанных разработчиками и приведенных под заголовком «основные правила», одно имеет следующую формулировку: «излишек фотографий лучше, чем недостаток». Строго следуя при выполнении съемки этому «основному правилу» и остальным десяти требованиям, именно сериями, был получен, довольно большой и, по нашему мнению, избыточный объем первичного материала. Все изображения были доступны программе обработки для проведения анализа, отбора и выполнения необходимых расчетов. Однако, из 2165 снимков программа смогла воспользоваться только 1779 фотографиями. К сожалению, причины такой «разборчивости» программы остались для нас загадкой, а могли бы использоваться для извлечения полезной с практической точки зрения информации о возможных методических недочетах и промахах, послужить источником дополнительных условий и рекомендаций для предотвращения подобных ошибок в будущем. Удивительно, но 386 фотографий (около 18%) вообще не участвовало в обработке по какому-то нелепому недоразумению! Сохраняя самообладание, признаем, что среди представленного большого объема снимков, вполне вероятно, и присутствуют отдельные неподходящие для полноценной обработки фотографии, но, очень трудно согласиться, что таких изображений настолько много (18%) и они действительно «плохие», а потому и проигнорированы программой. Возможно, так и должно быть, – почти каждая пятая фотография «плохая», – и такая ситуация, считается нормальной... Аналогичной информации в имеющихся доступных публикациях, к сожалению, нам обнаружить не удалось, но в руководстве к программе, однако, утверждается, следующее: «PhotoScan способен обрабатывать любые фотографии, снятые любым цифровым фотоаппаратом, с любых ракурсов. Главное, чтобы каждый элемент реконструируемого объекта был виден хотя бы с двух (!) позиций съемки». Дополнительно указано, что «плотность, резкость и разрешение изображений определяют качество облака точек. Одна точка должна быть видна как минимум на трех (!) изображениях, поэтому стоит сделать больше фотографий данной области». Из сложившейся ситуации следует важный практический вывод о необходимости применения дополнительных специальных процедур проверки как качества, так и необходимого минимального для обработки объема изображений. Эти проверки следует выполнять в полевых условиях, для сохранения возможности проведения (при необходимости) повторных фотографирований, получения дополнительных серий последовательных снимков, пополнения общего объема первичных данных пригодных для полноценной обработки.

Автоматическое распознавание объектов и детальность цифровой модели

Несмотря на указанную ситуацию и не вдаваясь в детали, отметим, что в результате обработки (уже, не избыточного, но все еще большого объема) первичного полевого материала (1779 фото), на полученной трехмерной аппроксимации дневной поверхности участка работ (рис. 8) автоматически выявлены и отмечены маркерами (желтые кружки и подписи на белом фоне) лишь некоторые из 240 установленных на местности электродов. Возможно, этот результат обусловлен игнорированием 18% исходных снимков, которые алгоритмы анализа первичного материала по неизвестным причинам «сочли» непригодными для использования.

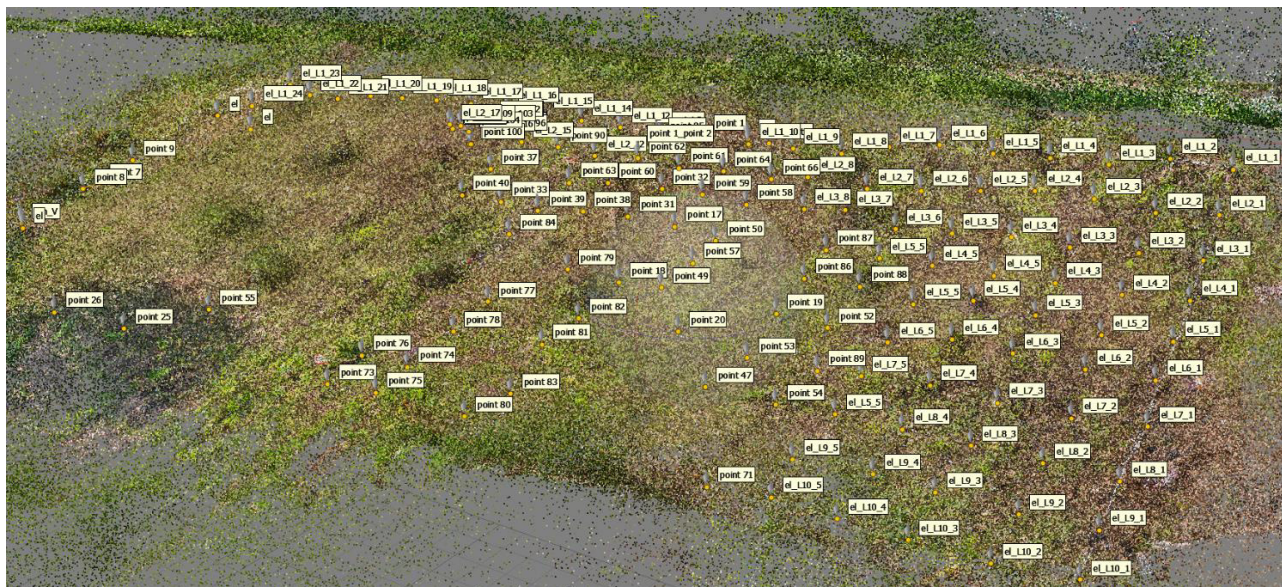


Рис. 8. Изометрическая проекция дневной поверхности участка (2.5 млн. точек) с указанием расположения части электродов (промежуточный результат обработки данных фотограмметрии, вид с СЗ угла участка)

Визуальный анализ полученной трехмерной аппроксимации дневной поверхности участка работ (рис. 8) показал, что, фактически, на трети площади участка электроды не были автоматически распознаны и отмечены. Распознавание электродов отсутствующих на промежуточной трехмерной модели проводилось визуально по двумерным изображениям, а маркировка их положений на снимках осуществлялась вручную (после визуального сопоставления нескольких двумерных изображений) с помощью процедуры, предусмотренной разработчиками программного обеспечения. Ручное добавление недостающих электродов было необходимо для построения интересующей нас карты относительных изменений рельефа дневной поверхности, расчет которой возможен с использованием полученного промежуточного результата (рис. 8), без построения окончательной детальной трехмерной модели дневной поверхности участка работ. Дополнительно, по результатам выполненного визуального анализа промежуточной трехмерной модели, представленной в виде изометрической проекции (рис. 9) и плана (рис. 10) выявлены области, в которых детальность модели полностью утрачена. Общая площадь областей с неудовлетворительным качеством составила около четверти от всей площади участка. Позволим себе предположить, что при использовании проигнорированных программой обработки почти четырехсот снимков, области с неудовлетворительным качеством реконструкции модели рельефа, вероятно, занимали бы значительно меньшую площадь, а, возможно, и вовсе отсутствовали. На остальной площади участка качество цифровой трехмерной модели удовлетворительное, а все особенности и относительные изменения рельефа отображены с точностью до деталей и с присущей методу фотограмметрии высокой разрешающей способностью.

Построение карты относительных изменений рельефа дневной поверхности

Интересующая нас карта относительных превышений рельефа участка исследований была рассчитана без построения окончательной трехмерной модели рельефа. Более того, этот расчет мог быть произведен и без представленных промежуточных результатов (рис. 9, 10), особенности работы программы обработки позволяют это сделать. Однако, нам было интересно получить дополнительный результат в виде трехмерной модели, содержащей большое количество деталей и, следовательно, дополнительной полезной информации об особенностях микрорельефа участка исследований. В частности, в центре участка визуально просматривается линейная область незначительных понижений рельефа, простирающаяся в направлении «север-юг», и связана она с одним из интересующих нас объектов поиска методом ЭТ.

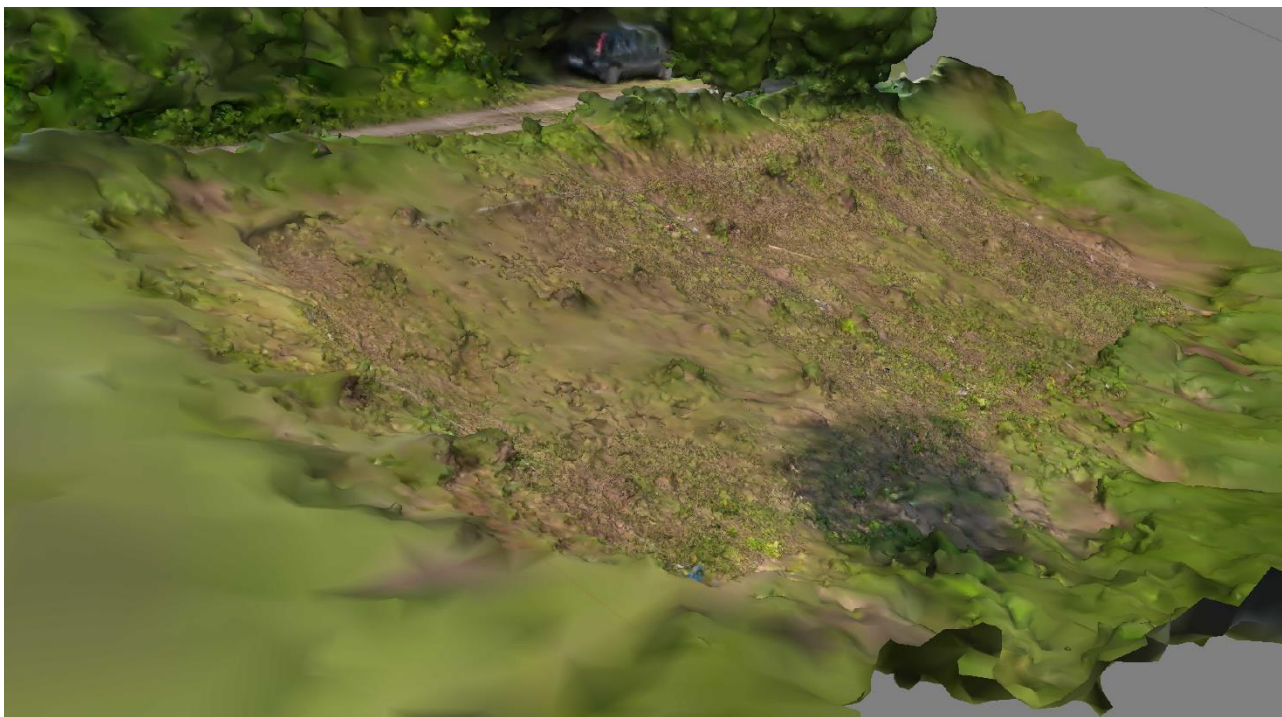


Рис. 9. Изометрическая проекция модели дневной поверхности участка работ (вид с СВ угла участка)

С воодушевлением отметим, что именно этот дополнительный результат мы и хотели получить и, несмотря на указанные недостатки, он нас полностью удовлетворяет.



Рис. 10. Промежуточный результат обработки данных фотограмметрии (север снизу)

Есть уверенность в том, что этот результат может быть улучшен. К сожалению, мы не располагали временем для улучшения этого промежуточного результата (рис. 9, 10), приняли его за окончательный (рис. 11) и использовали для расчета карты рельефа.



Рис. 11. Расположение электродов площадной расстановки метода электротомографии на трехмерной модели рельефа дневной поверхности участка исследований (вид с СВ угла участка)

Таким образом, карта относительных превышений рельефа (рис. 12) построена с использованием цифровой трехмерной модели, представленной совместно с указанием положений электродов площадной расстановки метода электротомографии (рис. 11), определенных процедурой автоматической обработки и вручную, по результатам визуального анализа изображений.

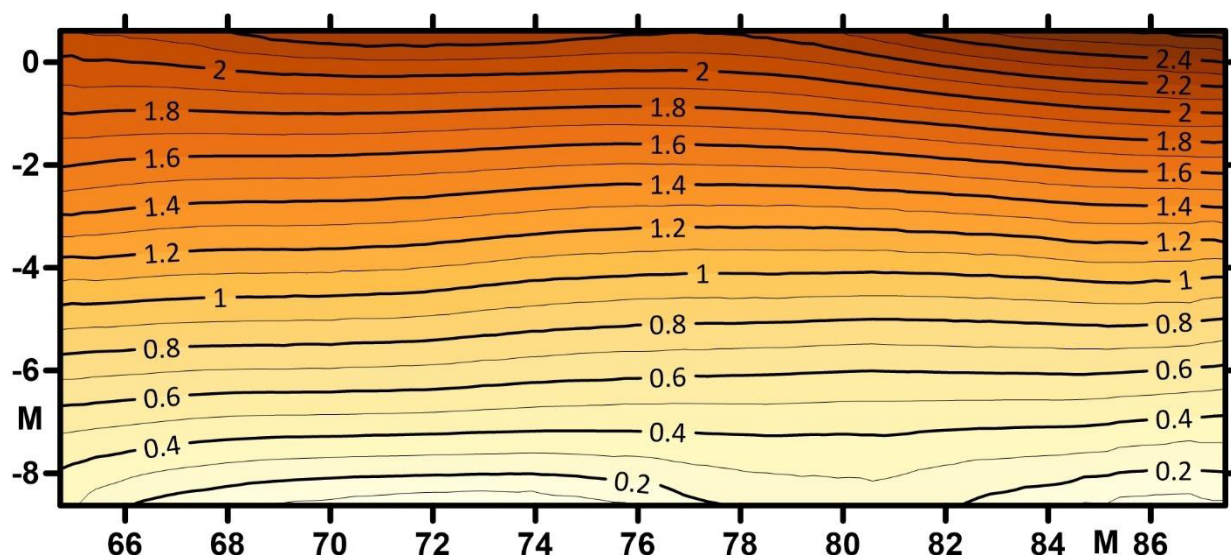


Рис. 12. Карта относительных превышений рельефа дневной поверхности участка работ (север снизу)

Полученная карта является результатом применения метода наземной фотограмметрии и соответствует реальной ситуации, которую мы визуально наблюдали при выполнении опытно-методических работ методом электротомографии. Действительно, в первом приближении дневную поверхность участка работ можно аппроксимировать плоскостью с простираем в субширотном направлении и с падением на север. Визуальная оценка величины изменения рельефа в направлении падения, полученная нами на участке – около 2.5 м, что удовлетворительно согласуется с результатом метода фотограмметрии (2.2-2.7 м). На участке работ локальные (менее 0.5 м в диаметре) изменения

рельефа дневной поверхности не наблюдались за исключением десятка муравейников. Это означает, что если изменения рельефа и присутствуют на изучаемой площади, то эти изменения плавные и их величина около полуметра и менее. Визуальный анализ полученной цифровой трехмерной модели показал наличие незначительных локальных (менее 0.3 м в диаметре) изменений рельефа (менее 0.25 м), которые в рисунке изолиний, проведенных на полученной карте рельефа с шагом 0.1 м, не проявляются. Шаг изолиний карты рельефа (0.1 м) выбран «с избытком» в соответствии с предположением о реальной ошибке определения относительных превышений рельефа. Предположительно, значение указанной ошибки следует ожидать не хуже 0.03 м. Эта грубая оценка означает, что в каждой точке определения относительных превышений их истинные значения отличаются от вычисленных на плюс-минус 0.03 м, т.е. интервал изменений составляет 0.06 м. Умышленное увеличение (почти в два раза) этого интервала путем округления, дало грубую оценку значения шага изолиний – 0.1 м. Заверить количественно саму карту и точность полученной карты относительных превышений рельефа дневной поверхности для нашего участка затруднительно из-за отсутствия результатов других альтернативных независимых методов получения аналогичной информации.

Оценка точности относительных изменений рельефа дневной поверхности

Эксперимент по обработке данных для относительно небольшой площадки (около 2 кв. м) показал, что при многократном (в десятки раз!) уменьшении числа снимков (например, со 100 до 5 фото) программа обработки успешно реконструирует дневную поверхность по серии даже из пяти изображений (взаимные перекрытия не менее 45%) и точность при этом улучшается в два (!) раза. К сожалению, провести качественно-количественный анализ для уверенного объяснения описанной ситуации весьма сложно и не представляется возможным, в частности, из-за полного отсутствия понимания принципов работы алгоритмов анализа и обработки изображений, реализованных в процедурах выбранного программного обеспечения. Таким образом, из результатов проведенного небольшого эксперимента с программным обеспечением компании Agisoft следует неожиданный, но важный практический вывод о необходимости ограничения (сверху) максимального общего числа снимков, используемых при обработке.

Весьма неожиданный и странный вывод, так как из общих методических рекомендаций утвержденных инструкций и «основных правил» программистов-разработчиков, вроде бы, следует руководствоваться правилом «чем больше, тем лучше». Однако, наш конкретный случай показал, что многократное, бесконтрольное добавление дополнительных изображений, полученных, как мы считаем, с соблюдением всех методических рекомендаций, делает общий объем данных излишне избыточным и отрицательно (!) сказывается на качестве конечного результата. Вероятно, основной причиной является не столько сам избыток данных, сколько наличие в этих «ненужных» данных дополнительных шумов, искажающих общую реальную объективную картину. Скорее всего, именно эта особенность, а также принципы (возможно, последовательность) работы алгоритмов анализа, сортировки, отбора и обработки (интегрирования, обобщения) информации отрицательно повлияли на результат, так как программное обеспечение, на наш взгляд, просто было «вынуждено» учесть искаженные, но статистически более значимые результаты обработки «дополнительных» (избыточных) данных. И все же, очень трудно принять за объективную реальность, ситуацию, в которой из ста полученных снимков лишь пять удовлетворяют методике и требуемому при работах методом фотограмметрии качеству, а остальные 95 изображений имеют искажения, шумы и дефекты настолько значимые, что использование этих фотографий крайне нежелательно и действительно приводит к весьма серьезному ухудшению результата.

Для количественной оценки точности определения относительных изменений рельефа методом фотограмметрии были использованы расчеты «остаточной ошибки», приведенные в специальном файле с названием «Отчет об обработке». Под остаточной ошибкой разработчиками программного обеспечения понимается «расстояние между заданной (измеренной) и расчетной позициями». Вычисленные программой обработки значения «остаточных ошибок» для вертикальной координаты точек реконструированной дневной поверхности представлены графически в виде карты (рис. 13). На представленной карте цветом указаны области, соответствующие значениям «остаточной ошибки» и, дополнительно, проведены изолинии со значениями. Удивительно, но все, представленные графически, значения отрицательные (!) и изменяются от значений близких к нулю и первых сантиметров до нескольких десятков сантиметров (минимум – -0.32 м). Фактически, на

представленной карте, изолиниями со значениями «-0.12» и «-0.13» участок работ разделен на две почти равные по площади области. В одной из них, – изометричной, выделенной синим цветом, – абсолютные значения остаточной ошибки не превышают 0.12 м (изменения от -0.02 до -0.12 м), а в другой, – окрашенной преимущественно в зеленый цвет, – составляют по модулю не менее 0.13 м. Демонстрируемые отличия «остаточных ошибок» для этих областей, по-видимому, указывают на неоднородность получения представленных оценок и, возможно, на отличия в способах расчета вертикальной координаты точек дневной поверхности.

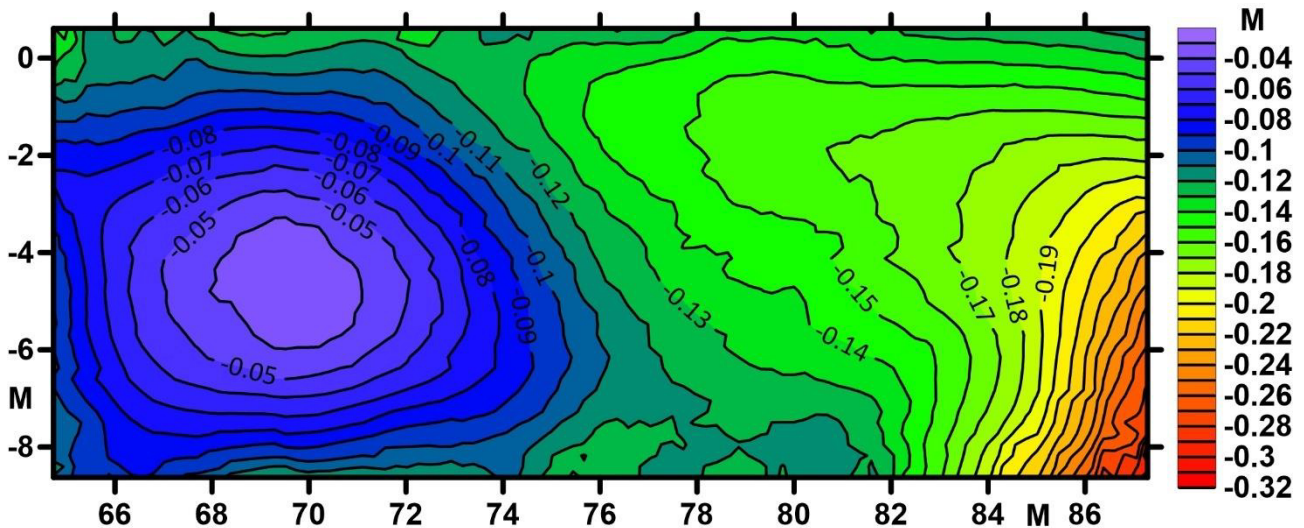


Рис. 13. Карта «остаточных ошибок» расчета превышений рельефа дневной поверхности (север снизу)

Ну, действительно, качество (точность) автоматической и ручной расстановки на реконструированной поверхности маркеров, соответствующих электродам, размещенным на площади участка работ, отличается, поэтому отличаются и значения «остаточных ошибок». В области с визуальным распознаванием электродов и ручным размещением соответствующих им маркеров, значения ошибок по модулю значительно (почти в два раза) ниже (среднее около -0.08 м), чем в области, соответствующей автоматической обработке изображений (среднее около -0.2 м). Таким образом, представленная карта «остаточных ошибок» вычисления вертикальной координаты точек реконструированной дневной поверхности участка исследований, в первую очередь, отражает неоднородность обработки полевых данных метода фотограмметрии.

Отметим, что с учетом отображаемого на представленной карте перепада высот в 2.7 м (рис. 12), значение шага изолиний (0.1 м) составляет около 4% (3.70%) от этого значения. Такая «фактическая» точность является для нас приемлемой. Таким образом, полученные результаты расчета относительных превышений положений электродов площадной расстановки можно использовать для представления, анализа, обработки и интерпретации данных метода электротомографии.

Результат обработки данных фотограмметрии и полевые данные электротомографии

Основной результат применения метода наземной фотограмметрии, – рассчитанные программой относительные превышения положений 240 электродов площадной расстановки метода электротомографии. Этот результат представлен совместно с первичными полевыми данными электротомографических измерений (рис. 14) в виде пространственного распределения значений кажущегося сопротивления под площадной расстановкой электродов, расположенных на дневной поверхности участка работ. Вертикальные координаты электродов площадной расстановки метода электротомографии рассчитаны благодаря фотограмметрическому сопровождению электротомографических измерений.

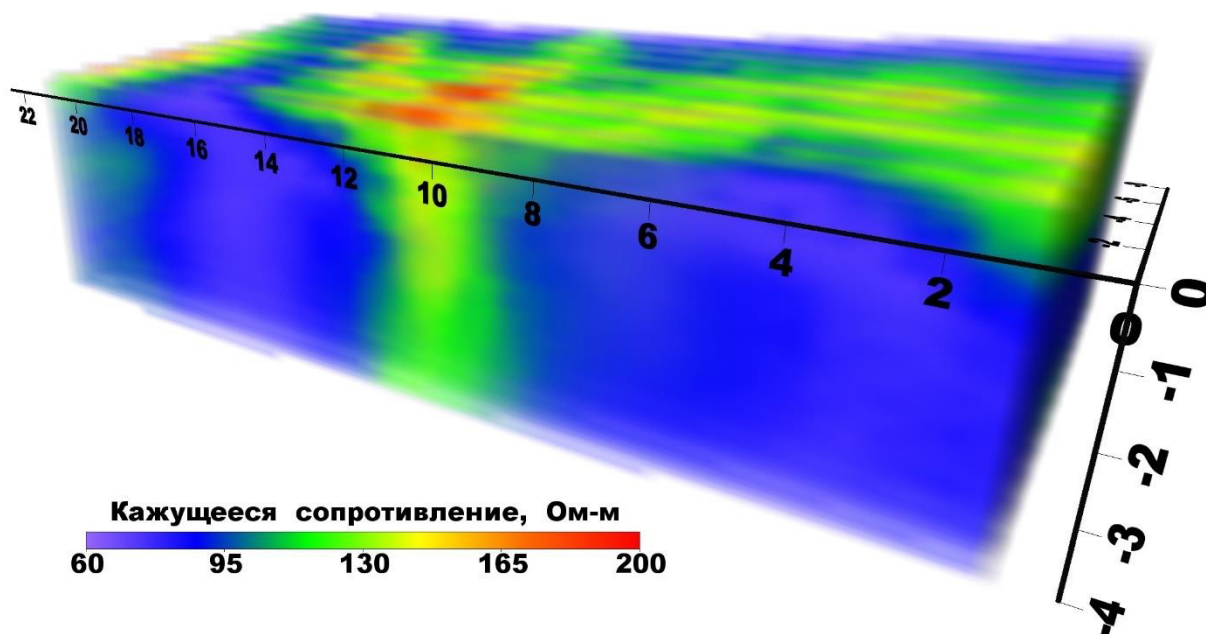


Рис. 14. Объемное распределение кажущегося сопротивления (первичные полевые данные) под участком площадных опытно-методических измерений методом электротомографии (вид с СЗ угла)

5. ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРИМЕНЕНИЯ НАЗЕМНОЙ ФОТОГРАММЕТРИИ

Описанный в настоящем сообщении практический опыт применения метода наземной фотограмметрии для получения значений относительных превышений рельефа дневной поверхности на участке детальных площадных исследований методом электротомографии позволил получить результаты и сделать выводы, значимость которых, по нашему мнению, выходит за рамки решенной прикладной задачи. Наряду с полученными результатами и выводами, основной ценностью проведенного авторами практического опробования метода наземной фотограмметрии является осознание огромного внутреннего потенциала возможностей, заложенного в этом методе. Для решения нашей прикладной задачи была использована лишь часть этих возможностей, однако, и ее оказалось достаточно для получения удовлетворительного практического результата. Из-за спонтанного решения о проведении съемки и отсутствия времени на разработку полевой методики, накопление первичного материала было проведено без специальной подготовки, что весьма осложнило обработку и частично сказалось на качестве результатов. Несмотря на эти недостатки, допущенные методические недочеты, погодные условия и почти полностью закрытую травяным покровом целевую дневную поверхность участка, использованное программное обеспечение удовлетворительно справилось с обработкой весьма большого, избыточного количества фотографий. Этот факт объективно подчеркивает наличие большого внутреннего потенциала возможностей как во всей технологии, так и в используемых программным обеспечением современных алгоритмах цифровой обработки.

Основными практическими результатами, полученными с использованием метода наземной фотограмметрии, являются карта относительных изменений рельефа дневной поверхности участка работ (рис. 12) и трехмерная цифровая модель рельефа (рис. 9, 10). Основным методическим результатом, который получен благодаря применению фотограмметрической съемки, является обобщение положений, требований и правил проведения наземных полевых работ для сбора первичного материала, сформулированное и представленное в виде методических рекомендаций для построения карты рельефа масштаба 1:100. Дополнительными, важными с практической точки зрения, результатами являются: приведенный пример последовательной оценки и выбора значений основных параметров методики наземной фотограмметрической съемки для конкретного участка; пример оценки

общего объема первичных данных и требующегося для этого времени; примеры получения оценки точности результата.

Основным практическим выводом является вывод о возможности успешного применения наземной фотограмметрической съемки для сопровождения площадных измерений методом электротомографии при малоглубинных исследованиях строения геологической среды с целью решения прикладных задач инженерно-геологической направленности, археологических, технических, опытно-методических и других. Дополнительно, по результатам проведения наземной фотограмметрии для построения карты относительных превышений рельефа дневной поверхности масштаба 1:100 сделан вывод о целесообразности совершенствования методики проведения полевых работ с целью сокращения времени необходимого для сбора первичного материала удовлетворительного качества. Выполнение наземных фотограмметрических работ в соответствии с общими методическими рекомендациями, с одной стороны, показало их универсальность, а с другой стороны, продемонстрировало потребность в их уточнении и дополнении положениями с формулировками, отражающими направленность съемки как на достижение основного, так и на получение сопутствующих результатов. Методику получения первичных полевых данных следует планировать, ориентируясь на общие рекомендации, с учетом уникальных особенностей участка исследований. Важным методическим выводом является обязательная продуманность и самой методики, и полевой технологии (последовательность действий оператора) накопления первичного материала, а также проведение подготовительных мероприятий способствующих созданию условий и выполнению требований для получения данных пригодных к обработке. Дополнительным методическим замечанием является вывод о необходимости использования при проведении съемки, хорошо заметных, специально изготовленных маркеров (10-15 шт.), размещенных (на этапе подготовки) по площади участка равномерно и на известных расстояниях. Предположение о том, что роль указанных маркеров в нашем случае сыграют установленные по равномерной сети электроды, к сожалению, оправдалось лишь частично, из-за плохой, как оказалось, распознаваемости самих электродов и маскирующего влияния травяного покрова. Применение ярких, хорошо различимых при любых условиях съемки, маркеров является крайне желательным и обеспечивает их успешное автоматическое распознавание на этапе обработки. Таким образом, для достижения удовлетворительного окончательного результата, зависящего от качества промежуточных результатов, не следует перекладывать трудности прохождения полевого этапа на этап обработки.

Наиболее предпочтительным наземным вариантом фотограмметрии для построения карты относительных превышений рельефа дневной поверхности (масштаб 1:100) нашего участка (23 x 9 м), является предложенная в настоящем сообщении методика съемки на высоте 2.4 м вдоль профилей со значением межпрофильного расстояния таким же, как и шаг по профилю – 1 м.

Результаты полевой съемки и эксперименты с обработкой серий снимков разного количества привели нас к заключению о необходимости ограничения (сверху) максимального общего числа фотографий, используемых при обработке, а также к выводу о необходимости применения дополнительных специальных процедур проверки как качества, так и необходимого для обработки минимального количества изображений. Указанные проверки следует выполнять в полевых условиях, для возможности повторного получения дополнительных (заменяющих или дублирующих) серий последовательных снимков и пополнения (или частичной замены) первичных данных, пригодных для полноценной цифровой обработки.

Полученные результаты расчета относительных превышений положений электродов площадной расстановки представлены совместно с полевыми электроразведочными данными (рис. 14) и могут использоваться программным обеспечением метода электротомографии для проведения анализа, обработки и интерпретации.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование возможностей современной фотограмметрии по получению информации о рельефе дневной поверхности для представления, обработки и интерпретации данных площадной электротомографии нам показалось настолько естественным и очевидным, что отсутствие описания такого опыта в имеющихся доступных публикациях вызвало некоторое недоумение. Ну, действительно, доступность применения наземной фотограмметрии, ее относительная простота, особенно, для исследования небольших площадей (и при отсутствии жестких требований к точности), делает этот способ получения данных о рельефе дневной поверхности весьма привлекательным.

Возможность проведения полевого этапа (сбора первичного материала) одним человеком за несколько часов, аналогично тому, как выполняются измерения в площадной модификации электротомографии с небольшим (около 1 м) шагом между электродами, делает накопление первичных данных этих двух методов схожими. Следует отметить, что в нашем случае, квалификации и опыта одного полевого инженера-оператора оказалось достаточно для одновременного выполнения измерений и методом площадной электротомографии, и методом наземной фотограмметрии. К сожалению, рациональная методика проведения съемки для нашего участка, представленная в настоящем сообщении, сформулирована после выполнения полевых наблюдений, а представленные результаты получены с использованием весьма большого объема первичного материала. В самом деле, объем полевых данных оказался настолько избыточным (2165 фото), что выбранная программа обработки «отказалась» от использования всех снимков и в обработке участвовало только 1779 изображений. Однако, количество использованных при обработке фотографий почти в шесть (5.7) раз превышает число снимков для рациональной методики (на высоте 2.4 м около 300 фото), в два (1.9) раза – число снимков для альтернативной методики (на высоте 1.3 м около 900 фото) и в три (2.8) раза – среднее число снимков (на высотах 1.3-1.8 около 600 фото). Таким образом, при применении наземной фотограмметрической съемки на участках аналогичных нашему, общий объем данных можно сократить (в разы!), а это означает, что уменьшится и необходимое для получения первичного полевого материала время. Еще раз отметим, что кроме основного для нас результата (карта рельефа) был получен дополнительный (цифровая модель), который, пусть и косвенно, но подтверждает наличие на участке исследований объекта поиска для метода электротомографии. В нашем случае этот результат воспринимается как приятное дополнение к основному. Однако, при решении других прикладных задач с применением площадных измерений методом электротомографии, например, археологических, фотограмметрическое сопровождение позволит получить не только карту относительных превышений электродов площадной расстановки, как было показано в настоящем сообщении, но и выступит в качестве достойной альтернативы высокоточной съемке микрорельефа. В этом случае, полученный нами «дополнительный» результат, по значимости и количеству информации, скорее всего, превзойдет «основной», а сам метод фотограмметрии будет восприниматься не как «сопровождение» электротомографии, а как один из основных методов комплекса, применяемого для решения прикладной задачи.

ЛИТЕРАТУРА

- *Большаков Д.К., Ефремов К.Д., Модин И.Н.* Трехмерные измерения стандартной аппаратурой метода электротомографии на многосегментных площадных расстановках электродов. В сб. Материалы конференции "Инженерная геофизика - 2019", г. Геленджик, Россия, 22-26 апреля 2019. 10 с. 2019.
- *Большаков Д.К., Модин И.Н., Ефремов К.Д.* Результаты электротомографических измерений с применением площадных многосегментных расстановок // Тезисы докладов Научной конференции "Ломоносовские чтения - 2020", Секция "Геология", Москва, МГУ, Россия, 21 апреля 2020 года (30.12.24, <https://istina.ips.ac.ru/publications/article/320315057/>; <https://conf.msu.ru/rus/event/>, 5 стр.). С. 10–14. 2020.
- *Инструкция по фотограмметрическим работам при создании топографических карт и планов* (Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР). – М.: Недра, 80 с. 1974.
- *Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов* (Федеральная служба геодезии и картографии России). ГКИНП (ГНТА) – 02-036-02.– М.: ЦНИИГАиК, 100 с. 2002.
- *Степченко В.С., Валганов С.В.* Опыт эффективной фотограмметрии дольменов Кавказа в условиях максимально ограниченных ресурсов. Вестник Международного университета природы, общества и человека "Дубна". № 1(42). С. 48–67. 2019.
- *Agisoft LLC.* Agisoft PhotoScan user manual. Professional edition, version 1.4. 2018. URL: https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf. Дата обращения: 18.12.2024.
- *Gruen A.* Development and status of image matching in photogrammetry. The Photogrammetric Record. №27(137). С.36-57. 2012. DOI: 10.1111/j.1477-9730.2011.00671.x.

GROUND PHOTOGRAMMETRY FOR AREA ELECTROTOMOGRAPHY

Stepchenkov V. S., Bolshakov D. K.

The report presents the results of the practical application of ground-based photogrammetry to obtain estimates of the relative spatial arrangement of areal electrodes when measured by electrotomography. The main general features of the field methodology for obtaining primary data from ground-based photogrammetric imaging in order to determine the spatial coordinates of point electrodes located on the daytime surface of a site of detailed areal electrical surveys are described. The specific features of processing ground-based photogrammetry data related to the location and condition of the work site and the shooting conditions are considered. The survey results are presented in the form of an isometric projection of the daytime surface of the area of the geophysical research site, indicating the location of the electrodes, as well as, together with the data of the electrotomography method. Based on the results of using ground-based photogrammetry to support detailed area geophysical work, conclusions are drawn about the productivity, quality and accuracy of data, the possibility of improving the methodology for obtaining them, and practical recommendations are given on the use of photogrammetry in similar conditions.

KEYWORDS: GROUND PHOTOGRAMMETRY, DAY SURFACE, 3D ERT