

УДК 528.8

Б. Н. РОДИОНОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф. кафедры аэрофотогеодезии;  
 Е. К. НИКОЛЬСКИЙ<sup>2</sup>, канд. техн. наук, проф., зав кафедрой геоинформатики и  
 кадастра, дир. института архитектуры и градостроительства

## ОБ ИЗМЕРЕНИИ КООРДИНАТ ДЕТАЛЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ДИСКРЕТНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОЛЯХ И О ТРЕХЩЕЛЕВОЙ АЭРОСЪЕМКЕ

<sup>1</sup>ФГОУ ВПО «Государственный университет по землеустройству»

Россия, 105064, г Москва, ул Казакова, д 15 Тел (499) 261-95-45, эл почта info@guz.ru

<sup>2</sup>ГОУ ВПО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

Россия, 603950, г Н Новгород, ул Ильинская, д 65 Тел (831) 430-17-73, эл почта gis@nngasu.ru

*Ключевые слова* видеоизображения, фотограмметрия, трехщелевая камера, иконограмметрия, координаты

*Key words* video, photogrammetry, trehschelevaya camera ikonogrammetriya, coordinates

*В статье приведена геометрическая и энергетическая интерпретация построения видеоизображения на основе чего формулируются особенности получения минимального элемента цифрового изображения. Рассмотрены вопросы применения цифровых трехщелевых камер для съемок местности что позволит повысить точность фотограмметрических измерений и автоматизировать процесс измерения координат точек изображения.*

*The article addresses geometric and dynamic interpretation of video image construction, formulates the specifics of obtaining a minimal element of digital image. Applications of digital tri-aperture cameras for aerial imagery are reviewed seeking to improve the accuracy of photogrammetric measurements and automate the measurement of point coordinates on a visual plain.*

Под информационными полями понимаются фотографии, получаемые на основе фотохимического эффекта, и видеоснимки, получаемые с использованием фотоэлектрического эффекта. Структура фотографий такова, что она может быть описана непрерывными функциями и пониматься как пластичная. Такая структура допускает изменение масштаба путем растяжений и сжатий, при которых не происходит разрывов и наслоений деталей в изображениях. Видеоснимки описываются импульсными функциями, каждый импульс которых представляет дискретный элемент информационного поля. Видеоизображения широко применяются в аэросъемке и космических съемках, поэтому аспекты их геометрической и энергетической интерпретации актуальны.

Для топографических съемок применяют цифровые съемочные камеры. В таких камерах в качестве светочувствительного сенсора используют матрицы из ячеек приборов с зарядовой связью (ПЗС) площадной и щелевой конструкции. Камеры с площадными матрицами ПЗС являются аналогами традиционных топографических камер покадровой съемки, берущих начало от АФА-Потте. Прототипом камер со щелевыми матрицами служит АЩАФА-Семенова.

Геометрическая интерпретация фотографических информационных полей выполняется методами фотограмметрии. Применение этого термина при обработке видеополей некорректно, так как в них отсутствует предмет фотографии. Поэтому в [1] мы предложили применять более широкое понятие «иконметрия» (в переводе с греческого *эйкон* – образ, изображение и *метрео* – измерение). Это понятие охватывает интерпретацию всех видов изображений, получаемых различными техническими средствами.

Термин «иконометрия» ввел в 1791 году француз Ботан Бопре. Так он назвал разработанный им способ изготовления карт побережья острова Тасмания по зарисовкам, сделанным с борта корабля. В дальнейшем мы будем пользоваться этим термином, введя для краткости обозначение ИМ. Будем пользоваться также следующими понятиями.

**Иконограмметрия**, или **иконогеометрия (ИГМ)**, – измерение и интерпретация геометрических факторов. **Иконоактинометрия (ИАМ)** – измерение и интерпретация энергетических факторов излучения.

Элементарными субъектами измерения служат точки. В ИГМ используют геометрические точки (ГТ), в ИАМ – физические точки (АТ).

ГТ – это точки в абстрактном Евклидовом смысле: точка есть то, что не имеет частей, то есть размера, площади, границы. Она не содержит физической субстанции, способной генерировать, излучать, отражать и поглощать энергию. АТ содержит материал, который способен генерировать, поглощать и отражать лучистую энергию. Понятия ГТ и АТ подразумевают дискретность изображения.

В ИГМ дискретность фотографических изображений создается оператором-наблюдателем, который выбирает на фотоизображении и маркирует в качестве ГТ отдельные детали тона и контуров объектов. Маркирование делается накалыванием или другим способом, оставляющим в изображении неизгладимый след.

В отличие от ГТ, точки АТ имеют конечные размеры и представляют собой площадку, на которой можно инструментально измерить энергетические параметры. В цифровых изображениях дискретность создается структурой сенсора – матрицами ПЗС, ячейки которых могут рассматриваться как АТ.

В ИГМ применяют системы координат. Наиболее распространена трехмерная Декартова система с ортогональными осями абсцисс, ординат и аппликат. Как субъект измерений точки используют для определения линейных параметров: координат, размеров, углов, направлений, площадей. Точность таких определений зависит от выраженности, резкости элементов деталей, принимаемых за ГТ, от точности их маркирования и от точности инструмента, которым указанные параметры определяются. При интерпретации фотографий точность измерений в определенной степени можно регулировать изменением масштаба и точности инструмента. У цифровых изображений точность измерений детерминирована и зависит от размеров ячейки ПЗС. Внутри ячейки яркость изображения практически равномерна и нет деталей, на которые можно навести марку (курсор) прибора. Поэтому за ГТ принимают центр ячейки, то есть центр АТ. Если субъектом измерения служит, например, опознавательный знак на местности, то точка с его геодезическими координатами не обязательно изобразится в центре ячейки. Здесь скажется фактор случайности. Выполненные исследования [1] показали, что погрешность измерения геометрических координат в дискретном поле (как следствие дискретности) составляет:

$$m = \pm 0,17 dx,$$

где  $dx$  – размер элемента дискретности, то есть ячейки.

В ИГМ применяют абстрактные геометрические модели – конструкции, аппроксимирующие процесс создания центральной проекции. В таких конструкциях, кроме ГТ, участвуют геометрические лучи (ГЛ), проходящие через единую точку пространства – центр проекции (ЦП), или центр наблюдения. ГЛ соединяют точки прообраза (местности) с точками их образа (изображения на



снимке). ГЛ так же, как ГТ, бестелесны и поэтому не подвержены внешнему воздействию.

Фундаментальным началом геометрических моделей служит проективность процесса преобразования информации, содержащейся в прообразе – местности, в образ-снимок и обратно. Геометрической формализацией этого процесса является модель построения съемочным устройством изображения, называемая системой линейного проектирования. Идеализированный снимок рассматривается как линейная перспектива местности.

Физические точки местности содержат субстанцию, генерирующую и отражающую энергию, которая излучается в пространство и улавливается съемочным устройством. Эта энергия распространяется в виде потоков по физическим лучам (ФЛ), которые называют также световыми и энергетическими трубками. Они также проходят через центр проекции, соединяют энергетические пятна местности – АТ со светочувствительными элементами сенсора, возбуждают его светочувствительную субстанцию и создают электрические сигналы, которые складываются в электронное изображение. Как уже сказано, в цифровых системах АТ приурочены к ячейкам ПЗС. ФЛ можно рассматривать как оболочку вокруг ГЛ, внутри которой распространяется лучистая энергия. Она подвергается воздействию среды и устройств съемочной системы, что приводит к искривлению ФЛ, а вместе с ними ГЛ. Идеальная структура ИГМ искажается, и возникает необходимость вводить поправки в координаты ГТ. Таков механизм возникновения искажений реальных изображений.

Глубокие исследования влияния различных геометрических, физических и технических факторов на точность иконометрических построений провел С. В. Кнорозов. Он показал, что имеется предел адекватности проекций местности, построенных реальной съемочной аппаратурой, линейной перспективе даже при введении всех необходимых поправок. Этот предел зависит от конструкции, габаритов, условий полета, эксплуатации и компарирования и выражается средней величиной остаточных погрешностей модели съемки  $dm_{x,y} = 0,001-0,002$  мм. Для достижения такой точности необходимы специальные технические решения и ограничения. Реальная иконогеометрическая точность изображений в несколько раз хуже.

Указанные погрешности в координатах точек цифрового изображения можно назвать методическими, так как они свойственны самому методу съемки цифровыми оптическими средствами. Их суммарное воздействие в среднем можно считать равным 0,003 мм. Это, видимо, предельная геометрическая точность цифровых изображений аэроснимков.

Как уже сказано, определение полного состава погрешностей и введение соответствующих поправок в координаты  $x$  и  $y$  в условиях эксплуатации нерационально. Однако все же необходимо учитывать наиболее существенные из них: оптическую дисторсию объектива, погрешности выставки ячеек матрицы ПЗС относительно осей рабочей системы координат, искажения из-за атмосферной рефракции, искажения в тракте передачи, измерения, запоминания координат и т. п. Первые две поправки постоянны и определяются априори при калибровке камеры. Другие поправки, являясь переменными, определяются и вводятся по данным конкретного полета.

Необходимо внести ясность в вопрос взаимосвязи ГТ и АТ при аналитическом решении иконометрических задач.

Известный современный математик Н. В. Ефимов в своем учебном пособии для вузов «Проективная геометрия» указывает следующее: «Мы можем условиться называть «точкой» любой шар заданного диаметра  $d$ , прямой – любой бесконечный круглый цилиндр того же диаметра  $d$ , плоскостью – каждый слой пространства между двумя обычными параллельными плоскостями, отстоящими друг от друга на расстоянии  $d$ ». Продолжим это суждение и условимся также называть «точкой» любое плоское сечение указанной прямой – цилиндра. Будем подразумевать, что эти формы содержат указанное вещество, способное к физическим процессам. Точки и лучи в Евклидовом смысле назовем, как сказано ранее, геометрическими и обозначим их ГТ и ГЛ, а формы, указанные Н. В. Ефимовым, – актинометрическими и обозначим АТ и АЛ. Очевидно, необходимо называть общим термином «точки» все дискретные элементы цифровых съемочных систем и изображений.

Более широко стали применяться съемочные системы, основанные на динамизме процесса съемки: щелевые камеры, сканерные и панорамные аппараты. В этих системах обзор местности происходит во времени, в результате чего изображение складывается из отдельных элементов, совокупность которых имеет цифровую дискретную структуру. Съемка такими камерами в дальнейшем полностью заменит съемку аппаратурой обычной однокадровой съемки. При этом наиболее перспективны камеры, называемые щелевыми.

Щелевая аэросъемка изобретена в России инженером Виталием Семеновичем Семеновым и применяется в отечественных ВВС с 1939 года, а в 1943 году она заимствована ВВС США.

В России эксплуатируется цифровая трехщелевая камера ЦТК-140 (рис. 1) системы И. В. Полянского. Этот комплекс создан кооперацией ИКИ РАН и ГЦ «Природа» [2]. Он изготовлен на базе серийного аэрофотоаппарата АФА-140, в котором кассета с фотопленкой заменена электронным блоком с сенсором для фотоэлектронной щелевой съемки.

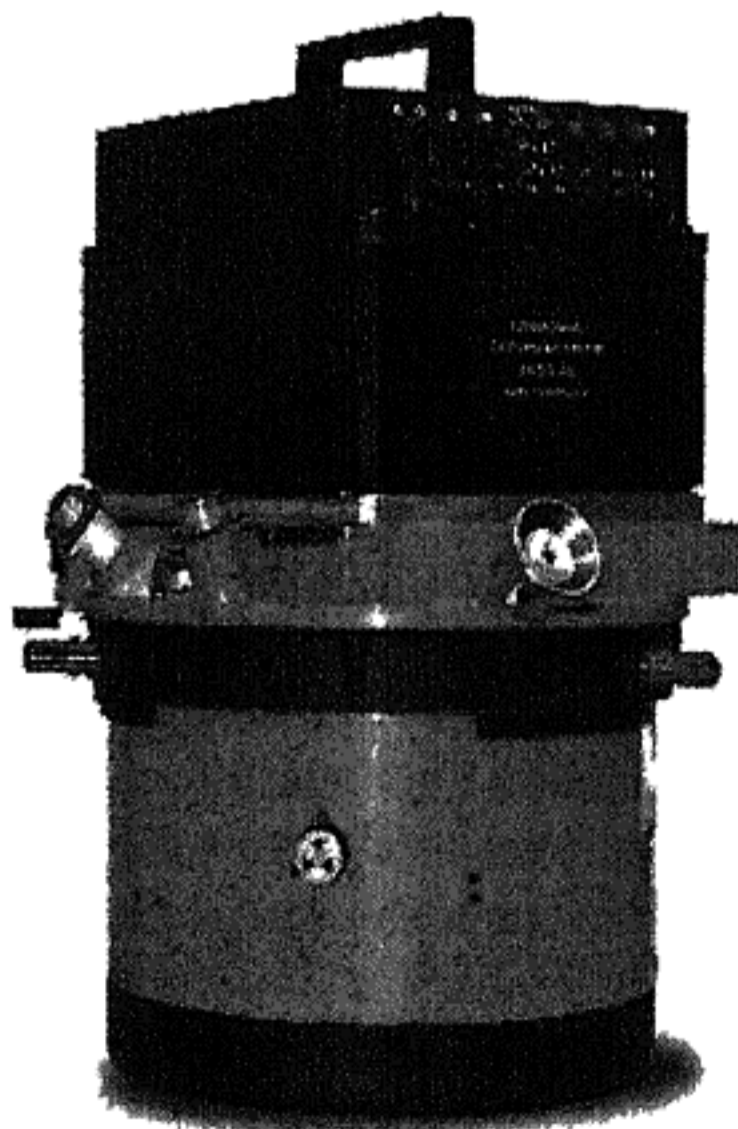
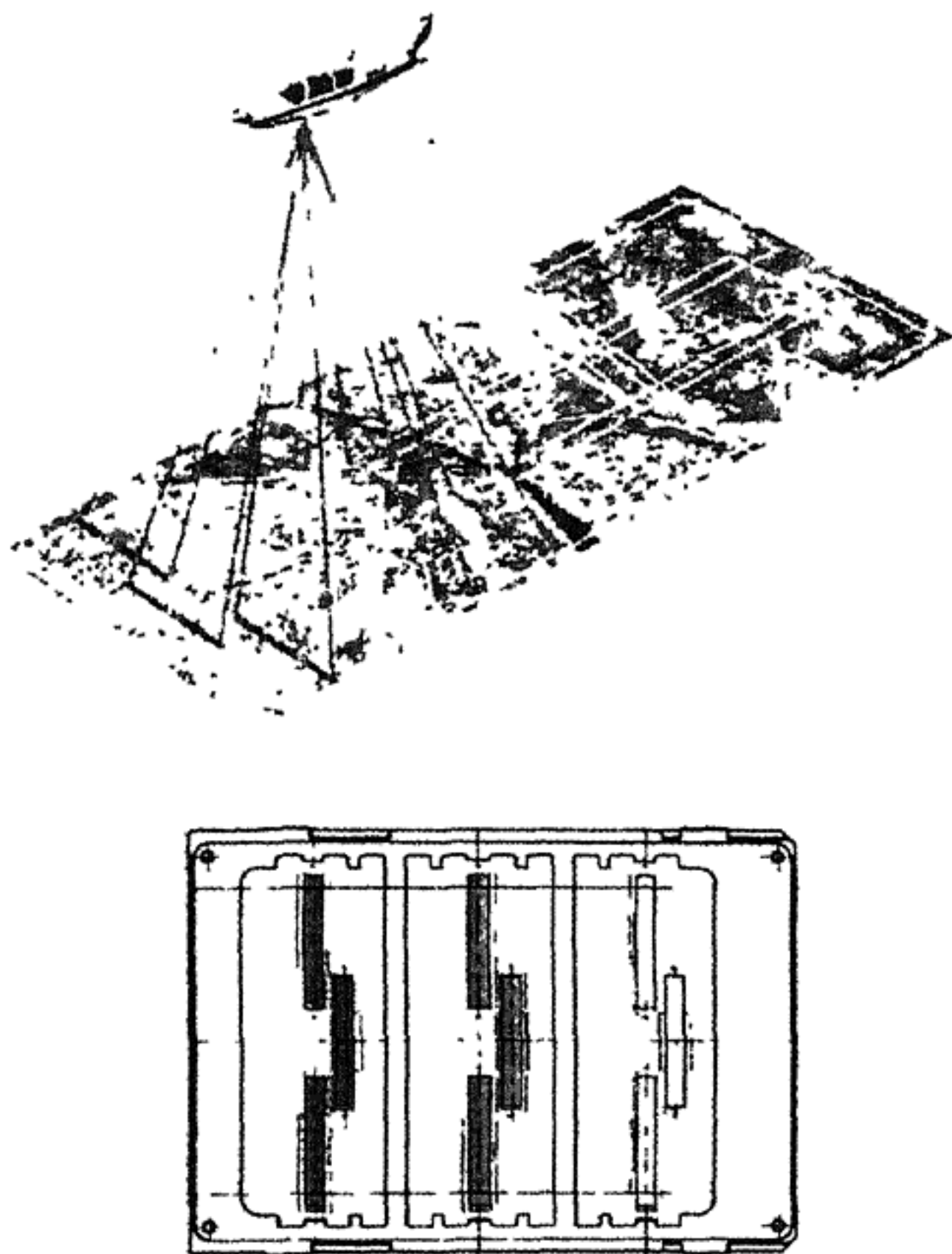


Рис. 1. Цифровая трехщелевая камера с объективом 140 мм

Светочувствительным сенсором служат ячейки приборов с зарядовой связью, сложенные в линейки (ЛПЗС). В фокальной плоскости объектива «Руссар-43» с фокусным расстоянием  $f = 140$  мм расположены три группы линеек (рис. 2). Одна группа находится в центре поля изображения объектива и ориентирована перпендикулярно к направлению полета, две другие параллельны первой и находятся на краях поля изображения. Каждая группа линеек состоит из трех секций, сложенных так, что образуется одна вытянутая линейка со ступеньками. Ступенчатость не нарушает принципов щелевой съемки, т. к. каждая группа рассматривается как одна прямая линейка. Суммарное число ячеек в такой условной линейке равно 22 000. Размер ячейки  $dx \times dy = 0,007 \times 0,007$  мм. Длина составной линейки (ЛПЗС)  $l_y = 154$  мм.



### Схема цифровой съемки

Принцип действия регистратора изображения основывается на push-broom технологии с непрерывным получением стереоизображения.

В фокальной плоскости установлены 3 группы ПЗС-линеек по 22 000 элементов в каждой. Размер элемента 7 мкм.

Это обеспечило захват на местности, аналогичный аэрофотографической системе при более высоком пространственном разрешении.

Рис. 2. Фокальная плоскость камеры ЦТК - 140, линейки ЛП, ЛО, ЛЗ и их секции

Центральная линейка (ЛО) создает отвесную визирную плоскость, боковые – наклонные визирные плоскости, ориентированные так, что одна из них направлена вперед (ЛП) по полету, другая (ЛЗ) – назад. Угол между отвесной плоскостью и боковыми равен  $27^\circ$ . Расстояние в фокальной плоскости между центральной и боковыми плоскостями  $v_x = 71,33$  мм.

ПЗС генерируют электрические заряды, энергия которых пропорциональна яркости деталей оптического изображения, накрываемого линейкой, и времени накопления зарядов  $dt$  (выдержке). Время накопления задается так, что

$$dt = dx/w,$$

где  $w$  – скорость движения оптического изображения.

С частотой  $F=1/dt$  заряды на линейках опрашиваются – обнуляются. За время  $dt$  изображение перемещается в фокальной плоскости на расстояние, равное ширине ячейки ПЗС. Опрос всех линеек происходит синхронно. Накопленные заряды образуют вдоль линеек зарядовые пакеты – строки. Они одновременно переносятся в регистр оперативной памяти, ячейки обнуляются, и накопление зарядов возобновляется.

Зарядовые пакеты из регистра оперативной памяти поступают в систему обработки, где из них мультипликативно формируется цифровое строчное изображение. Оно хранится в сменных накопителях (кассетах) как продукт щелевой съемки.

Заряды, генерируемые в упомянутых секциях составных линеек, образуют девять щелевых панорам. В дальнейшем они в нужном порядке сшиваются в общие картины панорам снятой местности, а панорамы могут быть разделены на отдельные щелевые снимки, эквивалентные снимкам покадровой съемки.

В результате получают три итоговые панорамы: отвесного, переднего и заднего обзора в панхроматическом диапазоне оптического излучения.

ЦТК-140 можно применять для аэросъемок различного назначения. Особенно удобна трехщелевая конструкция для градостроительных целей.

Оригинальные щелевые панорамы могут быть получены, например, с высоты полета 5600 м в масштабе 1:40 000. Формат журнального листа не позволяет показать эти щелевые снимки в полном размере. На рис. 3 даны фрагменты кадров от линеек ЛП-2, ЛО-2 и ЛЗ-2, увеличенные по сравнению с оригиналом. Местность на фрагментах съемки *а* и *в* изображена в перспективной квазиаксонометрической проекции, а на фрагменте *б* – в плановой квазиортогональной проекции. Трехщелевая съемка позволяет видеть один и тот же объект сразу в трех проекциях одновременно. При этом можно наблюдать изображения стереоскопически. На рис. 4 представлен фрагмент оригинального снимка, увеличенный примерно до масштаба 1:2000.

Измерение координат точек изображения на снимках трехщелевой съемки имеет свою специфику, т. к. при этом требуется вводить поправки за перспективность и динамизм процесса съемки. Принцип этих поправок можно понять из монографии «Динамическая фотограмметрия» [1]. В статье [3] геометрия трехщелевой съемки рассмотрена несколько подробнее и даются рекомендации по иконометрической интерпретации щелевых снимков.

Использование компьютерных технологий обработки цифровых изображений делает возможным расширение состава измерений деталей изображения щелевых снимков. Созданы рабочие программы автоматической идентификации точек изображения на перекрывающихся снимках. Это позволяет автоматизировать процесс измерения координат точек изображения.

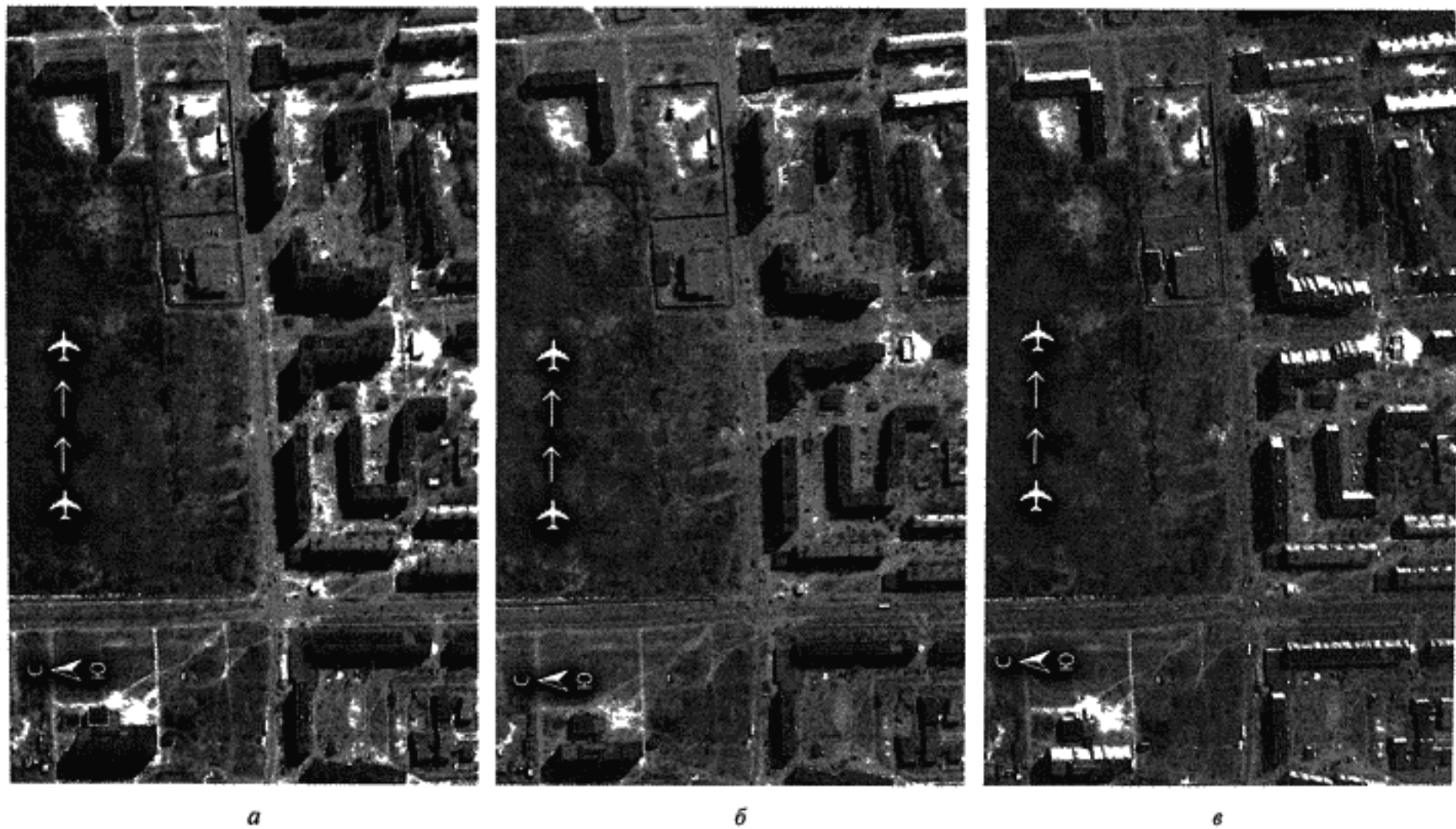


Рис. 3. Фрагменты щелевых панорам: а – визирная плоскость линейки ЛП-2 направлена вперед; б – визирная плоскость линейки ЛО-2 направлена отвесно; в – визирная плоскость линейки ЛЗ-2 направлена назад © Госцентр «Природа» и ИКИ РАН



Рис 4 Фрагмент изображения, полученного при отвесном положении плоскости визирования линейки ЛО-2 и приблизительно 20-кратном увеличении

В [4] предложены параметрические уравнения движения точек оптического изображения в камерах с плоским кадровым окном. Там же представлены формулы продольных и поперечных параллаксов как функций изменения координат за время  $t$ . Эти изменения при прочих равных условиях являются функциями времени съемки идентичных точек на левом и правом снимках. Поэтому можно написать

$$p = (A)t \text{ и } q = (B)t,$$

где  $A$  и  $B$  – совокупности факторов построения центральных проекций снимков.

При таком подходе можно заменить линейные измерения измерениями времени в моменты фиксации на снимках идентичных точек. Этот вопрос требует глубокого изучения. Но априори можно рассчитывать, что существенно повысится точность построений, так как возможности измерения точного времени на порядок выше точности линейных измерений.





### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Родионов, Б. Н. Динамическая фотограмметрия / Б. Н. Родионов. – М. : Недра, 1983. – 311 с.
2. Аванесов, Г. А. Цифровые аэросъемочные комплексы / Г. А. Аванесов, Ю. П. Киенко // Геопрофи. – 2004. – № 1. – С. 8–2.
3. Родионов, Б. Н. Трехщелевая съемка / Б. Н. Родионов // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2007. – № 11. – С. 59–62.
4. Родионов, Б. Н. О динамической фотограмметрии / Б. Н. Родионов // Геодезия и картография. – 1970. – № 10. – С. 43–49.

© **Б. Н. Родионов, Е. К. Никольский, 2010 г.**

Получено: 26.07.2010 г.