

Методика локальных температурных измерений с помощью ИК-камер на базе беспилотных летательных аппаратов

Б.Е. Резник¹, М.Е. Рахымбердина², Н.А. Зимановская²

¹*Берлинский университет прикладных наук, Берлин, Германия*
resnik@bht-berlin.de

²*Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Казахстан*
MRahymberdina@edu.ektu.kz

Локальные инфракрасные съемки на базе компактных беспилотных летательных аппаратов, выполненные одновременно со съёмкой в видимом диапазоне, способны без дополнительных затрат дать ценную информацию при изучении районов активного вулканизма и гидротермальной деятельности. Авторами предложены методы математического моделирования результатов таких съемок, позволяющие определение абсолютных значений температур во всём исследуемом районе на основе небольшого количества опорных точек с измеренными температурами поверхности.

Ключевые слова: Беспилотные летательные аппараты (БПЛА), Инфракрасная съёмка, Термические аномалии

Methodology of local temperature measurements with copter-based IR cameras

Boris E. Resnik¹, Marzhan E. Rakhymberdina², Natalya A. Zimanovskaya²

¹*University of applied science BHT Berlin, Germany*
²*Serikbayev East Kazakhstan technical university, Kazakhstan*

Local infrared imaging using unmanned aerial vehicles (UAVs) simultaneously with surveys in the visible range can provide valuable information in the study of areas of active volcanism and hydrothermal activity at no additional cost. The author presents the methods for mathematical modelling of the results of such surveys, which allow determining absolute temperature values in the entire survey area based on a small number of reference points with measured surface temperatures.

Keywords: Unmanned aerial vehicle (UAV), Infrared imaging, Temperature anomaly

Введение

Дистанционные инфракрасные съемки в диапазоне электромагнитных волн от микрометрового (10^{-6}) до миллиметрового (10^{-3}) при помощи аэрокосмических методов уже много десятилетий успешно используются для решения различных задач, в том числе в области геологии (Rahne, 2022). В последние годы такие съёмки могут также выполняться с помощью лёгких беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые уже давно заняли свою нишу незаменимых помощников во многих областях современной жизни, включая мониторинг труднодоступных объектов. Ценным преимуществом таких съёмок являются большая разрешающая способность из-за близости к исследуемому объекту, а также оперативное и при необходимости многократное их применение непосредственно при нахождении в исследуемом районе. Аномалии на таких снимках формируются в том числе и за счет тепловых потоков из недр. Поэтому такая локальная инфракрасная съемка, выполненная одновременно со съёмкой в видимом диапазоне и последующим картированием местности, способна без дополнительных затрат дать важную дополнительную информацию при изучении районов активного вулканизма и гидротермальной деятельности. Полученные карты распределения температур на земной поверхности могут при этом служить как самостоятельным источником геотермической информации, так и для расчетов тепловых потоков. Обработка и анализ полученных инфракрасных снимков имеют много общего с дешифрированием снимков видимого диапазона, но в то же время и существенные отличия.

Качественная интерпретация инфракрасных снимков сводится к выделению локальных аномалий термического поля и сопоставлению их с аномалиями других геофизических методов, а также с геологическими данными. При количественной интерпретации результатов необходимы не только градиенты температур на поверхности, но и их абсолютные значения. По зарегистрированному тепловому излучению определяется так называемая «радиационная температура», которая обычно ниже физической, поскольку она зависит от излучательной способности объекта и от ослабления излучения атмосферой. Кроме того такая съемка документирует излучение поверхности, определяемое как собственной температурой геологических тел, так и отраженным солнечным излучением. Этот недостаток инфракрасных съёмок может быть устранён с помощью описанных в статье методов математического моделирования на основе небольшого количества опорных точек с достоверно измеренными температурами поверхности.

Обработка ИК-изображений

Собирающая линза ИК-камеры фокусирует реальное тепловое излучение объекта измерений на ИК-детектор (рис. 1), который преобразует поглощенное излучение в цифровой электрический сигнал. Этот сигнал пропорционален интенсивности зарегистрированного излучения и на следующем этапе может быть представлен как двумерное цифровое монохромное изображение с 8-битной шкалой яркости (от 0 до 255). Дальнейшее преобразование этих величин в реальные температуры поверхности связано с многочисленными сложностями. Спектр излучения «серого тела» совпадает с таковым у «абсолютно чёрного тела», отличается однако всегда меньшей интенсивностью (коэффициент ε). Реальные материалы обладают очень сложными эмиссионными свойствами, зависящими от соответствующих частот, что ещё более усложняет анализ полученной информации (Bernhard, 2014).

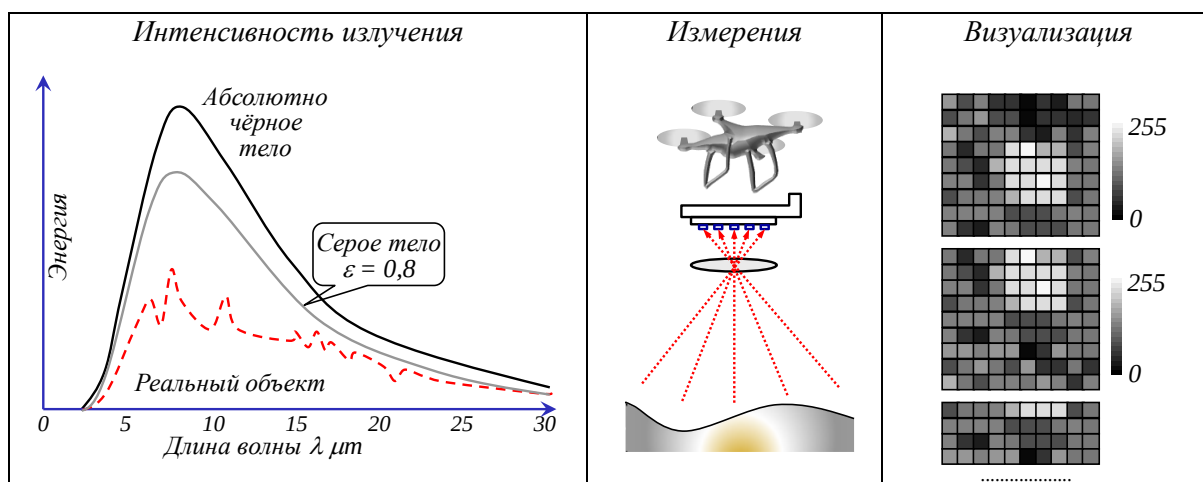


Рисунок 1 – Принцип инфракрасной съёмки

В связи с тем, что и высота полёта БПЛА и разрешающая способность ИК-камер весьма ограничены, съемка сравнительно больших площадей более одного гектара выполняется всегда с помощью нескольких отдельных ИК-фотографий, которые для последующего совместного анализа должны быть соединены в одно крупномасштабное изображение без пропусков и наложений, так называемую фотомозаику. Необходимая для этого геометрическая трансформация снимков в единую систему двухмерных координат выполняется с помощью общих контрольных точек на отдельных изображениях. Нахождение таких точек на инфракрасных фотографиях зачастую сложнее, чем при съемках в видимом диапазоне и требует наложения на них соответствующих RGB-изображений. Каждое отдельное инфракрасное изображение имеет своё индивидуальное распределение значений шкалы яркости в соответствии с энергией, которое отражает различные диапазоны интенсивности излучения по всей площади каждой конкретной фотографии. Отдельные

изображения не соответствуют друг другу с точки зрения радиометрических свойств и их цветовая классификация может соответствовать совершенно различным энергиям или температурам. По этой причине для формирования «фотомозаики» помимо пространственной привязки отдельных фотографий необходимо обеспечить единую шкалу яркости в изображениях.

Для того чтобы преобразовать все изображения к единой температурной классификации, их необходимо предварительно модифицировать. Такая адаптация отдельных изображений может выполняться в два этапа (рис. 2). На первом этапе обработки создаются отдельные температурные матрицы для каждой фотографии. Для такого преобразования используются измеренные значения температур (t) для отобранных контрольных точек изображений и соответствующие значения яркости (g). Затем на их основании вычисляются параметры регрессионных прямых и значения температур для всех элементов цифрового изображения (матрица температур). На втором этапе обработки значения яркости (цвета) на всех фотографиях приводятся к единой шкале температур. Самый простой способ для этого преобразования – это фиксация максимальной и минимальной температуры для всех используемых изображений и последующая интерполяция на всю шкалу интенсивностей (от 0 до 255) с помощью новой регрессионной прямой на основании подготовленных матриц температур. За исключением локальных измерений в характерных точках, например обычными цифровыми термометрами, все описанные вычисления и преобразования выполняются автоматически с помощью подготовленных программ.

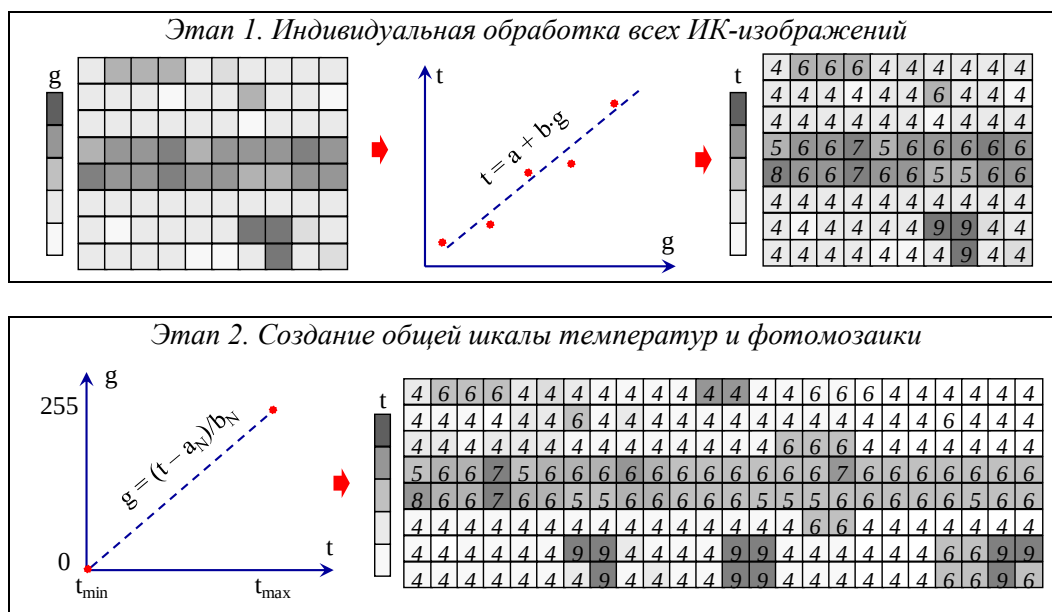


Рисунок 2 – Методика преобразования ИК-изображений

Многие проекты, выполненные авторами в последние годы, доказали, что и предложенная методика и программное обеспечение позволяют успешно проводить обработку ИК-съемок и их последующую интерпретацию с анализом температур поверхности. Наиболее известным применением инфракрасных съёмок является строительная термография в целях визуализации тепловых потерь в зданиях и выполнения последующих теплоизоляционных мер. Преобразование снимков (БПЛА) и интерпретация температур отдельных участков фасада и крыши здания при таких съёмках проиллюстрированы на рис. 3. На этом примере особенно хорошо видны различия между первым снимком (ИК 1) и двумя соседними с перекрывающимися изображениями, поскольку в верхней части этой фотографии частично запечатлено небо. Полученная область с фиктивными отрицательными температурами изменила всю шкалу цветов этого изображения и радиометрические различия снимков настолько велики, что объединение их в одну общую мозаику стало практически невозможно. С помощью описанной методики все

изображения были приведены к общей температурной шкале и обеспечили объединение и последующий совместный анализ.

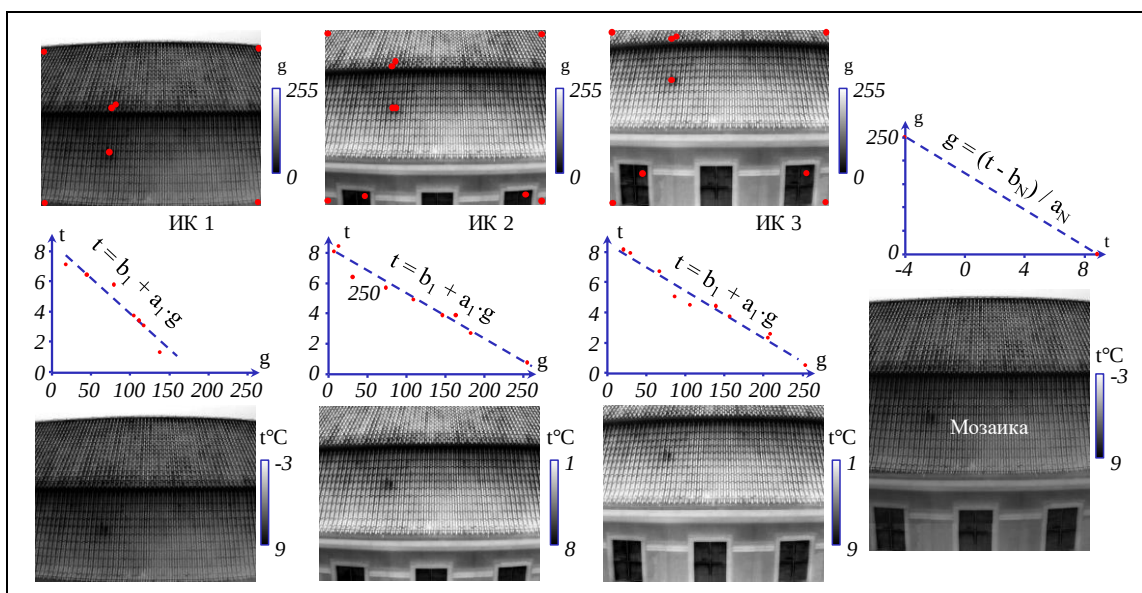


Рисунок 3 – Применение методики при съёмке фасада

На рис. 4 в качестве примера показаны результаты обработки трёх отобранных снимков съёмки земной поверхности при помощи БПЛА и их последующей обработки с целью получения общего изображения и единой температурной шкалы.

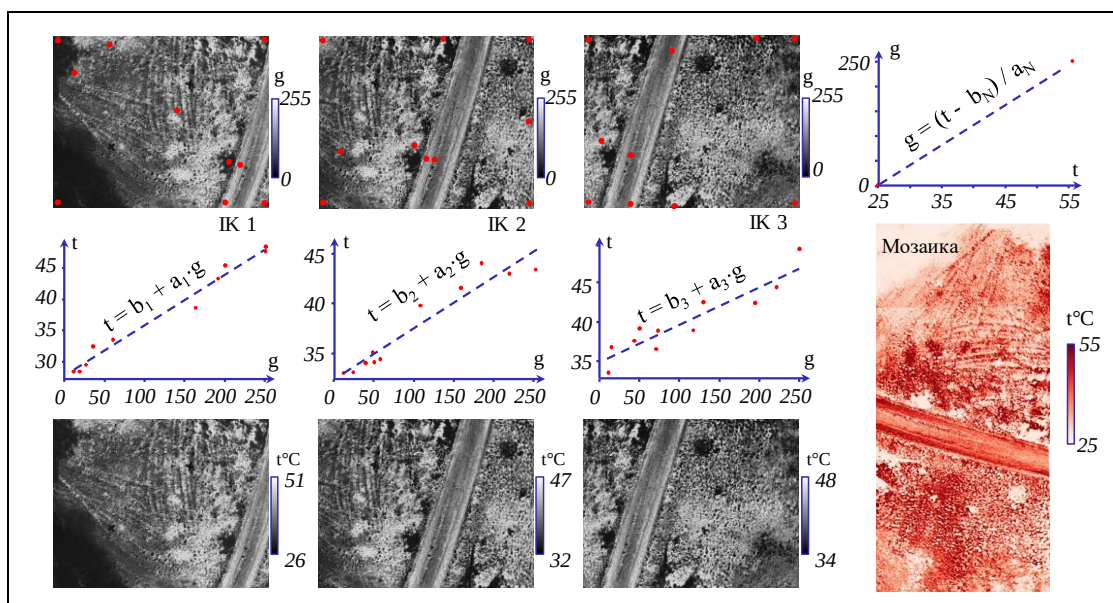


Рисунок 4 – Применение методики при съёмке земной поверхности

На основании накопленного опыта авторы убеждены, что описанные методы обработки инфракрасных съёмок могут успешно применяться и при изучении районов активного вулканизма и гидротермальной деятельности. Практическая реализация таких задач потребует интенсивной совместной работы специалистов различных специальностей, в первую очередь, в области геодезии и геологии.

Список литературы

1. Rahne E. Thermografie: Theorie, Messtechnik, Praxis, Berlin, Wiley-VCH, 2022. 720 с.
2. Bernhard F. Handbuch der Technischen Temperaturmessung, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2014, 1643 с.