

КУРАМАГОМЕДОВ Б. М., АЛЕКСЕЕНКО Н. А., МЕДВЕДЕВ А. А.
ТЕПЛОВАЯ СЪЕМКА С БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
В ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Аннотация. В статье рассматривается опыт применения тепловой съемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при проведении географических исследований. Приведены результаты и методика обработки некоторых собственных экспериментов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, тепловая съемка, БПЛА, аэрофотосъемка, обработка аэроснимков.

KURAMAGOMEDOV B.M., ALEKSEENKO N.A., MEDVEDEV A.A.
THERMAL SURVEYING WITH UNMANNED AERIAL VEHICLES
IN GEOGRAPHICAL RESEARCH

Abstract. This article considers the experience of thermal surveying with unmanned aerial vehicle (UAV) for doing geographical research. The results and processing methods of the authors' research work are presented.

Keywords: unmanned aerial vehicles, thermal surveying, UAV, aerial photography, processing of aerial photographs.

Современные исследования объектов, явлений и процессов в окружающей среде сопровождаются широким применением материалов дистанционного зондирования (ДДЗ) и геоинформационных технологий [3; 5]. Использование ДДЗ при научных исследованиях имеет давнюю историю. Однако, в начале нынешнего столетия интерес к аэросъемке вышел на новый виток. Этому способствовало появление и доступность гражданских беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Сфера применения БПЛА самая различная, но съемка с БПЛА актуально для проведения географических исследований на локальных и фашиальных уровнях [1; 4].

К основным условиям популярности БПЛА относятся легкая разворачиваемость, мобильность, оперативность, низкая стоимость и получение данных высокого пространственного разрешения, возможность использования полезной нагрузки. В качестве полезной нагрузки на БПЛА, используются многозональные камеры, тепловизоры, LIDAR и гиперспектральные камеры, что позволяет проводить тематические исследования.

Об актуальности и новизне исследований в данном направлении свидетельствует устойчивый рост публикаций и патентов, характерный начиная с 2000-х гг. (см. рис.1). В разрезе предметной области исследований, более 80% приходится на инженерные работы,

связанные с усовершенствованием технических характеристик аппаратов. Несмотря, на то что работ, связанных с географическими исследованиями с помощью БПЛА значительно меньше, им также присуща тенденция постоянного увеличения. Эти работы посвящены, главным образом, разработке и усовершенствованию методов получения, обработки и дешифрирования снимков с БПЛА.

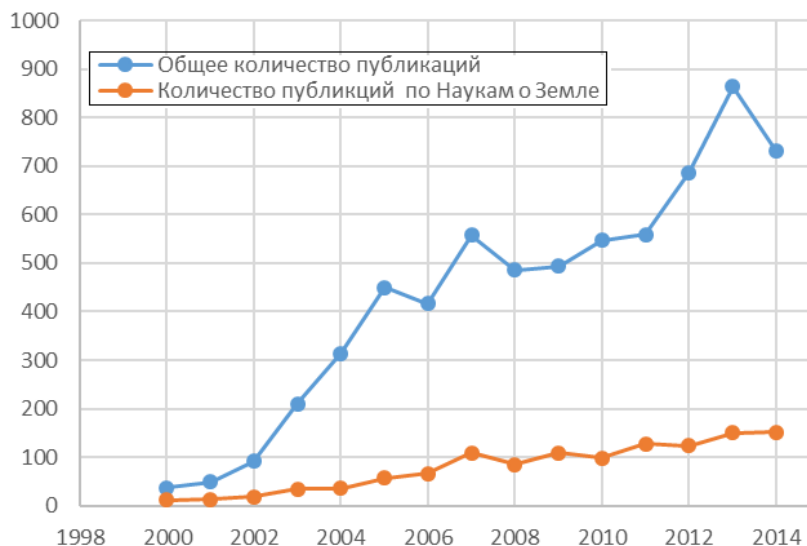


Рис. 1. Динамика количества публикаций о применении БПЛА (2000–2014 гг.).

Цель данной работы – демонстрация возможностей использования тепловой аэросъемки с БПЛА в различных областях географических исследований.

При средне-крупномасштабных географических исследованиях с помощью тепловых снимков необходимо использовать данные высокого пространственного разрешения. Главный источник тепловой съемки – метеорологические и ресурсные спутники. Фонд тепловых снимков накапливается с 60-х гг. с начала запуска метеорологических спутников, ведущих съемку на глобальном уровне. Ресурсные спутники ведут съемку с более высоким разрешением (максимальное – 20 м, с американского космического аппарата МТИ (Multispectral Thermal Imager). В настоящее время съемку с высоким пространственным разрешением тепловых снимков (100 м) ведет ИК-радиометр TIRS на спутнике Landsat-8 [2].

Для более высоко детальной тепловой инфракрасной (ИК) используют аэросъемки с пилотируемых самолетов и вертолетов, с применением тепловизионной сканирующей системы высокого разрешения. Этот метод получения тепловых снимков (аэротеплоснимков) самый дорогостоящий и поэтому мало применяемый в географических исследованиях [4].

Развитие неохлаждаемых тепловых приборов (кремниевых или ванадиевых микроболометров), которые позволяют избежать использования тяжелых и дорогих охлаждаемых датчиков, обеспечивают их интеграцию с БПЛА и получение результатов с

высоким пространственным разрешением. Для используемых при тепловой аэросъемке тепловизоров важны такие технические характеристики, как диапазон температур, количество пикселей (ИК-разрешения), коэффициент излучения.

Диапазон температур позволяет измерять температуру лишь в указанном интервале, а за пределами откалиброванного диапазона возникает насыщение и сильное искажение действительных значений. От пространственного разрешения, как уже говорилось выше, зависит детальность изображения, и соответственно дешифрируемость, а также повышается точность измерения небольших объектов. Коэффициент излучения описывает способность поверхности испускать ИК-излучение [4].

Тепловые датчики можно разделить на две большие группы: специальные и бюджетные. Группа специальных датчиков разных компаний, приспособленных специально для съемки с БПЛА, имеет высокий ценовой диапазон. Знакомство с мировым опытом применения аэротеплосъемки с БПЛА показал, что такие датчики пока применяются лишь в ограниченных областях.

Наиболее доступные и популярные тепловизоры, имеют качество ниже специальных, но дают вполне пригодные для некоторых исследований результаты (см. рис. 2). Их используют как датчики к смартфонам.

Характеристики	FlirOne	Therm-App	Mu Optics	Seek Thermal
Поддержка IOS	●	–	●	●
Поддержка Android	–	●	●	●
Диапазон отображаемых температур	0 – 100 °C	5 – 90 °C	-66 – 90 °C	-40 – 330 °C
Разрешение камеры	80 x 60	384 x 288	160 x 120	206 x 156
Спектр волн	8 – 14um	7.5 – 14um	8 – 14um	7.2 – 13um
Частота съемки	8.6Hz	8.7Hz	–	< 9Hz
Цена	350 USD	999 USD	325 USD	199 USD

Рис. 2. Сравнительная характеристика бюджетных тепловизоров.

Интересный подход в использовании аэротеплосъемки совместно с многозональной съемкой с других датчиков представлен в работе [13]. Тепловая съемка (тепловизором FLIR Photon 320) применена для обнаружения мхов по степени здоровья на трех ключевых участках на Земле Уилкса в Антарктиде. В результате получены снимки, по которым легко дешифрируются участки сообщества мхов, что затруднительно сделать по фотографическим снимкам на фоне каменных россыпей и сильно переувлажненных участков. Для обработки и извлечения информации по тепловой съемке использованы возможности IDL / ENVI, в котором авторами написан специальный код. В дальнейшем для создания мозаики использован программный продукт Agisoft Photoscan.

Большой вклад в совершенствование технологий БПЛА внесли потребности в сфере сельского хозяйства. Поэтому наиболее развитая область применения БПЛА, в том числе теплосъемки – точное земледелие. Так, в работе [9] приведены результаты по оценке испаряемости и энергетического баланса над полем ячменя в западной Дании в течение весны и лета 2014 года. Это помогло разработать рекомендации по возделыванию культуры на данном поле. В другой работе [11] продемонстрированы возможности тепловой и гиперспектральной съемок с БПЛА для обнаружения напряженных участков водообеспеченности в пределах гетерогенного цитрусового сада.

Опыт применение тепловой съемки наиболее успешен при изучении объектов животного мира. В работе [8] также используется аэротеплосъемка для обнаружения оленят. Авторы предлагают оригинальную методику автоматического обнаружения объектов с помощью разработанного модуля *Matlabanwendung* в среде *Matlab*.

Результаты экспериментов в археологических работах показывают преимущества тепловой съемки при изучении объектов трудно различимых в видимом диапазоне [6; 7]. Методика обработки данных основана на использовании доступного программного обеспечения с открытым кодом. Такой подход вполне удовлетворяет требованиям исследователей при отсутствии возможности использования коммерческого ПО.

Нами проведены работы по тестированию возможностей аэротеплосъемки при решении нескольких задач: состояние лесного массива, снежного покрова, минеральных источников и учет водоплавающей птицы. Для этого использовались тепловизоры *FlirOne* и *Seek Thermal*. При съемке этой аппаратурой важными условиями является дальность видимости, от чего зависит высота полета, и скорость полета, что важно для получения качественного изображения. Необходимо отметить, что съемка производится в виде автономного видеопотока. Камера *FlirOne* по сравнению с *Seek Thermal* имеет скромные параметры, но за счет специализированного ПО для обработки съемки более удобна.

В качестве летательной платформы использован гексакоптер *RC 690 S Tarot 2*. Он имеет в комплектации: систему интеллектуального пилотирования *NAZA-M*, модуль *GPS* и магнитный компас, пульт управления и приемник, силовой аккумулятор и индикатор состояния, *USB* интерфейс. К преимуществам перед другими недорогими БПЛА можно отнести большое расстояние дистанционного управления (1,5 – 2 км), относительно большая допустимая грузоподъемность (до 3 кг), прочная и мобильная конструкция рамы.

Для удобства интерпретации данных тепловизионной съемки создана пополняемая библиотека наземных тепловых образов объектов (530 штук). Материалы наземной съемки корректируются в камеральных условиях, посредством программы *FLIR Tools*, предназначенной для обработки данных съемки с тепловизоров *FLIR*. При обработке

снимков вносятся такие калибровочные данные, как относительная влажность, температура воздуха, температура внешней оптики, коэффициент излучения. Это позволяет получить результаты более близкие к реальным значениям температуры объектов. А одновременная фиксация объекта в тепловом и видимом диапазонах делает процесс дешифрирования более качественной (см. рис.3).

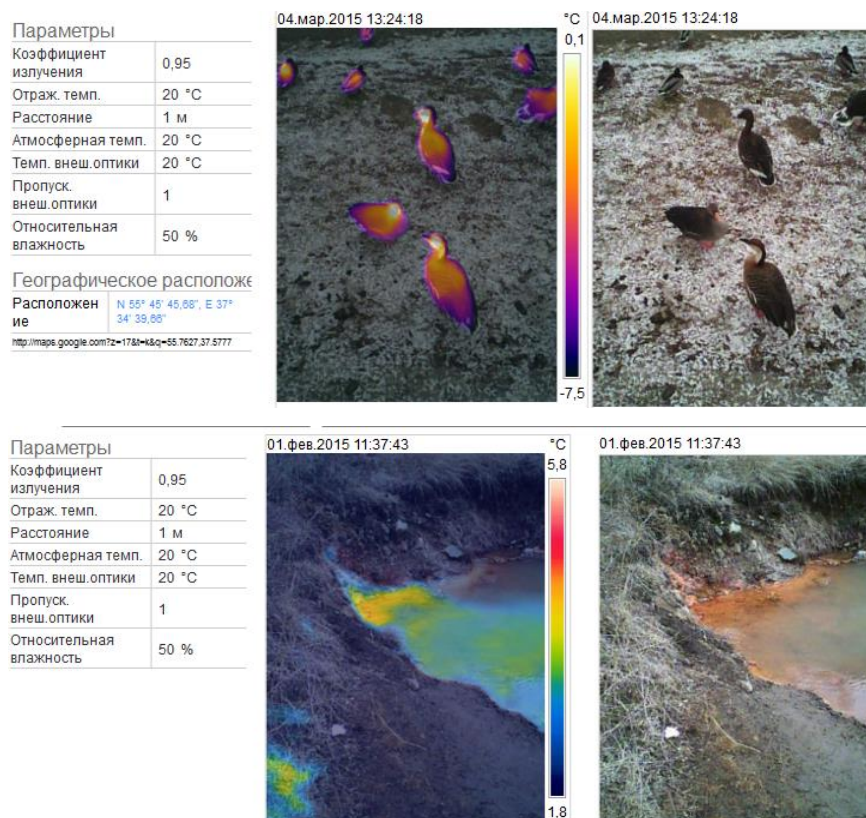


Рис. 3. Примеры тепловых образов гуся гуменника (вверху) и термального источника (внизу).

Для некоторых объектов, при съемке в условиях соответствующему диапазону калиброванных температур тепловизора, получены величины температур близкие к физической температуре. К примеру, это помогло выявить на фотоснимках трудноразличимые в траве невооруженным глазом объекты как муравейники, температура которой оказалось почти на 10^0C выше чем окружающей среды (см. рис. 4).

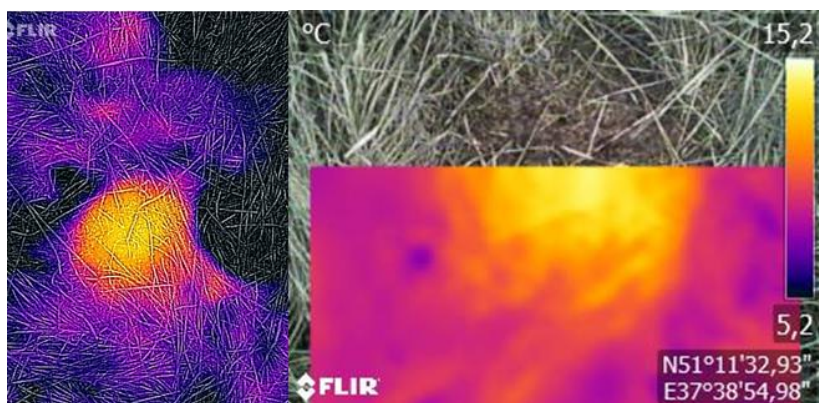


Рис. 4. Теплоснимок муравейника.

Первая тестовая аэротеплосъемка произведена в окрестностях г. Кисловодска. Объектами съемки выступали лесной массив и снежный покров. Съемка произведена с высоты 15 м 30 января 2015 г. в 14:00 ч. при температуре воздуха $+5^{\circ}\text{C}$. По тепловым снимкам хорошо отслеживалось состояние снежного покрова. За счет отражения прямых солнечных лучей, плотный снежный покров выделялся как более теплый объект, чем протаивающий снег. А проталины на фоне снега, из-за наличия травяного покрова с высоким коэффициентом отраженного излучения, выделялись как участки более теплые, хотя и переувлажнены.

Деревья, лишенные листвы, имеют близкие к прошлогоднему травяному покрову яркостные значения, что при автоматизированном или визуальном дешифрировании всего массива усложняет разделение этих двух классов объектов (см. рис.5). А привлечение телесъемки способствует более достоверному и качественному дешифрированию, т.к. деревья нагреваются от солнечных лучей и излучают энергию больше чем другие объекты, за счет своих отражательных свойств.

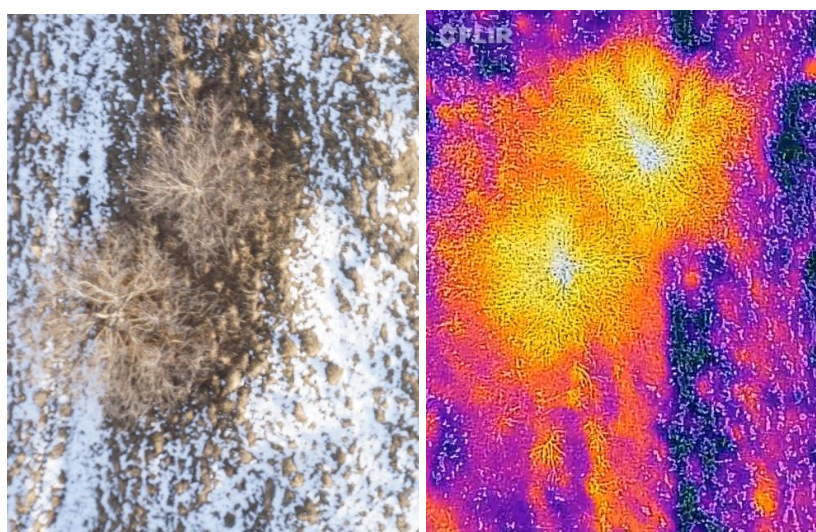


Рис. 5. Фрагменты аэрофотоснимка и аэротеплоснимка

Съемка минеральных источников выполнена в долине реки Хасаут в Республике Кабардино-Балкария на участке Долина Нарзанов. Съемка выполнена 1 февраля 2015 г. 11:30 ч. с высоты 15 м. при температуре воздуха +2⁰С. Хорошо выделалась на фоне снега и проталин река с присущей для водных объектов теплоотдачей. Вода из минеральных источников отличалась температурой выше чем у водной массы реки (см. рис. 6).

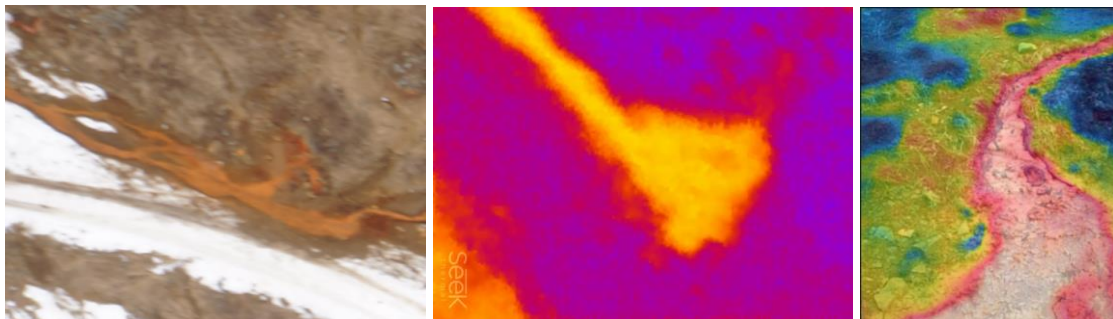


Рис. 6. Фрагменты участка Долины Нарзанов.

В начале марта произведена аэротеплосъемка пруда Московского зоопарка, для подсчета количества водоплавающей птицы. Высота полета составляла около 20 м. На этой высоте возможно съемка для обнаружения птиц, но видовое разделение крайне затруднительно. По видовому составу птицу такого размера возможно различать при съемке с высоты не более 10 м. Данные видеосъемки прошли процедуру обработки, создание мозаики и ее фильтрации в Erdas Imagine, для автоматического подсчета объектов (рис.7).

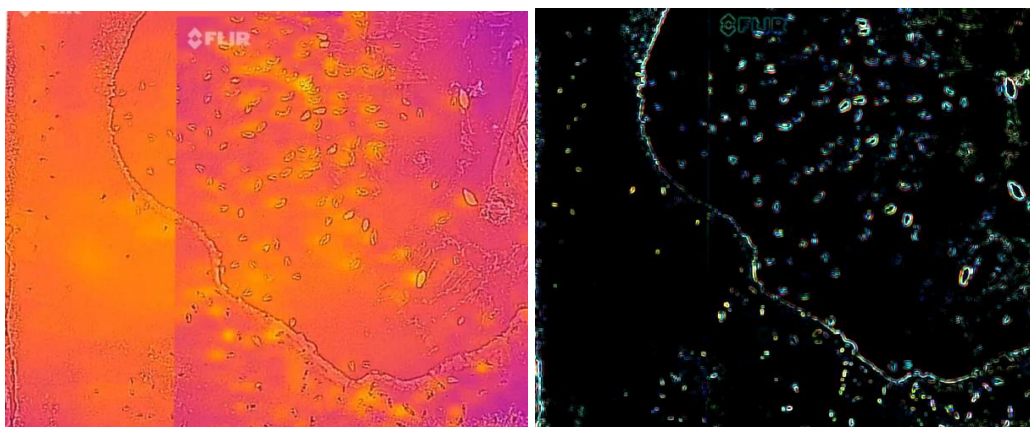


Рис. 7. Мозаика из тепловых снимков и результат автоматического выделения птиц.

Эксперименты позволяют сделать вывод о том, что тепловая съемка с БПЛА дает возможность получения пространственно-временных данных высокого разрешения, что говорит о географических исследованиях более качественного уровня. Тепловая съемка позволяет получить не только качественные, но и количественные данные (температуру объекта, либо разницу температур), что не может быть получено при спектральной съемке. Аэротеплосъемка с БПЛА является надежным источником при проведении наблюдений за суточным или сезонным ходом отдельных явлений природы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеенко Н., Медведев А., Карпенко И. Опыт использования беспилотных летательных аппаратов в биогеографических исследованиях на территории заповедника Белогорье // ИнтерКарто/ИнтерГИС-20: Устойчивое развитие территорий: картографо-геоинформационное обеспечение: мат-лы Международной конф., Белгород, Харьков (Украина), Кигали (Руанда) и Найроби (Кения), 23 июля – 8 августа 2014 г. – Белгород: Изд-во Константа, 2014. – С. 69–80.
2. Балдина Е. А., Грищенко М. Ю., Федоркова Ю. Использование космических снимков в ИК-диапазоне для географических исследований [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.geogr.msu.ru/cafedra/karta/materials/heat_img/start.htm.
3. Варфоломеев А. Ф., Коваленко Е. А., Манухов В. Ф. ГИС-технологии при изучении и оценке взаимосвязи пространственного распространения почвенного покрова и рельефа // Геодезия и картография. – 2013. – № 7. – С. 47–53.
4. Книжников Ю. Ф., Кравцова В. И., Тутубалина О. В. Аэрокосмические методы географических исследований. – М.: Академия, 2011. – 416 с.
5. Манухов В. Ф., Кислякова Н. А., Варфоломеев А. Ф. Информационные технологии в аэрокосмической подготовке выпускников географов-картографов // Педагогическая информатика. – 2013. – № 2. – С. 27–33.
6. Медведев А., Алексеенко Н., Карпенко И. Мониторинг животного мира на особо охраняемых природных территориях с помощью беспилотных летательных аппаратов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2015. – Т. 17. – № 6. – С. 304–309.
7. Armadale Index Page [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.armadale.org.uk/>.
8. Bani D. Rehkitzrettung: Einsatz eines UAV mit Thermalkamera zur Ortung von Wildtieren [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.geometh-data.ethz.ch/publicat/diploma/2011_Baeni/grundidee.html.
9. Hoffmann H. et al. Estimating evapotranspiration with thermal UAV data and two source energy balance models // Hydrology and Earth System Sciences Discussions. – 2015. – Vol. 12. – pp. 7469–7502.
10. Turner D. et al. Spatial Co-Registration of Ultra-High Resolution Visible, Multispectral and Thermal Images Acquired with a Micro-UAV over Antarctic Moss Beds // Remote Sens. MDPI AG. – 2014. – Vol. 6. – No. 5. – pp. 4003–40241.
11. Zarco-Tejada P. J., González-Dugo V., Berni J. A. J. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera // Remote Sensing of Environment. – 2012. – Vol. 117. – pp. 322–337.