О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу Воронина Евгения Геннадьевича на тему: «ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ НАДЁЖНОСТИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 25.00.34 «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия»

Актуальность темы

Развитие систем дистанционного зондирования Земли (ДДЗ) на современном этапе характеризуется практически полным переходом от аналоговых методов и технологий получения, передачи и обработки информации к цифровым формам ее представления. Данный переход поставил перед разработчиками съемочной аппаратуры, а также специалистами, занимающимися их обработкой и использованием, необходимость решения ряда новых проблем. Перечень данных проблем непосредственно связан с изменением принципов формирования цифровых изображений в съемочных камерах, по сравнению с аналоговыми снимками. В первую очередь, это обусловлено заменой единой светочувствительной фотопленочной основы регистрации оптических изображений в фокальной плоскости съемочной аппаратуры на твердотельные приборы с зарядовой связью (ПЗС-матрицы). В связи с этим, возникла необходимость разработки новых моделей и методик, учитывающих новые принципы формирования изображений. В первую очередь, это относится к задачам фотограмметрической обработки снимков, связанных с построением геометрической модели местности. В основе их решения лежит определение параметров внутреннего ориентирования снимков, восстанавливающих связку проектирующих лучей внутри съемочной камеры, а также параметров внешнего ориентирования, устанавливающих положение связки проектируюших лучей в пространстве объекта. Сложность решения данных задач определяется многообразием конструктивных особенностей современных съемочных камер, используемых для получения космических снимков.

Это требует разработки новых уникальных моделей учета особенностей формирований цифровых изображений или адаптации уже существующих технологий фотограмметрической обработки к используемым съемочным камерам. Именно эффективность решения данных задач лежит в основе обеспечения точности и надежности фотограмметрических измерений оптико-электронных космических снимков.

Для решения указанной проблемы в представленной диссертационной работе был выполнен комплекс исследований, направленный на поиск путей повышения точности и надёжности фотограмметрической обработки оптико-электронных космических снимков (ОЭКС), посредством использования методов математического моделирования и учета погрешностей исходных данных. Данная тематика работ представляется актуальной и направлена на повышение эффективности использования современных систем дистанционного зондирования Земли для получения геопространственной измерительной информации о характеристиках объектов земной поверхности.

Новизна исследования и полученных результатов

Определяющей целью проведенных исследований является обоснование путей повышения надежности фотограмметрической обработки ОЭКС.

Для достижения указанной цели, в рамках представленной диссертационной работы автором были выполнены исследования:

модели фотограмметрической обработки ОЭКС, учитывающей конструктивные особенности съёмочной аппаратуры, погрешности исходной измерительной информации, способы математического моделирования съёмки и методы обработки;

влияния на точность и надёжность фотограмметрической обработки измерительных свойств ОЭКС, зависящих от физических принципов их формирования;

установления причин преобразования (нарушения) восстанавливаемых связок проектирующих лучей при решении обратной фотограмметрической

задачи (ОФЗ) и разработка путей минимизации их влияния на надёжность фотограмметрической обработки ОЭКС.

Новыми научными результатами, полученными в ходе проведенных исследований, являются:

геометрическая модель местности, построенная по оптико-электронным космическим снимкам (ОЭКС) с учетом модели их построения и возникающих погрешностей исходных данных;

метод геометрической сшивки ОЭКС, учитывающий особенности используемых ПЗС-матриц;

метод учета нарушения связки проектирующих лучей при решении обратной фотограмметрической засечки;

метод адаптации весов измерений к используемым моделям определения параметров внешнего ориентирования ОЭКС.

Степень обоснованности и достоверности научных положений

На защиту диссертант выносит пять научных положений.

*Первое научное положение: «*Модель надёжной фотограмметрической обработки ОЭКС».

Обоснование принципов ее построения представлено в первом разделе диссертации. Здесь проведен анализ информационных, математических и методических принципов фотограмметрической обработки рассматриваемых снимков. Рассмотрены особенности конструкции современной космической оптико-электронной съёмочной аппаратуры. Отмечены ее основополагающие, с точки зрения фотограмметрической обработки, физические принципы функционирования, включающие следующие элементы:

- изображения формируются оптической системой и регистрируются с помощью фотоприёмных матриц на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС-матриц);

- ПЗС-матрицы конструктивно объединены в оптико-электронный преобразователь (ОЭП) и расположены двумя рядами в шахматном порядке с перекрытиями по краям;

- съёмочный маршрут формируется путём центрального линейно-однострочного или микрокадрового сканирования;

- в ходе съёмки фиксируются данные, необходимые для вычисления ЭВО съёмочной аппаратуры на любой момент времени;

- высокое линейное разрешение ОЭКС обеспечивается, помимо прочего, за счёт увеличения фокусного расстояния приёмной оптики, что делает связку проектирующих лучей узкоугольной.

На основании анализа конструктивных особенностей съёмочной аппаратуры, принципов и погрешностей формирования снимков сделан вывод о том, что изображения, получаемые каждой ПЗС-матрицей, следует индивидуально привязывать к системам координат, связанными с конструктивными элементами космического аппарата. То есть ОЭКС необходимо рассматривать как составное изображение из независимых элементарных снимков (сканов или микрокадров), получаемых ПЗС-матрицами и связанных между собой только перекрытиями по краям. Это ключевой принцип, положенный в основу диссертационных исследований.

Выполнен анализ математических моделей съемки в рамках их наиболее общей классификации. Предпочтение отдано геометрическим моделям, так как они в отличие от интерполяционных моделей могут быть взаимно однозначно сопоставлены с определённым типом съемочной аппаратуры. Представлена обобщённая геометрическая модель оптико-электронной космической съёмки на базе уравнений коллинеарности

Математическая модель съёмки определяет вид аналитической связи координат одноимённых точек снимка и местности. Значения её параметров вычисляются по исходным данным для фотограмметрической обработки с использованием определённых математических методов и алгоритмов.

Совокупность этих методов и алгоритмов представляет собой модель фотограмметрической обработки. Применение разных моделей фотограмметрической обработки приводит к получению отличающихся значений параметров математической модели съемки.

Выделены основные составляющие модели фотограмметрической обработки. К их числу отнесены метод фотограмметрической обработки и метод статистической обработки результатов измерений.

Установлено, что наилучшую точность фотограмметрической обработки ОЭКС обеспечивает метод блочной фототриангуляции по способу связок. Возможность его применения обусловлена наличием перекрытий между изображениями, полученными ПЗС-матрицами. Этот метод увеличивает число проективных связей и позволяет использовать относительно простую математическую модель съёмки с небольшим числом параметров, что по совокупности приводит к повышению надёжности фотограмметрической обработки ОЭКС.

Статистическая обработка результатов измерений имеет целью определение наиболее вероятных значений параметров математической модели съёмки. Разные методы дают отличающиеся оценки искомых параметров. Целесообразным методом статистической обработки результатов измерений при приближённо заданных дисперсиях погрешностей измерений является метод наименьших модулей. Если эмпирические дисперсии погрешностей результатов измерений, используемые для назначения весов, соответствуют истинным или могут быть откорректированы в ходе обработки, то можно использовать, как это традиционно делается, метод наименьших квадратов.

Второе научное положение: «Факторы, являющиеся причиной возникновения смещений одноимённых точек в перекрытиях смежных фотоприёмных матриц, оценки смещений и метод геометрической сшивки ОЭКС с учётом этих смещений».

Рассмотрение данного научного положения приведено во втором разделе диссертационной работы. Он содержит исследования влияния на точ-

ность и надёжность фотограмметрической обработки измерительных свойств ОЭКС, обусловленных цифровой формой представления и перекрытиями ПЗС-матриц.

Выполненные исследования позволили разделить наблюдаемые смещения на конструктивные и дополнительные.

Первые обусловлены установкой ПЗС-матриц со сдвигами в шахматном порядке.

Причинами вторых является факторы, приводящие к появлению грубых, систематических и случайных дополнительных смещений.

Грубые дополнительные смещения обусловлены:

попаданием одноименных точек из перекрытий ПЗС-матриц на облака;

погрешностями цифровой корреляции изображений.

Систематические дополнительные смещения определяются:

погрешностями установки ПЗС-матриц в ОЭП;

наклоном съёмочной аппаратуры;

несоответствием фактической скорости движения изображения теоретическим значениям.

Случайные дополнительные смещения вызваны:

рельефом местности;

тепловыми деформациями ОЭП;

нестабильностью углового движения съёмочной аппаратуры.

Для исследования влияния систематических и случайных факторов были получены модели, описывающие характер их воздействия для аппаратуры «Сангур-1» космического аппарата «Ресурс-ДК1» и «Сангур-1У» космического аппарата «Ресурс-П». На их основе были получены численные показатели смещений, обусловленные исследуемыми факторами.

Установлено, что точность измерений координат точек на ОЭКС характеризуется не только статистическими характеристиками смещений одноимённых точек в перекрытиях ПЗС-матриц и изобразительным качеством снимков, но и методической погрешностью самого процесса измерений. В связи

с этим выполнена теоретическая оценка точности измерений пиксельных координат одноимённых точек пары цифровых изображений. Эти исследования выполнены для назначения достоверных весов измерений координат связующих точек.

Показано, что *погрешность δ измерения* «пиксельных координат» одноименной точки на паре изображений, полученных смежными ПЗС-матрицами, представляет собой случайную величину, которая *характеризует расстояние* между центрами проекций одноимённых пикселей на местности.

Получены расчетные формулы для оценки математического ожидания и дисперсии этой случайной величины по выборке из N одноимённых точек в наиболее общем случае, когда пара измеряемых изображений имеет разный масштаб, произвольную взаимную ориентацию и различный уровень геометрических искажений, характеризуемых рассмотренными выше смещениями одноименных точек.

Применение полученных оценок при назначении весов уравнений поправок для координат связующих точек между ПЗС-матрицами показало, что эти формулы позволяют достаточно точно охарактеризовать случайную часть погрешности измерения пиксельных координат ОЭКС.

В обеспечение известного положения теории обработки результатов измерений о необходимости исключения грубых данных выполнены исследования по браковке грубых связующих и опорных точек. Обычно такая браковка выполняется в ходе решения ОФЗ по невязкам вычисленных и измеренных координат. Но поскольку геометрическая точность ОЭКС характеризуется дополнительными смещениями одноимённых (связующих) точек в перекрытиях ПЗС-матриц, которые имеют, в том числе и грубые значения, то для браковки этих точек могут быть использованы не только невязки, но и измеренные смещения.

Установлены основные принципы браковки связующих точек по их смещениям в перекрытиях ПЗС-матриц и разработана соответствующая методика, которая является новой и нигде ранее не применялась. Эксперимен-

тальная апробация этой методики показала эффективность выявления грубых связующих точек по результатам их измерений на ОЭКС до решения ОФЗ.

На основе данной методики был разработан метод, использующий измерения дополнительных смещений для априорного определения дисперсий остаточных геометрических искажений в перекрытиях ПЗС-матриц. Данный метод нашел применение в процессах сшивки изображений, использующий изме-рения величин дополнительных смещений для априорного определения дис-персий остаточных геометрических искажений в перекрытиях ПЗС-матриц и назначения таких весов измерений координат связующих точек, которые наи-более точно соответствуют их неизвестным истинным значениям.

Третье научное положение: «Методы противодействия преобразованию связок проектирующих лучей при решении ОФЗ по ОЭКС».

Данное научное положение рассмотрено в третьем разделе. Теория ОФЗ, состоящей в уравнивании результатов измерений, хорошо известна. Однако, её применение в современной практике обработки данных ДЗЗ вызывает ряд трудностей, которые приводят к искажению решения и преобразованию связок проектирующих лучей. В частности, существует проблема неустойчивого (вплоть до расходимости итераций) решения ОФЗ по узкоугольным космическим снимкам, которую обычно связывают с плохой обусловленностью систем уравнений, формируемых на базе уравнений коллинеарности. Предложенные на сегодняшний день меры сводятся к формированию дополнительных уравнений поправок на основе прямых измерений уравниваемых параметров и применению устойчивых методов вычислений, включая математическую регуляризацию по Тихонову. Однако, эти меры обеспечивают сходимость итераций, но почти не изменяют обусловленность задачи. К тому же вероятны смещение полученного решения и недостоверная оценка точности с использованием ковариационной матрицы.

В связи с этим были выполнены исследования, направленные на кардинальное улучшение обусловленности исходной задачи. Их предпосылкой

послужил известный факт, состоящий в том, что улучшить обусловленность задачи можно путём простых замены переменных, если их точность выше, чем исходных. Так была выполнена подстановка по методу Б.Г.Галёркина, которая привела к снижению числа обусловленности матрицы нормальных уравнений. Таким образом, проблема плохой обусловленности при решении ОФЗ оказалась практически решённой.

Однако, как выяснилось этого недостаточно для обеспечения устойчивости ОФЗ. Следовательно, существуют другие, более значимые факторы, влияющие на устойчивость решения ОФЗ и надёжность фотограмметрической обработки снимков. К ним относятся систематические погрешности измерений уравниваемых параметров. Для их вычисления под условием принципа равных влияний было разработано и исследовано четыре метода, основанных:

первый – на разложении математической модели съёмки в ряд Тейлора;

второй – на дифференцировании и последующем поиске точки минимума выражения для вычисления среднего квадратического значения остаточных невязок координат опорных точек;

третий – на использовании правила оценки дисперсии аналитически заданной сложной функции (математической модели съёмки) с коррелированными аргументами;

четвёртый – представляющий собой модификацию третьего, когда не учитывается корреляция аргументов.

Все методы требуют использования опорных точек. Апробация разработанных методов на реальной информации показала, что четвёртый (следовательно и более строгий третий) метод показал устойчивость и наибольшую точность результатов. На этом основании сделан вывод о целесообразности его практического применения для повышения надёжности фотограмметрической обработки ОЭКС.

Четвертое научное положение: «Теория обеспечения надёжности фотограмметрической обработки путём корректировки весов уравниваемых измерений». Его изложение представлено в третьем разделе.

В работе отмечено, что дисперсии случайных погрешностей измерений, которые традиционно используются для назначения весов измерений, не обеспечивают получение истинного решения ОФЗ, если только грубые и систематические погрешности результатов измерений не исключены ещё до уравнивания. Отсюда вытекает важность для обеспечения надёжности фотограмметрической обработки снимков браковки грубых измерений и исключения систематических погрешностей измерений.

Отмечено, что гарантировать полное исключение из результатов фотограмметрических измерений грубых и систематических погрешностей невозможно, так как неизвестны истинные значения измеренных величин. В связи с этим, необходимо назначать веса с учётом остаточных погрешностей измерений. Для решения данной задачи предложена методика оценки точности результатов уравнивания. Представленные результаты ее апробации показали , что предлагаемый способ даёт приблизительно одинаковые оценки по сравнению с традиционным, но в силу его численной устойчивости, универсальности вычислительной схемы для прямых и косвенных измерений является более предпочтительным.

Пятое научное положение: «Технология фотограмметрической обработки ОЭКС и результаты её применения». Основные ее положения представлены в четвертом разделе. Здесь приводится описание предлагаемой технологической схемы фотограмметрической обработки ОЭКС, а также экспериментального программного комплекса, используемого для проведения экспериментальных исследований.

Достоверность рассмотренных в диссертационной работе теоретических исследований была проверена в ходе их апробации при реализации основных технологических процессов на разработанном программном комплексе. В ходе экспериментальной проверки была осуществлена:

- сшивка изображений (полос) ПЗС-матриц со средним квадратическим значением невязок на связующих точках 0.2÷0.5 пикселя цифрового изображения;

- геодезическая привязка съёмочных маршрутов с использованием от одной до нескольких десятков опорных точек с точностью, соответствующей точности используемой топогеодезической основы, вплоть до нескольких десятков сантиметров;

- визуально незаметное совмещение контуров по периметру прямоугольных вставок одного (хорошего) изображения в другое (дефектное или закрытое облачностью) изображение;

- построение цифровой матрицы рельефа и фотограмметрическая калибровка ПЗС-матриц оптико-электронного преобразователя;

- полное совмещение контуров неподвижных объектов при цетосинтезе спектральных слоёв, обеспечивающее адекватное зрительное восприятие цветных и спектрозональных изображений.

Представленные результаты получены в пределах всей площади обрабатываемых маршрутов, достигающих в экспериментах 40 секунд по длительности съёмки и 300 километров по протяжённости на местности.

Практическая значимость работы определяется разработкой методов внутреннего ориентирования, используемых при фотограмметрической обработке оптико-электронных космических снимков, получаемых космическими комплексами «Ресурс-ДК» и « Ресурс-П».

Реализация результатов работы. Полученные теоретические и практические результаты использовались при проведении целого ряда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в частности:

в разработке «Методического обеспечения для определения параметров внутреннего ориентирования оптико-электронной аппаратуры изделия 47КС»;

в разработке «Методического обеспечения для определения параметров внутреннего ориентирования ОЭТК изделия 14К031 №2»;

в разработке «Методического обеспечения для определения параметров внутреннего ориентирования ОЭК изделия 14К035» ;

в создании альбома цветосинтезированных снимков «Ресурс-П, «Электронный глаз России», для нужд Российского космического агентства.

Обоснованность научных положений, защищаемых соискателем, базируется на согласованности теоретических разработок, представленных соответствующими математическими моделями, с результатами экспериментов, полученными на основе алгоритмов и программных средств, реализованных в соответствующих модулях программного комплекса.

Положения теории основываются на известных достижениях фундаментальных и прикладных научных дисциплин, таких как : математика, цифровая обработка изображений, теория вероятностей и математическая статистика, фотограмметрия и геоинформатика.

Достоверность экспериментальных данных обеспечивается использованием современных средств и методик проведения исследований, базирующихся на средствах вычислительной техники. Экспериментальные исследования проводились с использованием методов статистического моделирования на реальных цифровых изображениях, полученных различными съемочными камерами.

В целом, результаты, полученные автором, являются новыми научными знаниями, которые находятся на стыке цифровой фотограмметрии и вычислительной математики.

Основные результаты диссертации опубликованы в печатных работах, они неоднократно обсуждались на различных конференциях и симпозиумах и получили одобрение ведущих специалистов.

Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения и списка литературы. Текст работы изложен на 265 страницах машинописного текста,

содержит 50 рисунков и 16 таблиц. Список литературы включает 108 наименований.

Личный вклад автора. Все результаты диссертационных исследований получены автором лично.

Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 24 работах, в том числе: в 16 научных статьях в изданиях, рекомендованных ВАК, и в 8 полнотекстовых докладах на научно-технических конференциях.

Общие замечания по диссертационной работе

Основные замечания к представленной работе носят методический характер.

1 Название работы «Исследование проблемы надежности фотограмметрической обработки оптико-электронных снимков» не в полной мере соответствует теме представленных исследований. В работе основное внимание уделено решению проблемы обеспечения точности и надежности решения обратной фотограмметрической засечки, и в первую очередь задачам внутреннего ориентирования и внешнего ориентирования ОЭКС. Решение этих задач лежит в основе построения геометрической модели местности, что является важнейшим элементом фотограмметрической обработки, но не охватывает все множество задач, связанных с измерительными и объектно-ориентированными процессами интерпретации получаемых изображений в широком спектре задач моделирования объектов земной поверхности.

2 Спорной является утверждение соискателя о том, что проблема надежности фотограмметрической обработки является новой. Задачи реализации фотограмметрических методов измерений снимков постоянно сталкиваются с проблемой устранения грубых результатов измерений, то есть результатов измерений выходящих за установленный доверительный интервал. Эта проблема присутствует в полной мере при реализации измерений как в визуальных режимах, так и в автоматических режимах. Этим вопросы широко рассмотрены как в материалах диссертационных исследованиях, так и в уче-

бных и научных публикациях. Новой в представленной диссертации является проблема обеспечения надежности построения геометрической модели местности по оптико-электронным космическим снимкам, полученным посредством съемочной аппаратуры космических комплексов «Ресурс-ДК» и «Ресурс-П».

3 Следует также отметить, что вынесение в качестве защищаемого положения «Технологии фотограмметрической обработки ОЭКС и результатов её применения» является не совсем корректным, так как перечень задач решаемых в ходе разработки таких технологий существенно превосходит рамки рассматриваемой диссертации. Это в первую очередь, относится к задачам создания цифровых моделей рельефа, ортотрансформирования изображений, цветосинтеза изображений.

4 В работе часто используются сленговые понятия, которые для докторской диссертации не совсем корректно использовать, в частности примера можно привести понятие «пиксельные координаты» .

Заключение

Диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. В работе приведены научные результаты, позволяющие квалифицировать их как – решение новой научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

Работа базируется на достаточном числе исходных данных, примеров и расчетов. Она написана доходчиво, грамотно и аккуратно оформлена. По каждому разделу и работе в целом сделаны выводы.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа отвечает критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Воронин Евгений Геннадьевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 25.00.34 - аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия.

Официальный оппонент профессор кафедры геологии
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина,
доктор технических наук,
Аковецкий Виктор Геннадьевич

3 октября 2016 г.

Основные сведения об официальном оппоненте:
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина
Кафедра геологии
Профессор кафедры
Тел.(499) 507-85-23
www. gubkin.ru