

УДК 528.873.041.3

Е.А. Балдина<sup>1</sup>, М.Ю. Грищенко<sup>2</sup>**МЕТОДИКА ДЕШИФРИРОВАНИЯ РАЗНОВРЕМЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ В ТЕПЛОВОМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ<sup>3</sup>**

Космические снимки Земли в тепловом инфракрасном диапазоне относительно мало используются в географических исследованиях регионального охвата. Разработана методика дешифрирования разносезонных тепловых инфракрасных космических снимков для целей эколого-географического и ландшафтного картографирования на основе временного образа как дешифровочного признака. Исследование выполнено на примере двух территорий, для которых характерна значительная гетерогенность теплового поля, — части крупного города — промышленного центра и действующего вулкана. В качестве исходных материалов использованы разновременные снимки ТМ и ЕТМ+/Landsat (канал 10,4—12,5 мкм). Предложено два подхода к анализу снимков — выявление тепловых аномалий местности и выявление тепловой структуры местности. В результате получены карты, демонстрирующие результаты применения предлагаемой методики.

*Ключевые слова:* географическое дешифрирование, космические снимки, тепловой инфракрасный диапазон, разновременные снимки, Landsat.

**Введение.** Изображения Земли в тепловом инфракрасном диапазоне (тепловые инфракрасные снимки) — особый источник географической информации, поскольку передают относительные различия в интенсивности теплового излучения земных объектов, не воспринимаемые человеческим зрением. Наиболее существенно на интенсивность теплового излучения влияет температура поверхности, которая в значительной степени определяется собственным излучением объектов, обусловленным их способностью аккумулировать солнечную энергию, а также поступлением эндогенного тепла Земли или теплоотдачей работающих механизмов. Интенсивность излучения земных объектов определяется их физическими и химическими свойствами (цвет, влагосодержание, шероховатость поверхности и др.), особенностями биохимических процессов [16], на нее влияет состав горных пород или вид материалов (сооружения), тип почв, мощность растительного покрова, тепловое загрязнение. Тепловые изображения в значительно меньшей степени используются для дешифрирования объектов или их свойств, чем снимки Земли в других диапазонах спектра, в связи с чем представляется актуальной разработка методов извлечения именно географической информации из тепловых снимков.

**Постановка проблемы.** Съёмка из космоса в тепловом инфракрасном диапазоне (8—14 мкм) ведется с 1960 г., когда первые снимки такого типа были получены с космического аппарата TIROS-1. Уже в течение более 50 лет тепловые инфракрасные снимки используются для решения различных задач в науках

о Земле, в первую очередь в метеорологии [2, 15], океанологии [9, 10], тектонике [3, 4], при поиске полезных ископаемых [5, 11], вулканологии и сейсмологии [13], главным образом на уровне планеты в целом и ее крупнейших частей. В существенно меньшей степени развито использование тепловых инфракрасных космических снимков для изучения геосистем на уровне природных регионов, площадь которых не превышает 1 млн км<sup>2</sup>, т.е. на том масштабном уровне, где сосредоточена большая часть исследований географической науки [8, 14]. На этом масштабном уровне распространение получили исследования тепловых островов городов [1, 17—19], опирающиеся, как правило, на данные со спутников серии Landsat, а также Terra (аппаратура MODIS и ASTER).

**Материалы и методы исследований.** Цель исследований — выявить возможности и разработать методику дешифрирования свойств земных объектов на снимках в тепловом инфракрасном диапазоне, представить результаты в виде картографических материалов, полезных для ландшафтных и эколого-географических исследований. Для примера выбраны две территории, где тепловое излучение служит индикатором характерных процессов, — часть крупного города — промышленного центра (Нижний Новгород) и действующий вулкан (влк Головнина на о. Кунашир) с прилегающей территорией.

На снимках в тепловом инфракрасном диапазоне фиксируется яркостная температура объектов земной поверхности, которая зависит от излучательной способности тела и его температуры в момент съёмки.

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра картографии и геоинформатики, лаборатория аэрокосмических методов, вед. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: baldina@geogr.msu.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра картографии и геоинформатики, аспирант; *e-mail*: m.gri@geogr.msu.ru

<sup>3</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-05-41233).

Разделение этих двух компонент — сложная задача, которая решается математическими методами, как правило, с целью вычисления температуры поверхности. Используя только тепловое изображение, где уровнем яркости передается суммарная интенсивность теплового потока, можно, применяя приемы географического дешифрирования, по относительным контрастам выявить объекты и их свойства, которые формируют тепловое излучение разной интенсивности.

Учитывая сильную изменчивость теплового излучения, ее суточные и сезонные колебания, подверженность случайным изменениям, для выявления характерных теплоизлучательных свойств территории предложено использовать не один снимок, а несколько, что позволит избежать влияния случайных факторов [1]. Здесь применяется “многовременной снимок” [6] — совокупность динамического ряда сопоставимых снимков территории. Предполагается, что именно в случае анализа такой сильноизменчивой характеристики, как интенсивность теплового излучения, использование многовременного снимка, собранного из одномоментных, может быть особенно эффективным. Соединение отдельных снимков в многовременной позволяет поставить в соответствие каждой точке земной поверхности несколько значений яркости по числу исходных снимков. Этот ряд, характеризующий изменения яркости элемента изображения на всех снимках, которые составляют многовременной снимок, по аналогии со спектральным образом на многозональном снимке, назван временным образом [6]. Временной образ представляет смену состояний объекта, выраженную в изменении яркости его изображения. Его можно использовать как интегральный признак, который через информацию об изменении яркости объекта позволяет выявлять его свойства, проявляющиеся в этих изменениях.

При выборе разновременных снимков принимается во внимание, что интенсивность теплового излучения объектов, зависящая от прихода солнечной радиации, существенно меняется в течение суток, по сезонам, возможны и многолетние изменения. Суточные и сезонные изменения обладают выраженной цикличностью, в которой проявляются типичные тепловые свойства объектов. Поскольку повторная в течение одних суток тепловая инфракрасная съемка проводится только с очень низким пространственным разрешением, было решено использовать массив снимков, отражающий сезонную динамику интенсивности теплового излучения.

Важнейший этап изучения территории по тепловым инфракрасным снимкам — выбор подходящих снимков. Поскольку поток теплового излучения, регистрируемый на спутнике, существенно зависит от состояния атмосферы [12], необходимо использовать снимки без облаков, тумана и дымки. Второе важное условие — ряд снимков должен быть равномерным и охватывать все сезоны. Здесь следует отметить, что равномерность ряда снимков — понятие относитель-

ное, она может варьировать в зависимости от особенностей территории исследования. Выявлено, что в зимний период различия в интенсивности теплового излучения разных объектов как в городской среде, так и в природной весьма малы, поэтому число снимков для зимнего периода должно быть меньше, чем для летнего. Так, при исследовании районов с продолжительной зимой, например в Заполярье, общее число снимков в ряду будет меньше, чем при исследовании территории в умеренном поясе. Приходится также учитывать особенности смены сезонов и их продолжительность в разных регионах, поскольку снимки, полученные в период активной вегетации, более информативны при оценке теплового излучения растительного покрова.

В качестве основного материала для исследования подобрано 23 безоблачных снимка со спутника Landsat-7 (14 на южную часть Нижнего Новгорода и 9 на кальдере влк Головина), которые получены в период бесперебойной работы съемочной системы ETM+ с апреля 1999 г. по конец мая 2003 г., а также со спутника Landsat-5 (система TM). Использован тепловой инфракрасный канал с длиной волны 10,4—12,5 мкм, который соответствует максимуму интенсивности теплового излучения Земли. Эти снимки имеют наилучшее пространственное разрешение в тепловом инфракрасном диапазоне из имеющихся в открытом доступе — 60 и 120 м.

**Методика обработки снимков.** Предложены два подхода к анализу разновременных тепловых снимков — выявление устойчивых тепловых аномалий территории и дешифрирование тепловой структуры местности. Под *тепловой аномалией* здесь понимается отклонение интенсивности теплового излучения территории от фонового значения (в сторону как увеличения значений интенсивности теплового излучения, так и уменьшения), приуроченное к некоторому участку земной поверхности; под *тепловой структурой местности* — обусловленное неравномерностью теплового поля сочетание участков местности, характеризующихся разными типами сезонной динамики интенсивности теплового излучения.

Методика работы представлена на рис. 1. Первый этап — создание многовременных снимков — включает выбор подходящих изображений, их предварительную обработку и формирование многоканального снимка из разновременных. При этом отдельные снимки размещаются в порядке смены сезонов без учета года съемки исходя из того, что сезонные изменения интенсивности теплового излучения значительны, а многолетние изменения в пределах одного сезона выражены слабее. Дальнейшая методика работы зависит от цели исследования.

При выявлении *тепловых аномалий* второй этап состоит в создании синтезированных изображений — одного или нескольких вариантов синтеза разносезонных снимков, дающих наиболее контрастное изображение территории. Разным цветом здесь отображаются

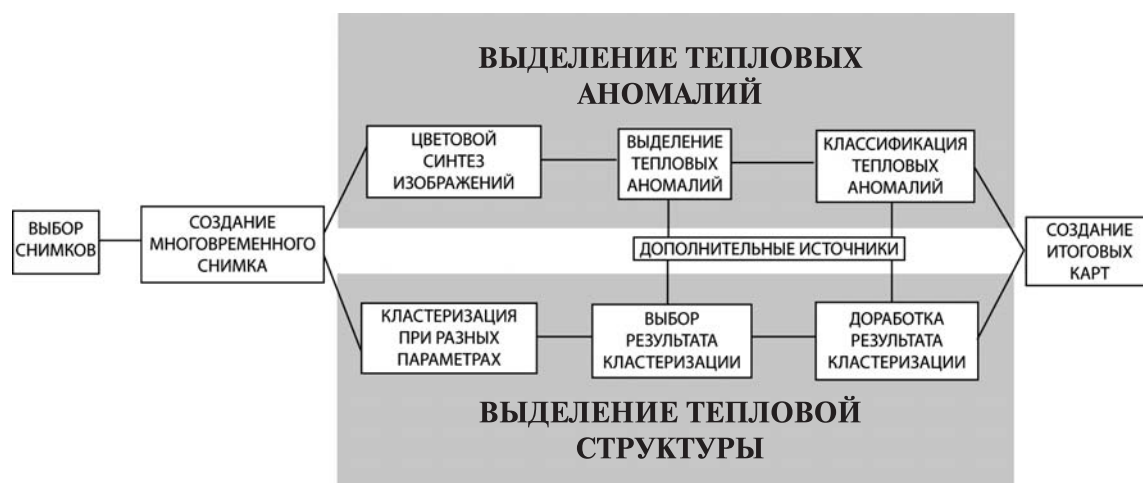


Рис. 1. Схема предлагаемой методики

объекты и участки местности, имеющие разную динамику излучения за период, заданный сроками получения используемых при синтезе снимков. Выявление тепловых аномалий на этих изображениях проводится визуально, для них строятся графики временных образов, на основе которых осуществляется классификация тепловых аномалий выделенных типов. Порядок расположения в легенде карты тепловых аномалий разных типов таков: сначала даются положительные тепловые аномалии, затем отрицательные, причем внутри этих подразделений сначала даются типы тепловых аномалий, сохраняющиеся в течение наибольшего количества времени в течение года, затем те, которые сохраняются в течение меньшего промежутка времени, и т.д.

При выявлении *тепловой структуры* на втором этапе проводится кластеризация многовременного снимка методом ISODATA при разных параметрах. Из полученных вариантов с разным числом кластеров выбирается один; к критериям качества результата кластеризации относятся низкая дробность контуров, возможность подтвердить выделение тех или иных однородных участков дополнительной информацией. На этом этапе привлекаются картографические и аэрокосмические источники, данные полевых обследований; при необходимости схема кластеризации корректируется, например, путем объединения отдельных кластеров. В нашем исследовании использованы все виды дополнительной информации, включая собственные материалы полевых обследований для обоих участков. Названия полученным тепловым “зонам” следует давать на основании наиболее репрезентативных черт сезонной динамики интенсивности их теплового излучения.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Полученные результаты применения предложенных подходов к дешифрированию тепловых свойств территорий рассмотрим отдельно для двух выбранных участков.

**Нижний Новгород (южная часть).** Река Ока разделяет выбранную территорию на две различающиеся

по природным условиям и особенностям использования части — возвышенное правобережье и низменное левобережье. Для правобережья характерны расчлененный рельеф, большая доля парковых и лесопарковых участков, малое число промышленных предприятий. Здесь присутствуют объекты, существенно отличающиеся по функциональному значению и теплоизлучательным свойствам: крупные по площади объекты рекреационного и природоохранного значения (например, крупнейший в городе лесопарк Щелоковский Хутор), значимые промышленные объекты (например, завод “Нител”), крупные жилые массивы многоэтажной (Щербинки, Мыза, район ул. Бекетова и др.) и малоэтажной (Дубенки, Сахарный Дол и др.) застройки. Кроме того, на выбранный фрагмент попадают пригородные безлесные земли (луга и поля), массивы садовых участков, небольшие населенные пункты.

Для левобережья, напротив, характерен равнинный рельеф (большая часть территории — укрепленные участки пойм Волги и Оки). Здесь находятся все крупнейшие промышленные предприятия города (в том числе ОАО “ГАЗ”, ОАО “РУМО”, завод штампов и прессформ (ЗШП) и др.), характерна высокая плотность жилой застройки — многоэтажные районы (Северный, Мончегорский, Соцгород-I, -II и др.) и малоэтажные районы (Гвоздильный, Парижской Коммуны и др.). Присутствуют небольшие объекты рекреационного назначения (Автозаводский ПКиО, парк Дубки и др.).

При выявлении тепловой структуры города на его территории выделено 7 типов структуры — “зон” (рис. 2, А). Каждому типу дано условное название, которое отражает уровень и характер динамики интенсивности теплового излучения объектов данного типа (“зоны”).

Картографические результаты дешифрирования тепловых аномалий (рис. 2, Б) представлены следующим образом. На фоновой территории выделены тепловые аномалии, проявляющиеся в разные сезоны

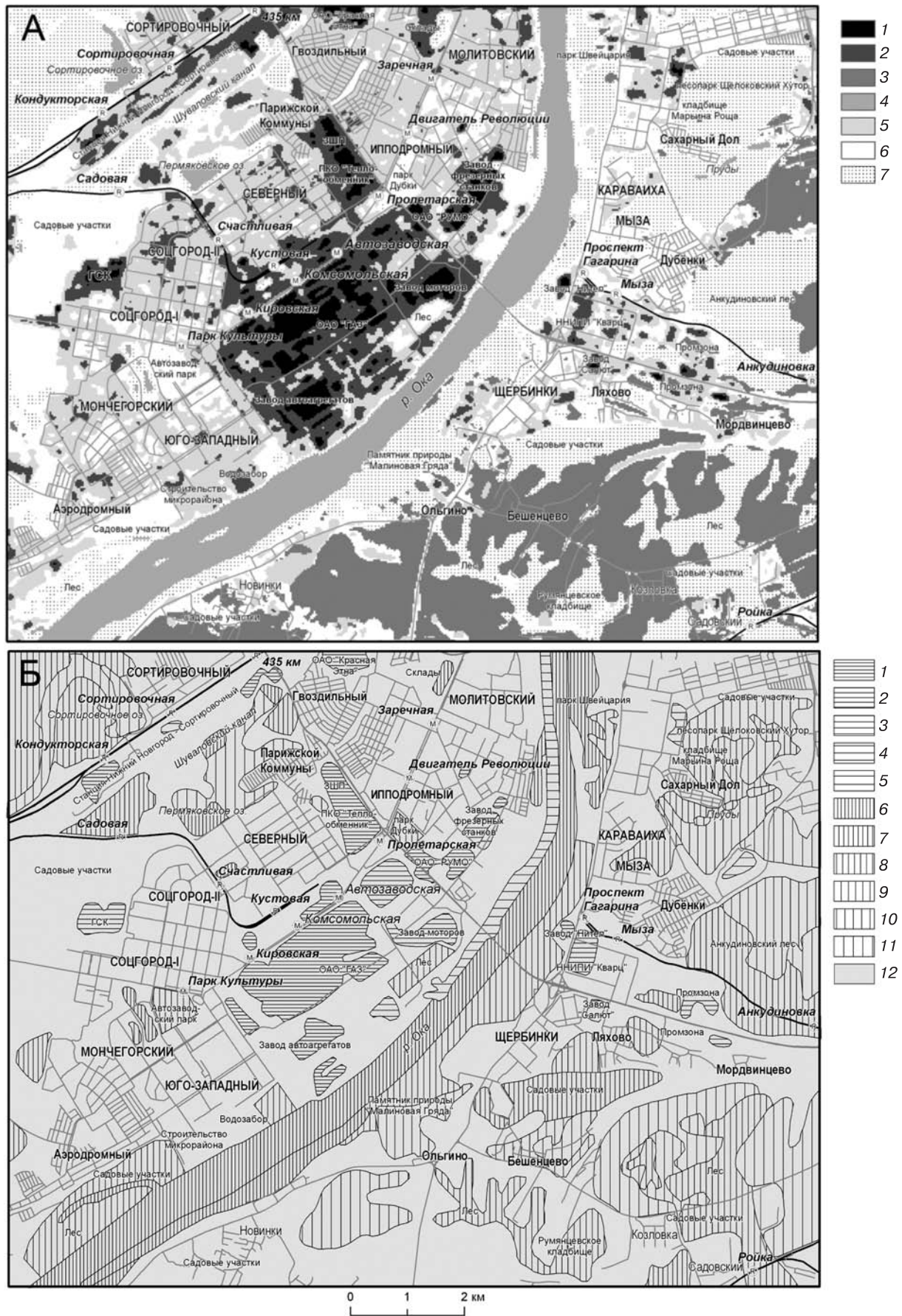


Рис. 2. Результаты дешифрирования тепловых снимков южной части Нижнего Новгорода: А — карта тепловой структуры (названия зон даны на основании наиболее репрезентативных черт сезонной динамики интенсивности их теплового излучения): 1 — зоны экстре-

года, приведена их классификация по пространственно-временному признаку. Все тепловые аномалии разделены на положительные (интенсивность теплового излучения выше фона) и отрицательные (интенсивность теплового излучения ниже фона).

**Кальдера влк Головнина.** Вулкан Головнина находится на о. Кунашир, это самый южный действующий вулкан Курильских островов. Он представляет собой кальдеру, занятую двумя озерами — Горячим и Кипящим, которые соединены каналом. Диаметр кальдеры 4—4,5 км, перепад высот в ее пределах составляет 474 м (от вершины г. Головнина, 541 м над у. м., до отметки дна оз. Горячее — 67 м). Днище кальдеры плавно спускается к урезу оз. Горячее, в центре находятся два экструзивных купола с максимальной высотой 276 м, служащие естественным водоразделом озер. Размеры оз. Горячее — 2,5×1 км, глубина более 60 м, оз. Кипящее — 200×300 м, глубина 16 м. Вода в обоих озерах отличается кислой реакцией и богата сульфатными соединениями. По берегам озер присутствует множество сольфатар и горячих источников. Вода в оз. Кипящее имеет повышенную температуру (около 30 °С в течение всего года) и никогда не замерзает; вода в оз. Горячее — около 18 °С в теплую часть года, а в холодное время года значительная часть акватории озера покрыта льдом [7]. Растительный покров кальдеры весьма разнообразен для такой небольшой территории и представлен сообществами бамбучника с редколесьем из ели Глена, лесами из ели Глена, зарослями кедрового стланика (главным образом в центральной части кальдеры), широколиственными лесами (в западной части кальдеры), смешанными хвойно-широколиственными лесами (северная часть кальдеры). Участки вокруг фумарол и серных источников практически лишены растительности. Кальдера влк Головнина находится на территории Курильского заповедника и является объектом охраны федерального значения.

Обработка многовременного снимка кальдеры влк Головнина методом кластеризации позволила выделить 5 типов тепловой структуры (“зон”) (рис. 3, А). Принцип классификации тепловых аномалий аналогичен реализованному при дешифрировании тепловых аномалий в южной части Нижнего Новгорода — выделены положительные и отрицательные тепловые аномалии, проявляющиеся в разные сезоны (рис. 3, Б).

Результаты дешифрирования представляют собой визуализацию структурных составляющих теплового поля территории с выделением конкретных объектов,

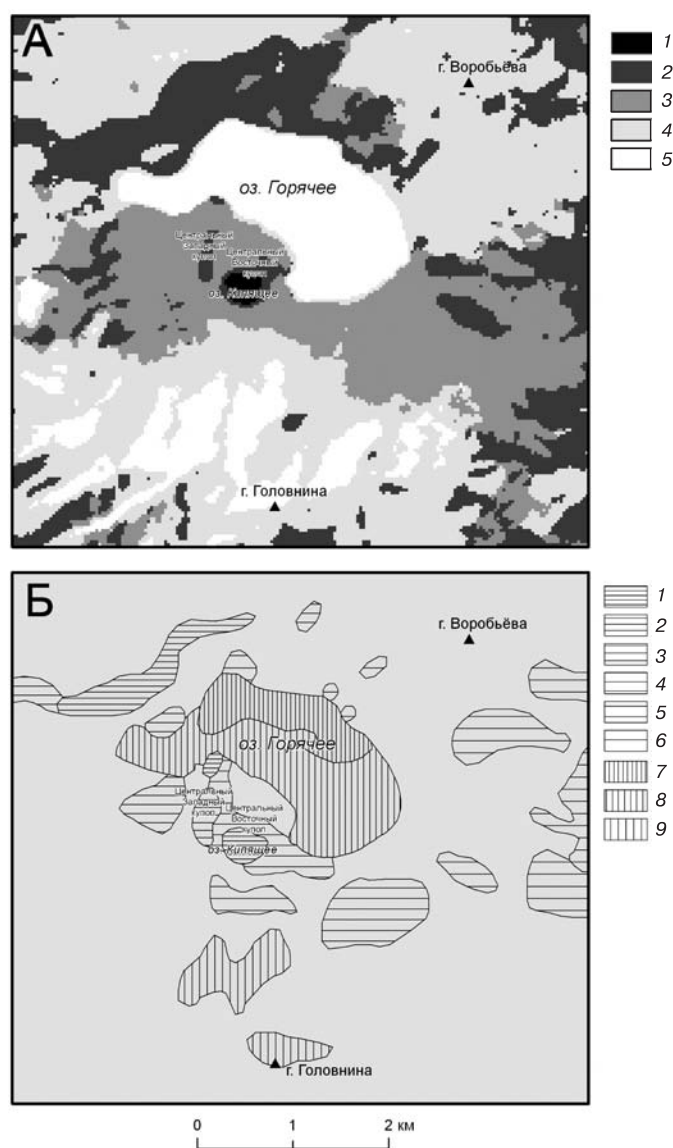


Рис. 3. Результаты дешифрирования тепловых снимков кальдеры вулкана Головнина: А — карта тепловой структуры (названия зон даны на основании наиболее репрезентативных черт сезонной динамики интенсивности их теплового излучения): 1 — зоны экстремально высокой интенсивности теплового излучения, 2 — зоны повышенной интенсивности теплового излучения, 3 — зоны повышенной интенсивности теплового излучения со значительными сезонными амплитудами, 4 — зоны пониженной интенсивности теплового излучения, 5 — зоны низкой интенсивности теплового излучения. Б — карта тепловых аномалий (порядок расположения тепловых аномалий разных типов приведен по преобладающему сезону и продолжительности времени их выраженности): положительные: 1 — постоянно выраженные, 2 — выраженные весь год (кроме зимы), 3 — выраженные весь год (кроме зимы), 4 — выраженные весной и осенью, 5 — выраженные осенью, 6 — выраженные весной; отрицательные: 7 — постоянно выраженные, 8 — выраженные весь год (кроме зимы), 9 — выраженные осенью

← мало высокой интенсивности теплового излучения, 2 — зоны очень высокой интенсивности теплового излучения, 3 — зоны высокой интенсивности теплового излучения, 4 — зоны средней интенсивности теплового излучения со значительными сезонными амплитудами, 5 — зоны средней интенсивности теплового излучения с уменьшенными сезонными амплитудами, 6 — зоны пониженной интенсивности теплового излучения, 7 — зоны повышенной интенсивности теплового излучения в холодный период и пониженной — в теплый. Б — карта тепловых аномалий (порядок расположения тепловых аномалий разных типов приведен по преобладающему сезону и продолжительности времени их выраженности): положительные: 1 — постоянно выраженные, 2 — выраженные весь год (кроме зимы), 3 — выраженные зимой и весной, 4 — выраженные весной и осенью, 5 — выраженные зимой; отрицательные: 6 — постоянно выраженные, 7 — выраженные весь год (кроме зимы), 8 — выраженные летом и осенью, 9 — выраженные осенью, 10 — выраженные весной, 11 — выраженные зимой, 12 — фоновые территории

связанных с тепловыми аномалиями, и разделением всей территории по принципу схожести сезонной динамики интенсивности теплового излучения (тепловая структура).

Рассмотрим применение двух подходов к обработке разновременных тепловых снимков на антропогенно преобразованную и природную территории.

Анализ тепловой структуры *южной части Нижнего Новгорода* на основе анализа снимков сверхвысокого разрешения и картографических материалов позволяет выявить ее следующие особенности (рис. 2, А). Зоны экстремально высокой интенсивности теплового излучения соответствуют сильно нагревающимся за счет производственного процесса и солнечного излучения корпусам крупных промышленных предприятий. Зоны очень высокой интенсивности теплового излучения отвечают территориям промышленных и коммунально-складских предприятий. Эти объекты и территории наиболее сильно выделяются по теплоизлучательным характеристикам. Отметим существенную дифференциацию объектов по выделенным зонам в зависимости от их расположения в правобережной или левобережной частях города. Так, зоне средней интенсивности со значительными сезонными амплитудами теплового излучения на левобережье соответствуют территории садовых участков, парков в черте города и территории с луговым ландшафтом, в то время как на правобережье это в основном жилые кварталы с не очень высокой плотностью застройки, что свидетельствует о том, что на правобережье растительность и рельеф существенно больше влияют на дифференциацию интенсивности теплового излучения, чем на левобережье.

*Тепловые аномалии* в южной части Нижнего Новгорода подчинены следующим закономерностям (рис. 2, Б). Постоянно выраженные положительные тепловые аномалии сосредоточены на левом берегу и соответствуют крупным промышленным объектам. Положительные тепловые аномалии, выраженные в течение всего года (кроме зимы), распределены равномернее и в основном соответствуют менее крупным промышленным предприятиям, а также крупным гаражным кооперативам. Эта информация может быть полезна не только при выделении границ промышленных зон и предприятий, сильнее всего воздействующих на окружающую среду, но и для определения интенсивности этого воздействия. Положительные тепловые аномалии, выраженные зимой, обусловлены в первую очередь сбросом из очистных сооружений завода «ГАЗ» в Оку и его шлейфом. Следовательно, по наличию таких тепловых аномалий можно обнаружить тепловое загрязнение водных объектов. Поскольку тепловое загрязнение часто сопутствует загрязнению других видов, то такие тепловые аномалии могут служить индикаторами загрязнения водных объектов в целом.

При анализе результатов дешифрирования тепловой структуры *кальдеры влк Головнина* выделены следующие закономерности (рис. 3, А). Зона экстре-

мально высокой интенсивности теплового излучения соответствует акватории оз. Кипящее, наиболее сильно выделяющейся из окружающего ландшафта. Зоны с повышенной интенсивностью теплового излучения — это склоны южной экспозиции и лишенные растительности участки земной поверхности вблизи сольфатарных полей. Зоны с повышенной интенсивностью теплового излучения и его значительными сезонными амплитудами в целом соответствуют территориям, занятым преимущественно бамбучником, без густой лесной растительности. Зоны с пониженной интенсивностью теплового излучения соответствуют зеленым склонам кальдеры. Зоны с низкой интенсивностью теплового излучения — затененные части склонов и акватория оз. Горячее. Таким образом, по данным о пространственно-временной изменчивости интенсивности теплового излучения земной поверхности выявлена достаточно четкая дифференциация ландшафтов кальдеры.

Результаты дешифрирования *тепловых аномалий* кальдеры влк Головнина обнаруживают следующие закономерности их пространственно-временного распределения (рис. 3, Б). Постоянные положительные тепловые аномалии соответствуют поверхности оз. Кипящее и Центральному Западному сольфатарному полю кальдеры — участкам с наиболее активными проявлениями вулканической активности. Кроме того, как значимые положительные тепловые аномалии выделяются другие участки кальдеры — склон юго-восточной экспозиции на северо-западном краю кальдеры, юго-западный склон Центрального Западного купола, участки без лесной растительности и небольшие сольфатарные поля. Отрицательные тепловые аномалии дифференцируются следующим образом: постоянно выражена аномалия, связанная с участком акватории оз. Горячее, под которым отсутствуют горячие источники; осенью отрицательные тепловые аномалии соответствуют затененным участкам склонов.

Исходя из полученных закономерностей можно судить об особенностях формирования теплового поля территории и факторах, влияющих на его структуру.

#### **Выводы:**

— использование разновременных тепловых инфракрасных снимков позволяет выявить характерные особенности территории, проявляющиеся в ее тепловой структуре, локализовать основные тепловые аномалии, обнаружить участки, отличающиеся по особенностям пространственно-временной динамики интенсивности теплового излучения;

— предложенные подходы к обработке разносезонных тепловых инфракрасных снимков дополняют друг друга. Дешифрирование тепловых аномалий позволяет выявить локальные участки, играющие ведущую роль в формировании теплового поля территории, в то время как с помощью дешифрирования тепловой структуры можно установить дифференциацию природно-территориальных комплексов на основе пространственно-временной динамики интенсивности теплового излучения территории;

— созданные в результате дешифрирования тепловых снимков карты имеют разное назначение. Во-первых, карты *тепловых аномалий* местности ценны для эколого-географических исследований. Они наглядно показывают распределение источников повышенной интенсивности теплового излучения, с их помощью можно выявить места теплового антропогенного загрязнения, в свою очередь связанного с загрязнением других типов. Карты тепловых аномалий можно применять при планировании исследований, в том числе полевых. Особое значение такие карты имеют при изучении городских территорий. Положительные тепловые аномалии на территории города вносят вклад в формирование теплового острова, отрицательные тепловые аномалии, наоборот, дают смягчающий эффект. Полученные карты можно использовать в градостроительном и городском планировании, так как они позволяют оценить эффект, который дает определенное взаиморасположение объектов разного функционального значения (например, промышленных зон, жилых районов и парков). Во-вторых, карты *тепловой структуры* местности могут быть полезны для

ландшафтных исследований. На них отображается пространственно-временная динамика интенсивности теплового излучения местности. Такие карты позволяют выделить участки местности, однородные по сезонной динамике интенсивности теплового излучения, что важно для картографирования структурных единиц ландшафтов. Выявленная тепловая структура может стать основой, например, при уточнении границ в ландшафтных, геохимических, геоботанических исследованиях, а также при изучении антропогенного влияния на ландшафты;

— полученные карты двух типов — ценные дополнительные источники информации при ландшафтных и экологических исследованиях, позволяющие получить новые данные об изучаемой местности и выявить закономерности, которые остаются скрытыми на картах, составленных по снимкам в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. На основе предложенных методик ведется разработка карт эколого-географической и ландшафтной тематики на новоприсоединенные территории Москвы по проекту, поддержанному грантом РФФИ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балдина Е.А., Грищенко М.Ю. Исследование “теплового острова” Москвы по разносезонным снимкам Landsat-7/ETM+ // Геоинформатика. 2011. № 3. С. 62—70.
2. Бухаров М.В., Соловьев В.И. Мониторинг осадков осеннего периода по измерениям уходящего теплового излучения Земли со спутника NOAA // Исследования Земли из космоса. 2004. № 5. С. 51—57.
3. Вилор Н.В., Абушенко Н.А., Тащилин С.А. Инфракрасное излучение в зонах спрединга и рифтогенеза (на примере Афарской депрессии, Северо-Восточная Африка) // Исследования Земли из космоса. 2006. № 3. С. 76—82.
4. Глушкова Н.В., Баландис В.А. Опыт использования многозональных космоснимков ASTER на примере Уронайского рудного узла // Исследования Земли из космоса. 2005. № 2. С. 61—66.
5. Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И. Тепловая аэрокосмическая съемка. М.: Недра, 1993. 128 с.
6. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И. Аэрокосмические исследования динамики географических явлений. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 206 с.
7. Козлов Д.Н., Жарков Р.В. Новые данные по морфологии внутрикальдерных озер островов Кунашир и Симушир // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. Вып. 14, № 2. С. 30—35.
8. Коновалова Т.И., Трофимова И.Е. Картографирование экологического состояния урбанизированных территорий на основе материалов дистанционных исследований Земли // Исследования Земли из космоса. 2008. № 4. С. 36—44.
9. Никитин А.А. Основные черты пространственного распределения поверхностных термических фронтов в водах Японского моря и их изменчивость // Исследования Земли из космоса. 2006. № 5. С. 49—62.
10. Новиненко Е.Г., Шевченко Г.В. Пространственно-временная изменчивость температуры поверхности Охотского моря по спутниковым данным // Исследования Земли из космоса. 2007. № 5. С. 50—60.
11. Погребнов Н.Н., Фролов В.Н. Возможности дистанционной индикации геотермического поля угольных месторождений // Исследования Земли из космоса. 2005. № 6. С. 56—60.
12. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б. Температурно-влажностное зондирование атмосферы по данным спутникового ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения ИКФС-2 // Исследования Земли из космоса. 2009. № 5. С. 3—10.
13. Тронин А.А. Возможности применения космической тепловой съемки для исследования землетрясений // Исследования Земли из космоса. 2005. № 4. С. 86—89.
14. Трофимова И.Е., Коновалова Т.И., Бессолицына Е.П. Экспериментальные исследования аэродистанционными методами теплового состояния геосистем // География и природные ресурсы. 1998. № 1. С. 22—26.
15. Успенский А.Б. Современное состояние и перспективы дистанционного температурно-влажностного зондирования атмосферы // Исследования Земли из космоса. 2010. № 2. С. 26—35.
16. Jensen J. Remote sensing of the environment and Earth resource perspective. University of South Carolina, 2000.
17. Voogt J.A., Oke T.R. Thermal remote sensing of urban climates // Remote Sensing of Environment. 2003. Vol. 86. P. 370—384.
18. Weng Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2009. Vol. 64. P. 335—344.
19. Weng Q., Quattrochi D.A. Thermal remote sensing of urban areas: An introduction to the special issue // Remote Sensing of Environment. 2006. Vol. 104. P. 119—122.

**E.A. Baldina, M.Yu. Grishchenko**

**INTERPRETATION OF MULTI-TEMPORAL SPACE IMAGERY  
IN THERMAL INFRARED BAND**

Space imagery in thermal infrared band is relatively underemployed for geographical regional studies. A technique of interpretation of multi-seasonal thermal infrared images for ecological-geographical and landscape mapping based on a temporal image as an interpretation indicator was elaborated. The study was carried out for two territories with non-uniform thermal fields, i.e. a part of a large city (its industrial center) and an active volcano, using multi-temporal TM and ETM+/Landsat imagery (10.4–12.5  $\mu\text{m}$  channel). Two approaches to imagery analysis are suggested, i.e. identification of thermal anomalies and revealing the thermal structure of a territory. The resulting maps demonstrate the application of suggested technique.

*Key words:* geographical interpretation, space imagery, thermal infrared band, multi-temporal Landsat imagery.