

7. Драгун, В. С. Промышленный потенциал и инновационная активность предприятий Республики Беларусь (региональный аспект) / В. С. Драгун, Д. И. Алехин, А. Л. Стефанин // Новости науки и технологий. – 2008. – № 1. – С. 22–30.

8. Червяков, А.В. «Зеленая» экономика – новая концепция устойчивого развития / А.В. Червяков, И.А. Грибоедова // Экон. бюл. Науч.-исслед. экон. ин-та М-ва экономики Респ. Беларусь. – 2012. – № 4. – С. 6–13.

9. Хамчуков, Д.Ю. «Зеленый» сектор в экономике / Д.Ю. Хамчуков // Стратегия устойчивого развития Беларуси: экологический аспект / Е.А. Антипова [и др.]. – Минск, 2014. – С. 12–25.

10. Галай, Е.И. Промышленное загрязнение атмосферного воздуха Минской области выбросами углекислого газа / Е.И. Галай // Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата : материалы Междунар. науч. конф., Минск, 5–8 мая 2015 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: П. С. Лопух (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 306–307.

11. О состоянии и перспективах развития науки в Республике Беларусь по итогам 2008 года : аналит. докл. / В.И. Недилько [и др.] ; Гос. ком. по науке и технологиям Респ. Беларусь, НАН Беларуси ; под общ. ред. И. В. Войтова, М. В. Мясниковича. – Минск : БелИСА, 2009. – 184 с.

12. О состоянии и перспективах развития науки в Республике Беларусь по итогам 2006 года : аналит. докл. / А.Н. Коршунов [и др.] ; Гос. ком. по науке и технологиям Респ. Беларусь ; под общ. ред. В. Е. Матюшкова, В. И. Недилько, М. В. Мясниковича. – Минск : БелИСА, 2007. – 315 с.

13. О состоянии и перспективах развития науки в Республике Беларусь по итогам 2007 года : аналит. докл. / В.И. Недилько [и др.] ; Гос. ком. по науке и технологиям Респ. Беларусь ; под общ. ред. В. Е. Матюшкова, М. В. Мясниковича. – Минск : БелИСА, 2008. – 307 с.

УДК 528.873.041.3

ДЕШИФРИРОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ТЕПЛОВЫМ КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ С РЕСУРСНЫХ СПУТНИКОВ

Грищенко М.Ю.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет; Москва, Россия; m.gri@geogr.msu.ru

The paper deals with the revealing various natural and man-made objects on thermal satellite images. We examined four groups of objects characterized by the formation of the expressed positive thermal anomalies on the thermal images: urban areas, nuclear power plants, solid waste landfills, areas with postvolcanic activity. For each group of objects the thermal field differentiation features were revealed.

Введение

Тепловые снимки являются особым источником информации о географических объектах - на них находит отображение пространственно-временная дифференциация собственного излучения объектов земной поверхности. Эта дифференциация связана с различиями в свойствах этих объектов, что определяет возможность их дешифрирования. Следует отметить, что одиночный тепловой снимок отражает состояние динамического теплового поля только в

один момент времени; использование серии разновременных тепловых снимков позволяет повысить информативность их дешифрирования. Выявлено, что для территорий, расположенных в умеренных широтах, наиболее эффективным является использование серии разносезонных снимков, отражающих сезонную изменчивость интенсивности теплового излучения. В таком случае дешифровочным признаком объектов земной поверхности будет выступать временной образ - совокупность значений интенсивности теплового излучения на разных снимках [4].

Исходные данные

В качестве исходных данных в нашей работе были использованы тепловые космические снимки съёмочных систем TM, ETM+ и TIRS (спутники Landsat 5, Landsat 7 и Landsat 8 соответственно). Эти снимки зарегистрированы в спектральном диапазоне 10-12 мкм, в котором излучает большинство объектов земной поверхности. Такие снимки характеризуются пространственным разрешением 60 м (ETM+), 100 м (TIRS) и 120 м (TM), пространственный охват - 185 км. Такие параметры позволяют охарактеризовать эти снимки как наиболее пригодные для исследований на региональном уровне.

Методика

Автором предложено два подхода к анализу разновременных тепловых снимков: выявление устойчивых тепловых аномалий территории и дешифрирование тепловой структуры местности. Под тепловой аномалией здесь понимается отклонение от среднестатистического значения интенсивности теплового излучения на тепловом снимке (как в сторону увеличения значений интенсивности теплового излучения, так и в сторону их уменьшения), приуроченное к некоторому участку земной поверхности; под тепловой структурой местности – полученное по результатам обработки многовременного разносезонного теплового снимка пространственное распределение участков со сходным характером сезонной динамики теплового излучения.

Первый этап методики – поиск и отбор разносезонных снимков. От репрезентативности выбранных снимков зависит качество результатов дешифрирования. На основе проведенных экспериментов выделены и обоснованы следующие критерии отбора тепловых космических снимков для формирования многовременного снимка.

1. Пространственное разрешение исходных тепловых космических снимков должно быть максимально возможно высоким, чтобы выявлять геосистемы наиболее низкого иерархического уровня.

2. Обязательно отсутствие на снимках тумана, дымки, облачности верхних и нижних ярусов.

3. Спектральный диапазон выбираемых снимков должен находиться в пределах 10-12 мкм (зона максимума теплового излучения Земли).

4. Необходимо обеспечение сопоставимости снимков: геометрической (по пространственному разрешению), радиометрической (по радиометрическому разрешению), спектральной (по спектральному диапазону), временной (по времени регистрации). Следовательно, необходимо использовать снимки одной съёмочной системы или съёмочных систем с одинаковыми параметрами.

5. Существенно как можно более полное отображение набором тепловых космических снимков сезонных изменений изучаемой местности, т.е. количество разносезонных снимков и их распределение по сезонам зависит от географических характеристик исследуемой территории.

Второй этап методики – создание многовременных снимков – включает предварительную обработку подходящих снимков 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.

Далее методика работы зависит от цели исследования. При выявлении тепловых аномалий третий этап состоит в создании синтезированных изображений: одного или нескольких вариантов синтеза разносезонных снимков, дающих наиболее контрастное изображение территории. Различными цветами здесь отображаются объекты и участки местности, имеющие различный характер динамики излучения за период, заданный сроками используемых при синтезе снимков. Выявление тепловых аномалий на этих изображениях проводится визуально. На четвертом этапе для всех выявленных тепловых аномалий строятся графики временных образов, на основе которых осуществляется классификация тепловых аномалий по виду графика. Итог работы – карта тепловых аномалий изучаемой местности.

При выявлении тепловой структуры на третьем этапе проводится кластеризация многовременного снимка методом ISODATA при разных параметрах. На четвертом этапе из полученных вариантов с разным количеством кластеров выбирается один. Критериями качества результата кластеризации являются низкая дробность контуров, возможность подтвердить выделение тех или иных однородных участков дополнительной информацией. Максимально возможным числом кластеров при обработке многовременного теплового снимка является такое, на котором все кластеры могут быть соотнесены с геосистемами, а при большем количестве кластеров такое соотношение установить невозможно. Определение оптимального числа кластеров зависит от особенностей местности и задачи исследования, поэтому при составлении карт тепловой структуры необходимы другие карты, космические снимки в других спектральных диапазонах и более высокого пространственного разрешения, текстовые описания, результаты полевых обследований и др. Пятый этап – построение графиков временных образов выделенных кластеров, соответствующих элементам тепловой структуры, и их классификация. Названия полученным элементам тепловой структуры даются на основании характерных особенностей сезонной динамики интенсивности их теплового излучения, выявленным по временным образам. Итогом работы является карта тепловой структуры территории.

Результаты

Все полученные в ходе работы результаты обработки снимков можно условно разделить на 4 группы: анализ городских территорий разного размера; анализ теплового воздействия на окружающие объекты атомных электростанций (АЭС); анализ интенсивности теплового излучения полигонов твердых бытовых отходов (ПТБО); анализ пространственно-временной дифференциации интенсивности теплового излучения природных объектов в районах проявления поствулканической активности.

1. Городские территории

Проанализированы следующие городские территории: г. Москва, г. Нижний Новгород, г. Воронеж, г. Ярославль, г. Махачкала, г. Астрахань, г. Кисловодск, г. Алексеевка Белгородской обл., г. Мантурово Костромской обл., г. Шарья Ко-

стромской обл., г. Суджа Курской обл., г. Суворов Тульской обл., пос. Дубна Тульской обл [2, 3]. Все снимки обработаны следующим образом: проведена кластеризация методом ISODATA на 5 или 7 классов при пороге сходимости 98%. Приведём примеры описаний результатов дешифрирования для некоторых городов.

а) Город Ярославль. Снимок получен 28 января 2014 года. По результатам обработки чётко выделяется городская застройка, а также крупные промышленные предприятия. Вне городской черты объекты дифференцировать сложно.

б) Город Суворов Тульской области. Снимок получен 31 января 2014 года. В качестве чётко выраженной положительной тепловой аномалии выделяется восточная часть Черепетского водохранилища. Положительные тепловые аномалии меньшей интенсивности связаны с Черепетской ГРЭС им. Д.Г. Жимерина и её прудом-остойником. Пониженной интенсивностью теплового излучения отличаются безлесные участки.

в) Город Алексеевка Белгородской области. Снимок получен 26 января 2014 года. Чётко выделяются лесные массивы, а также городская застройка, для которой характерна повышенная интенсивность теплового излучения. Большое влияние на распределение интенсивности теплового излучения оказывает рельеф - днища долин водотоков характеризуются пониженной интенсивностью теплового излучения.

г) Город Мантурово Костромской области. Снимок получен 27 декабря 2013 года. Наибольшие различия в интенсивности теплового излучения зафиксированы между лесом (повышенное тепловое излучение) и безлесными пространствами (пониженное тепловое излучение). Интенсивность теплового излучения акватории реки Унжа в целом находится между этими двумя типами территории. На фоне лесной растительности пониженной интенсивностью теплового излучения выделяются просеки под ЛЭП и железную дорогу.

д) Пос. Дубна Тульской области. Снимок получен 31 января 2014 года. Ведущую роль в пространственной дифференциации интенсивности теплового излучения играют залесённость и рельеф. Наиболее интенсивно излучающие объекты здесь - лесные массивы, наименее интенсивно излучающие - днища долин. Населённые пункты здесь не дешифрируются.

В итоге выявлено, что, во-первых, определяющее значение для формирования тепловых аномалий, связанных с городскими территориями (поверхностных островов тепла городов) имеет размер города. Во-вторых, наличие большого количества активно функционирующих промышленных предприятий на городской территории оказывает наиболее сильное влияние на пространственно-временную дифференциацию теплового поля и формирование поверхностного острова тепла. Это связано с тем, что промышленные предприятия, за счет выделения большого количества промышленного тепла в процессе работы, в сочетании с нагревом прямой солнечной радиацией, характеризуются повышенной интенсивностью теплового излучения и формируют мощные положительные тепловые аномалии. Плотность застройки также сильно влияет на формирование острова тепла. Городские территории, не обладающие крупным промышленным производством и высокой плотностью застройки, выраженных поверхностных островов тепла не формируют. Главным фактором в распределении интенсивности теплового излучения на местности в таких случаях является географическое макро- и мезоположение городской территории.

2. Атомные электростанции (АЭС)

Тепловое воздействие атомных электростанций на окружающие объекты анализировалось по тепловым космическим снимкам, полученным в зимний период. Снимки обработаны так же, как и при изучении городских территорий. Проанализированы следующие АЭС: Ленинградская, Кольская, Балаковская, Билибинская, Ростовская, Калининская, Белоярская, Курская, Нововоронежская, Смоленская. Очень крупные тепловые аномалии связаны с прудами-охладителями и шлейфами сброса вод; такое явление характерно абсолютно для всех проанализированных электростанций. Кроме того, для некоторых АЭС характерно также формирование тепловых аномалий, связанных с производственными корпусами. К таким относятся Ленинградская, Ростовская, Калининская, Белоярская, Курская, Нововоронежская АЭС. Пространственная дифференциация теплового поля территорий, прилегающих к электростанциям, зависит от географических особенностей этих территорий: при наличии относительно крупных городов (Ленинградская, Ростовская, Балаковская АЭС) заметна дифференциация теплового поля в зависимости от городской застройки; заметный вклад в дифференциацию вносят сельскохозяйственные угодья (Балаковская, Ростовская АЭС); различной интенсивностью теплового излучения характеризуется растительность различных типов, в первую очередь, различаются леса и безлесные территории (Ленинградская, Курская, Смоленская АЭС); для территорий со значительным разнообразием рельефа его влияние может быть очень велико (Нововоронежская АЭС и, особенно, - Билибинская АЭС).

3. Полигоны твёрдых бытовых отходов

Определяющим фактором при дешифрировании полигонов ТБО по тепловым космическим снимкам является площадь этих полигонов, которая, в целом, коррелирует с размером населённых пунктов, отходы которых туда свозятся. ПТБО различных населённых пунктов в разных частях европейской территории России анализировались по тепловым снимкам, полученным в весенний период. Среди всех проанализированных ПТБО наиболее контрастную по отношению к окружающему ландшафту тепловую аномалию создаёт полигон "Икша" в Дмитровском районе Московской области, куда свозят отходы из Москвы. ПТБО в таких городах, как Архангельск, Рязань и Тверь также создают мощные положительные тепловые аномалии, однако их интенсивность не превышает интенсивности тепловых аномалий, создающихся промышленными зонами городов. Для менее крупных населённых пунктов ПТБО по тепловым космическим снимкам дешифрировать проблематично. Так, ПТБО г. Судогда Владимирской обл. по яркости на тепловых снимках не отличается от расположенных недалеко садовых участков. ПТБО г. Белёв Тульской обл. характеризуется повышенной яркостью на тепловых снимках относительно окружающих ландшафтов, однако промышленные объекты гораздо более "тёплые". Полигон ТБО г. Одоев Тульской обл. практически не выделяется. Основную роль в дифференциации теплового поля в данном случае играет рельеф: наиболее тёплые объекты - склоны южной экспозиции. Полигон ТБО пос. Соловецкий Приморского района Архангельской области совсем не дешифрируется по тепловым космическим снимкам из-за своих небольших размеров (максимальный диаметр - 155 м).

4. Проявления поствулканической активности

В рамках настоящей работы проанализированы три группы проявлений поствулканической активности: вулкан Головнина (остров Кунашир, Сахалинская обл.); грязевой вулкан Шуго (Крымский район Краснодарского края); Долина нарзанов (Зольский район Кабардино-Балкарской республики). Наиболее сильно проявления поствулканической активности оказывают влияние на ландшафты в случае вулкана Головнина, являющегося действующим. Сольфатарные поля и кратерное озеро Кипящее формируют мощные положительные тепловые аномалии, дешифрируемые во все сезоны года. Температура сольфатарных полей достигает 80°C (по снимкам дешифрируется около 40°C), кратерного озера - 30°C (столько же дешифрируется) [1]. Кратер вулкана Шуго формирует хорошо выраженную положительную тепловую аномалию, однако её интенсивность не отличается от интенсивности тепловых аномалий, связанных с участками открытого грунта на окружающей территории. По-видимому, это связано с не очень высокой интенсивностью теплового излучения грязевого вулкана. Источники Долины нарзанов не формируют тепловых аномалий, что связано с их небольшими размерами и невысокой температурой.

Заключение

1. Основной вклад в дифференциацию теплового поля городских территорий вносят промышленные объекты и плотность застройки. Определяющее значение имеет размер городов.

2. Тепловое воздействие атомных электростанций приходится, в первую очередь, на водные объекты. Тепловые снимки позволяют оценить интенсивность этого воздействия.

3. Тепловое влияние полигонов ТБО зависит от размеров населённых пунктов, к которым они относятся. ПТБО крупнейших городов формируют мощные тепловые аномалии, в то время как ПТБО небольших населённых пунктов могут вообще не дешифрироваться.

4. Влияние на окружающие ландшафты проявлений поствулканической активности связано, в первую очередь, с их интенсивностью. Чем более высокой температурой характеризуются проявления, тем интенсивнее влияние.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 16-35-00327.

Список литературы

1. Антипин, М.А., Грищенко М.Ю. Исследование тепловых аномалий кальдеры вулкана Головнина по тепловым космическим снимкам // Современные проблемы регионального развития: материалы V международ. науч.-практич. конф., Биробиджан, 09-11 сентября 2014 г. / Под ред. Е.Я. Фрисмана. Биробиджан: ИКАРП ДВО РАН – ФГБОУ ВПО ПГУ им. Шолом-Алейхема. - 2014. - С. 160-161.

2. Балдина, Е.А., Константинов, П.И., Грищенко, М.Ю., Варенцов, М.И. Исследование городских островов тепла с помощью данных дистанционного зондирования в инфракрасном тепловом диапазоне // Земля из космоса — наиболее эффективные решения. - 2015. - Специальный выпуск. - С. 38-42.

3. Грищенко, М.Ю., Ермилова, Ю.В. Сопоставление тепловых островов различных городов Европейской России с помощью снимков Landsat-7/ETM // Геоинформационное картографирование в регионах России: материалы V Всероссийской научно-практической конференции (Воронеж, 19 – 22 сентября 2013 г.). - Воронеж: Цифровая полиграфия. - 2013. - С. 53-60.

4. Книжников, Ю.Ф., Кравцова, В.И. Аэрокосмические исследования динамики географических явлений. М.: Изд-во Моск. ун-та., 1991. - 206 с.