

МОНИТОРИНГ КРУПНЫХ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ЗАВОДОВ ПРИ ПОМОЩИ ТЕПЛОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С КОММЕРЧЕСКИХ СПУТНИКОВ: ИЗУЧЕНИЕ КОНКРЕТНОГО СЛУЧАЯ

Адам Бернстейн

Примечание редактора: Мы опубликовали в номере 8:3 статью Ху Цзяня и Фрэнка фон Хиппеля «Использование коммерческих фотоспутников для обнаружения работы реакторов по производству плутония и газодиффузионных заводов»¹. Представленная здесь статья является детальным исследованием одного из случаев, рассмотренных в предыдущей статье – американского газодиффузионного завода в Портсмуте. Как отмечалось Ху Цзянем и Фрэнком фон Хиппелем, после завершения их работы более детальный анализ тепловых изображений Портсмута был проведен Адамом Бернстейном. Этот анализ можно найти в отчете Национальной лаборатории Сандиа, который является расширенным вариантом представляемой статьи².*

Тепловые изображения, полученные на действующих сейчас коммерческих спутниках, являются интересной возможной технологией для мониторинга определенных типов предприятий по производству расщепляющихся материалов. Возможными ее приложениями являются договор об остановке производства расщепляющихся материалов (ДОПРМ) или моратория на производство расщепляющихся материалов. Для определения возможностей и ограничений подобного получения изображений мной были изучены изображения Портсмутского газодиффузионного завода, крупного американского предприятия по обогащению урана в штате Огайо, из архива Лэндсата-5. Мой анализ показал, что эксплуатация крупных газодиффузионных заводов (ГДЗ) может быть обнаружена с большой вероятностью при получении тепловых изображений в течение большей части года при ясной погоде. Может быть, удастся также отождествить некоторые другие заметные эксплуатационные изменения, такие, как остановка заводского цеха с одним процессом, при сравнении температур крыши у соседних действующих зданий. Однако, неопределенности в существующем наборе данных не позволяют получить определенных выводов в отношении последней возможности. Это исследование выявило внутренние трудности, включающие уязвимость к контрастам, которые не позволяют использовать тепловые изображения со спутников (при имеющемся разрешении) как надежное самостоятельное средство верификации, даже для самых крупных предприятий. Тем не менее, анализ изображений может быть использован как средство для инициирования проведения инспекций, для оповещения и тренировки инспекторов перед инспекцией, и для уменьшения частоты инспекций на месте, требующихся для данной промышленной зоны. Он может быть использован как прямое средство для мониторинга двух крупных ГДЗ в США и французского завода в Трикантене, и, возможно, для определения эксплуатационного состояния двух ГДЗ в Китае, в общей сложности, для пяти заводов во всем мире. Легкость получения и умеренная стоимость тепловых коммерческих изображений еще более увеличивают привлекательность этого метода для верификации.

Оригинальная версия данной статьи была получена редакцией журнала "Наука и всеоб-

¹ Hui Zhang and Frank N. von Hippel, "Using Commercial Imaging Satellites to Detect the Operation of Plutonium-Production Reactors and Gaseous-Diffusion Plants", *Science and Global Security*, (November 2000: 8:3, 261 – 313); см. перевод: Ху Цзянь и Фрэнк фон Хиппель «Использование коммерческих фотоспутников для обнаружения работы реакторов по производству плутония и газодиффузионных заводов», *Наука и всеобщая безопасность*, т. 8, № 3, стр. 3 – 19 (2000).

² Adam Bernstein, "Monitoring Large Enrichment Plants Using Thermal Imagery from Commercial Satellites: A Case Study", Sandia Report SAND2000-8671, Sandia National Laboratories/CA: May, 2000.

щая безопасность" 4 января 2001 года.

Адам Бернштейн работает в группе регистрации излучений (орг. 8418) Национальной лаборатории Сандиа, Ливермор, штат Калифорния, США.

ВВЕДЕНИЕ

Надежный мониторинг предприятий по обогащению урана, в особенности тех, на которых может изготавливаться высокообогащенный уран (ВОУ), является ключевой проблемой для любого режима, требующего мониторинга или ограничения производства расщепляющихся материалов. В этой статье представлены результаты моего исследования потенциала применения тепловых изображений с коммерческих спутников как средства для мониторинга таких предприятий. Для этой цели я изучал изображения Портсмутского обогатительного завода в южном Огайо из архива изображений с Лэндсата-5 за десятилетний период, начиная с 1988 года.

Существующие тепловые изображения с Лэндсата-5, так же, как и изображения с Лэндсата-7, запущенного в апреле 2000 года, могут оказаться полезными для обнаружения определенных крупных изменений эксплуатационного состояния ГДЗ. Однако, анализ тепловых изображений (практически при любом разрешении) не позволяет обнаружить более тонких изменений в работе завода – например тех, которые могут произойти при изменении конфигурации в здании цеха с одним процессом.

Выявленная здесь возможность обнаружения качественных изменений ограничивает, но не предотвращает использования анализа тепловых изображений как средства верификации. Примеры возможных приложений включают: инициирование более детальных проверок работы завода; предупреждение инспекторов о необычной активности до проведения инспекции; и уменьшение требуемой частоты инспекций на месте. Последнее приложение может оказаться привлекательным для США, поскольку два ГДЗ, подходящих для мониторинга с помощью анализа тепловых изображений (см. ниже), расположены в США. Более того, умеренных стоимость коммерческих изображений (несколько сотен долларов за снимок для Лэндсата-7) увеличивают привлекательность метода, даже для этих ограниченных приложений.

Мешающие факторы, такие, как ветер, и прочие погодные условия, могут ослабить тепловые сигнатуры и усложнить интерпретацию. Кроме того, страна-хозяин может попытаться различными способами скрыть выход тепла с завода. Необходимы дальнейшие исследования, чтобы определить, может ли способность обнаружения изменений, предполагаемая в этом исследовании, быть воспроизведена в реальном режиме мониторинга.

В первых разделах этой статьи я определяю возможные источники доступных тепловых изображений и типы обогатительных предприятий, наиболее подходящие для мониторинга при помощи тепловых изображений. Затем я рассматриваю соответствующие характеристики Портсмутского завода и описываю факторы, влияющие на измерения температуры крыши. Затем я провожу анализ двух изображений завода, и завершаю статью обсуждением возможностей и ограничений анализа тепловых изображений с коммерческих спутников как средства мониторинга ДОПРМ.

ДОСТУПНЫЕ КОММЕРЧЕСКИЕ СПУТНИКИ

Единственным коммерческим источником тепловых изображений, доступным в настоящее время, являются спутники Лэндсат-5 и -7. Это исследование базируется только на снимках Лэндсат-5 с размером элемента изображения (пиксела) 120 x 120 м. Следовательно, обычное здание ГДЗ площадью в десять гектаров будет покрываться всего 10 – 15 пикселями. Лэндсат-7, запущенный в апреле 1999 года, и имеющий в тепловом диапазоне разрешение в 60 м³, увеличивает количество пикселей в 4 раза. Минимальное тепловое разрешение после учета влияния атмосферы и других факторов для Лэндсата-5 и Лэндсата-7 составляет 0,5 – 1 °C⁴. Если не исправлены систематические температурные эффекты, то

³ <http://geo.arc.nasa.gov/sge/landsat/landsat.html>.

⁴ Снимки со спутника Лэндсат производятся в семи различных спектральных диапазонах. Три из них расположены в области видимого излучения, два – в области среднего ИК-

возможны общие температурные сдвиги на несколько градусов Цельсия, но это не влияет на относительные измерения, использованные в этом исследовании. Для набора данных Лэндсата-5 процедура повторной выборки, используемая поставщиком изображений, может ухудшить разрешение даже для относительных измерений на несколько градусов Цельсия. Этот эффект, детально обсуждаемый в работе², является особенностью конкретного набора данных, и его можно будет избежать, используя другие данные.

Другим возможным источником изображений является система АСТЕР⁵, которая должна быть выведена на орбиту в ноябре 1999 года на спутнике НАСА ЕОС-АМ-1, хотя она и не является непосредственно коммерческой системой. Пространственное разрешение АСТЕР в каждом из пяти тепловых диапазонов составляет примерно 90 м. Данные АСТЕР могут быть доступны (хотя и с некоторыми ограничениями) посредством программы НАСА ЕОСДИС⁶.

ОБОГАТИТЕЛЬНЫЕ ЗАВОДЫ, ПОДХОДЯЩИЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПРИ ПОМОЩИ ТЕПЛОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В мировом производстве обогащенного урана доминируют технологии газовой диффузии и газовых центрифуг. При удельном потреблении энергии в 2400 квт-час на ЕРР⁷ газовая диффузия является наиболее энергоемким методом обогащения, а ГДЗ входят в число самых больших крытых зданий в мире. Эта совокупность свойств делает их удобными кандидатами для мониторинга при помощи тепловых изображений. Напротив, энергопотребление заводов с газовыми центрифугами примерно в 10 раз меньше, чем у газодиффузионных заводов равной производительности. Площадь крыши заводов с газовыми центрифугами также примерно в 10 раз меньше, чем у диффузионных заводов одинаковой производительности. Эта площадь соответствует не более чем одному пространственному элементу изображения в тепловом диапазоне Лэндсата-5 (без повторной выборки)⁸, или примерно 4 пикселям в тепловом диапазоне Лэндсата-7.

В США имеются два больших действующих ГДЗ – заводы в Падьюке и Портсмуте. У Франции есть один действующий завод в Трикантене. Один, или, может быть, два ГДЗ работают, или работали, в Китае, в Ланчжоу и Хейпине⁹.

Учитывая сравнительно малую площадь и низкое тепловыделение других типов обогатительных заводов, мониторинг таких предприятий при помощи анализа тепловых изображений, доступных в настоящее время их коммерческих источников, полностью ограничен ГДЗ. Самый маленький ГДЗ, китайский завод в Ланьчжоу (размером примерно 700 x 100 м, или 6 пикселей), еле виден на снимках Лэндсата-5, но занимает около 24 пикселей на изображении с Лэндсата-7. Принимая 10 пикселей как приблизительный порог обнаружения действующего завода, ослабление этого ограничения ГДЗ потребует дальнейшего повышения углового разрешения изображений с коммерческих спутников до по крайней мере в два раза лучшего, чем разрешение Лэндсата-7 в 60 м.

излучения, и по одному – в области теплового излучения (10 – 12 мкм) и ближнего ИК-излучения. Все изображение покрывает область размером 170 x 185 км на земной поверхности. На практике было достигнуто разрешение около 0,5 °C при аккуратном учете поправок на влияние атмосферы и излучательную способность. См., например, Wukelic et al., "Radiometric Calibration of LANDSAT Thematic Mapper Thermal Band", Remote Sensing of the Environment, (1989): 29, 339 – 347, где представлены результаты с Лэндсата с тепловым разрешением менее 0,5 °C.

⁵ <http://asterweb.jpl.nasa.gov/asterhome>.

⁶ <http://asterweb.jpl.nasa.gov/asterhome/authorization/default.htm>.

⁷ ЕРР (SWU) – единица работы разделения, величина, характеризующая обогатительную мощность завода.

⁸ Разрабатываемая сейчас технология разделения изотопов при помощи лазеров на атомарных парах (АПЛРИ) характеризуется удельным расходом энергии, примерно в 100 раз меньшим, чем у газовой диффузии. Хотя заводов такого типа пока еще не построено, их нельзя будет выявить при помощи анализа спутниковых изображений низкого разрешения.

⁹ Defense Intelligence Agency, People's Republic of China Nuclear Weapons Employment Policy and Strategy, 1972, http://www.fas.org/irp/dia/product/prc_72/app_e.htm.

ОПИСАНИЕ ПОРТСМУТСКОГО ГАЗОДИФфуЗИОННОГО ЗАВОДА

До 1992 года Портсмутский ГДЗ был специализированным государственным предприятием по производству ВОУ, а после этого он был переоборудован для гражданского производства низкообогащенного урана (НОУ). До 20 ноября 1992 года завод производил ВОУ, обогащенный примерно до 90%, и затем он стал производить НОУ, обогащенный до 4 – 5 %. Для удобства я буду ссылаться на прошлое эксплуатационное состояние как на «режим ВОУ», а на последующее состояние – как на «режим НОУ».

Завод, план которого показан на рис. 1, имеет три здания для отдельных процессов под номерами 326, 330 и 333. Площадь зданий 330 и 333 равна примерно 9 гектарам (13 га), а площадь крыши здания 326 составляет около 8 гектаров (11,4 га). Каскад начинается в здании 333, в котором установлено 640 ступеней. Количество обрабатываемого материала максимально на первых стадиях, и поэтому ступени в этом здании самые большие и наиболее энергоемки. Здание 330 с 1100 ступенями, представляет следующую часть каскада, в котором происходит обогащение урана примерно до 4 – 5%. В режиме ВОУ окончательное обогащение до более чем 90% производится в здании 326, в котором размещается около 2280 ступеней. Согласно журналу завода, в 1994 году в этом здании было выключено примерно 85 – 90% из числа ступеней, работавших в 1991 году.

Для целей этого исследования интересующим физическим параметром является излучаемая энергия. Источником этой энергии являются сами ступени, нагреватели (используемые для поддержания температуры газа в трубопроводах), источники питания и прочие устройства здания. Кроме того, температура крыши сильно зависит от солнечного нагрева и от ветра (см. ниже).

В каждом здании есть своя собственная система проточного водяного охлаждения, соединенная с испарительным паровым башенным охладителем. Одна башня расположена вблизи северо-западного угла здания 330, а две других находятся вблизи северо-восточного угла здания 333. Вентиляция здания производится холодным воздухом, засасываемым через фильтры на первом этаже, и поступающем на второй этаж через вентиляционные отверстия в полу и отверстия в основаниях двигателей. Горячий воздух из второго этажа выходит через многочисленные управляемые вентиляционные отверстия в крыше, понижая внутреннюю температуру потолка и наружную температуру крыши. Крыши производственных зданий покрыты многослойной изоляцией толщиной в несколько дюймов из вара, картона, изолирующих материалов и гравия на стальном настиле крыши¹⁰. Измерений реального значения излучательной способности крыши в этом исследовании не проводилось. Я использовал номинальное значение тепловой излучательной способности крыши в 0,9, основывая эту оценку на диапазоне величин для бетона, камня и кирпича¹¹.

Важно сравнить величину возрастания температуры, ожидаемую от внутренней деятельности, с разрешением спутниковой камеры порядка нескольких градусов Цельсия (для относительных измерений). Из обсуждений с сотрудниками Портсмута¹² и из других источников¹³ я принял для внутренней температуры потолка значение в 60 °C. Как детально показано в Приложении I к работе², это значение внутренней температуры приведет к температуре крыши в 18 °C при наружной температуре воздуха в 4 °C, и к 41 °C при наружной температуре в 35 °C (при отсутствии солнечного нагрева). Разность температур по отношению к окружающей среде, возникающая от внутренней деятельности, не будет поэтому меньше 5 – 6 °C в худшем случае (летом), а обычно будет 10 – 15 °C или выше. Изменения такой величины будут легко обнаружены при помощи любого из указанных выше спутников, включая Лэндсат-5.

¹⁰ Частное сообщение, Lynn Calvert, Lockheed Martin Utility Services, July 1999.

¹¹ T. Lillesand and R. Kiefer, Remote Sensing and Image Interpretation, (New York, John Wiley and Sons, 1987) 403.

¹² Частное сообщение, Lynn Calvert, Lockheed Martin Utility Services, July 1999.

¹³ M. Molbert, "The Eurodif Program", in Recent Development in Uranium Enrichment, ed. J.R. Merriman and M. Benedict, Vol. 78 (NY: American Institute of Chemical Engineers, 1982) 221. В этой работе указана температура под потолком на заводе в Трикастене, равная 80 °C. Во всех оценках я использовал консервативное меньшее значение в 60 °C.

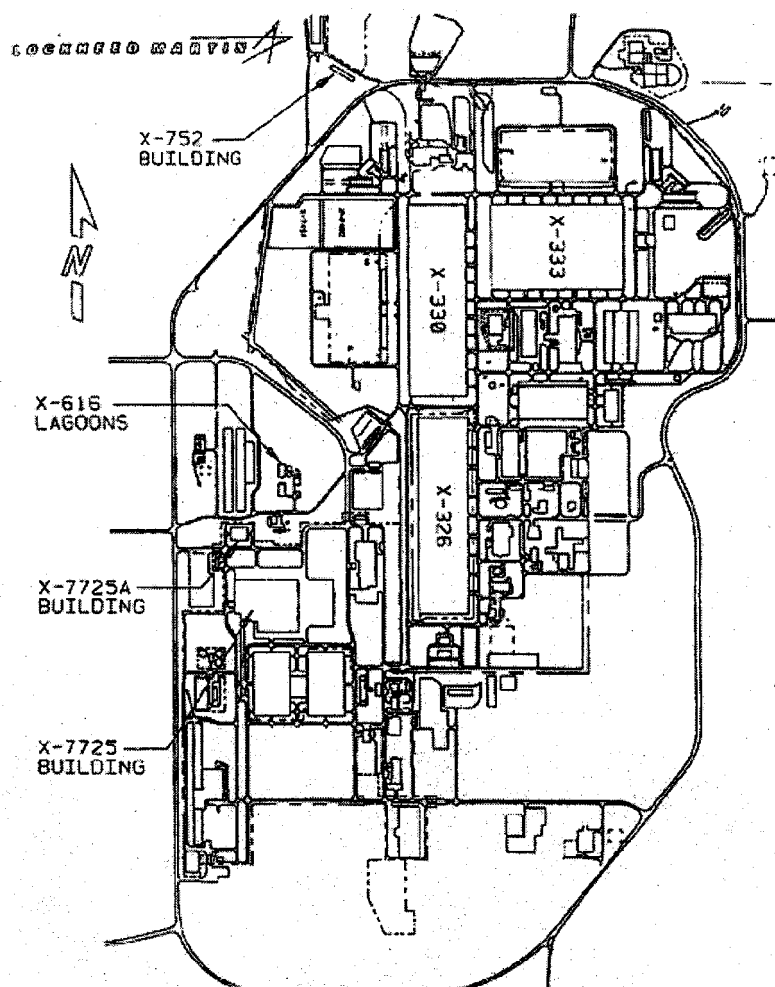


Рис.1. Портсмутский газодиффузионный завод.

Как указывается ниже и в Приложении I к работе², ветер и солнечный нагрев существенно изменяют наблюдаемую температуру крыши. Эти эффекты, хотя они и значительны в абсолютном смысле (даже в 9:45, когда делались снимки), они не скроют большое повышение температуры по отношению к окружающей среде в результате внутренней деятельности.

ПОЛУЧЕНИЕ СНИМКОВ И ИХ АНАЛИЗ

Поиск данных

Я проводил поиск снимков Портсмутского завода с Лэндсата в архиве в сети Интернет¹⁴. Я нашел около 200 снимков за период в 1988 по 1998 год. После исключения снимков с долей облачного покрова более 20%, снимков без предварительного обзора, и с испорченными данными, осталось 50 снимков. Из них я выбрал два: от 16 февраля 1991 года, когда завод работал в режиме ВОУ, и от 12 марта 1994 года, когда завод работал в режиме НОУ.

¹⁴ Я использовал архивы Лэндсата по адресу Интернета <http://origin.eosat.com>.

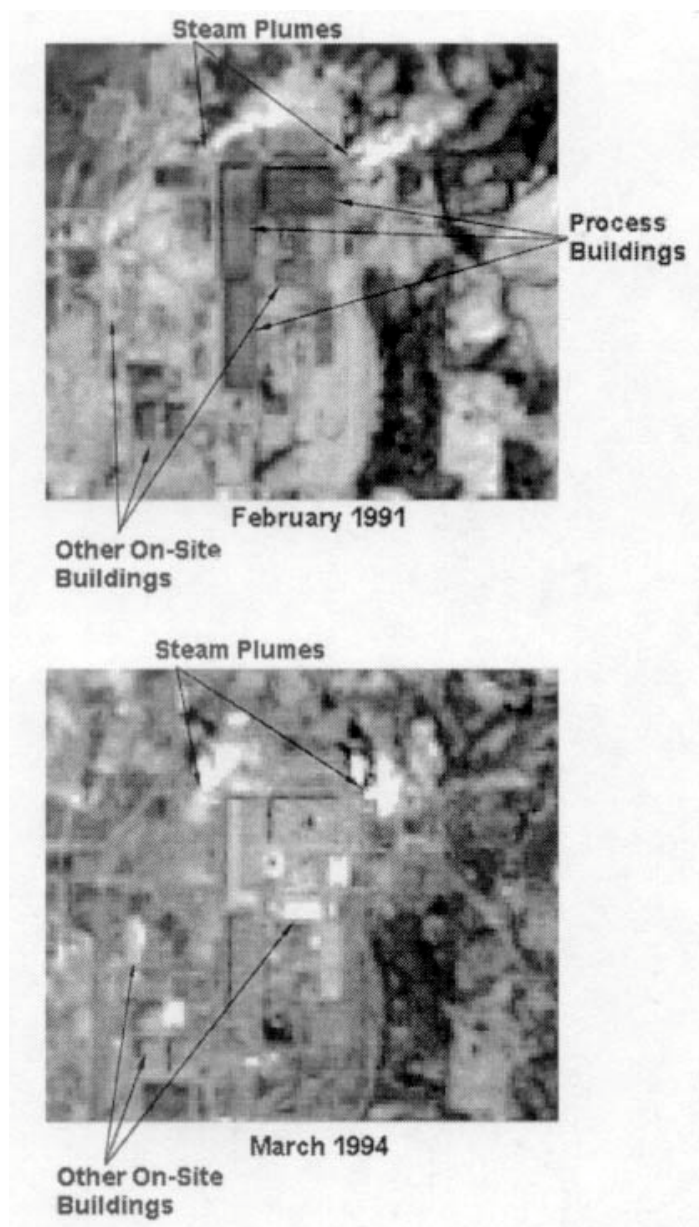


Рис. 2. Изображения Портсмутского обогатительного завода с Лэндсата в видимой области, полученные 16 февраля 1991 года (вверху) и 12 марта 1994 года (внизу). На обоих снимках можно увидеть султаны пара из башенных охладителей (отмечены стрелками сверху), указывающие на различный ветер. Показаны производственные здания (стрелки справа) и относительно крупные вспомогательные здания (стрелки снизу).

Информация со снимков Лэндсата в видимой области

На рис. 2 показаны изображения завода, полученные с Лэндсата в видимой области. Производственные здания видны на обоих изображениях 1991 и 1994 года во всех спектральных каналах, включая тепловой. На обоих снимках видны султаны пара из башенных охладителей, указывающие на явное различие ветра. На снимке 1991 года виден бриз в северо-восточном направлении, а на снимке 1994 года ветер сравнительно слабый. В табл. 1 приведены погодные условия для каждого дня, наблюдавшиеся в Уэверли (городе в 12 км к северу от завода). Изменение погодных условий оказывают важное влияние на тепловую сигнатуру.

Табл. 1. Погодные условия на Портсмутском заводе в дни получения изображений.

Дата	Режим	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	Ветер
16.2.91	БОУ	- 15	- 7	Бриз (СВ)
12.3.94	НОУ	1	10	Тихий

Факторы, влияющие на измерение температуры

Тепловые датчики на спутнике фактически измеряют энергетическую яркость. Энергетическая яркость R определяется как плотность потока излучаемой энергии в заданном спектральном диапазоне, измеряемая на спутнике (в Вт/м²). Величина R может быть связана с температурой поверхности крыши при помощи стандартного алгоритма¹⁵. Задача состоит в оценке деятельности внутри здания по определенной температуре крыши. Однако, на температуру могут влиять некоторые факторы, не зависящие от внутренней деятельности. Они вкратце обсуждаются здесь, а более подробно – в работе².

1. Излучательная способность. Эта величина должна оставаться постоянной от наблюдения к наблюдению с точностью до нескольких процентов (или должна измеряться для каждого наблюдения). На практике режим мониторинга должен включать начальную характеристику излучательной способности крыши каждого производственного здания, а также периодическую проверку отсутствия ее изменений более, чем на несколько процентов¹⁶. Это может быть проведено во время инспекций на месте. Наличие изменений излучательной способности в видимой и ближней-ИК области также может быть поводом для проведения инспекций.

2. Атмосферная турбулентность. Вариации пропускания атмосферы (из-за влажности, облачного покрытия, и изменений температуры) и вариации фонового излучения атмосферы влияют на кажущуюся температуру объектов на поверхности. Пока атмосферные эффекты однородны по площади зданий и их окрестностей, эти сдвиги пропадают при относительных измерениях температуры, использованных в этих исследованиях. Однако следует соблюдать осторожность, отбирая снимки с малой влажностью, облачностью и отсутствием дымки. В реальном режиме для отбора подходящих снимков можно будет использовать местные метеорологические данные.

3. Конечный размер пиксела и повторная выборка. Поскольку измеренная яркость в каждом 120-метровом пикселе является усредненной по его площади величиной, значения яркости окружающих здание более холодных участков уменьшают кажущуюся яркость зданий. Кроме того, распространитель изображений производит повторную выборку используемых здесь изображений (сглаживает их), используя алгоритм кубической свертки, рассматриваемый в Приложении III работы². Повторная выборка изменяет также кажущееся значение яркости пикселей внутри периметра здания. Я оценил, что в использованных изображениях оба эти эффекта приводят к общему систематическому уменьшению температуры поверхности крыши здания на –2 °C. Проблемы усреднения и повторной выборки, обнаружен-

¹⁵ B. Clark, "New Lookup Tables", EOSAT LANDSAT Technical Notes, (August 1996), 1:4. При процедуре калибровки Лэндсата сначала исходные величины в пикселах (целые числа по 8 бит) преобразуются в значения энергетической яркости при помощи стандартного набора констант. После этого энергетическая яркость преобразуется в температуру. Для энергетической яркости λ (Вт/см²·стер·мкм) мы имеем:

$$\lambda = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{q_{\max}} \cdot DN = 0,1238 + 0,00561 \cdot DN$$

где $\lambda_{\max}$, $\lambda_{\min}$ – максимальное и минимальное значения энергетической яркости из заголовка кадра, DN – исходное 8-битовое целое значение для канала 6 (0 – 255), и $q_{\max} = 255$ – максимальное возможное значение DN . Формула для преобразования определенной величины яркости в температуру в градусах Кельвина имеет вид: $T = K_2 / \ln(K_1 / \lambda + 1)$, где λ – яркость, а численные константы равны $K_1 = 60,776$ и $K_2 = 1260,56$ К для данных Лэндсата-5.

¹⁶ В диапазоне температур 0 – 50 °C изменение излучательной способности на 1% соответствует изменению восстановленной температуры менее, чем на 1°C.

ные в данных Лэндсата-5, в основном будут устранены для изображений с Лэндсата-7, поскольку размеры пикселей будут в 4 раза меньше, а результаты измерений будут распространяться без повторной выборки.

4. Конвекция. Ветер и процессы в вентиляционной системе здания могут внести вклад в уменьшение температуры поверхности крыши здания. Грубая оценка влияния конвекции на теплопередачу² показывает, что постоянный однородный ветер со скоростью 6,7 м/с (24 км/ч) понизит все восстановленные значения температуры крыши примерно на 15 °С. Как будет показано, даже при этих условиях здания все еще будут заметны над фоном. Однако, в отличие от указанных выше эффектов, трудно ожидать, что влияние ветра будет одинаково над всеми зданиями. На практике снимки, сделанные при сильном ветре, следует отбрасывать, как ненадежные. При необходимости для отбора снимков со слабым ветром можно использовать пар, выходящий из башенных охладителей, или надежные локальные измерения скорости ветра.

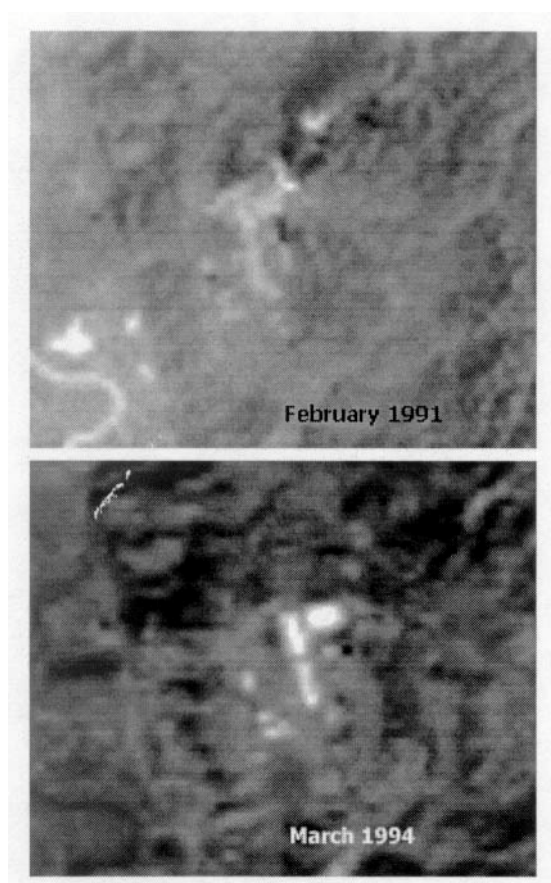


Рис. 3. Набор снимков 1991 г. (вверху) и 1994 г. (внизу) в тепловом диапазоне показывает сигнатуру Портсмутского завода. В нижнем левом углу можно увидеть изображения соседней реки Скиото с существенно различной относительной яркостью.

5. Солнечный нагрев. Примерно через час после восхода солнца солнечный нагрев начнет давать заметный вклад в тепловой баланс крыши здания. Как обсуждалось ранее, при разумных предположениях о внутренней температуре и свойствах теплопередачи крыши, внутренняя деятельность приведет к повышению температуры по сравнению с окружающей средой как минимум на 5 °С, а обычно на 10 – 15 °С или больше в течение большей части года. Солнечный нагрев может внести дополнительные 10 – 15 °С в разницу температуры с фоном, но никогда не скроет полностью влияние внутренней деятельности на температуру крыши. При необходимости для понижения или исключения влияния солнечного нагрева можно будет получить снимки, сделанные ночью, или рано утром. Различие между температурами зданий может быть вызвано селективным затенением зданий облаками, дымкой, или другими эффектами, или неоднородным распределением коэффициента отражения солнечного излучения. Однако, такие изменения не повлияют на базовую способность

определения общего эксплуатационного состояния завода.

Метрики обнаружения внутренней деятельности. Для обнаружения внутренней деятельности я использовал две метрики.

1. $T_i - T_0$, где T_i – это средняя восстановленная поверхностная температура i -го производственного здания, а T_0 – средняя по кадру или ближайшая наземная температура; и

2. $T_i - T_j$, где T_i и T_j – это средние восстановленные поверхностные температуры i -го и j -го производственных зданий.

Использование разностей температур исключает общие сдвиги в измерениях. Однако, возможны неоднородные изменения излучательной способности и свойств атмосферы, которые могут привести к неверной интерпретации. Более того, без надежных наземных измерений для восстановления температуры здания придется использовать номинальное значение излучательной способности.

Анализ в тепловом диапазоне

На рис. 3 показаны снимки завода и его окрестностей в тепловом диапазоне, сделанные Лэндсатом-5 в 1991 и 1994 годах. В центре каждого снимка на фоне окрестностей ясно видны три производственных здания 326, 330 и 333. Это качественное отождествление основано только на различии яркости зданий и фона, и не зависит от никаких предположений об излучательной способности или калибровке температуры. В целом, яркость крыши на снимке 1991 года в режиме ВОУ меньше, чем на снимке 1994 года в режиме НОУ. Это связано со значительно меньшей окружающей температурой и более сильным ветром на первом снимке.

Снимок 1991 года представляет полезный пример неблагоприятного влияния ветра на тепловую сигнатуру. На этом снимке ветер размывает и ослабляет тепловую сигнатуру производственных зданий. Пар, выходящий из башенных охладителей к северо-западу и северо-востоку от производственных зданий, разносится северо-восточным ветром. Этот эффект ослабит разность температур, если ветер будет сносить пар прямо на крыши производственных зданий. На тепловом снимке 1994 года влияние ветра слабее, и контуры зданий кажутся более резкими, и это различие согласуется с разными проявлениями ветра, наблюдаемыми в видимой области.

На рис. 4 в перспективной проекции показана рельефная карта, построенная по тепловым снимкам. Высота каждой точки пропорциональна исходной интенсивности в пикселе в тепловом диапазоне с масштабным коэффициентом 20 для повышения контраста. Темные области в изображении вблизи границ зданий указывают на резкие изменения яркости. На снимке 1994 года проявляется качественное различие вариаций яркости производственных зданий, тогда как на снимке 1991 года все здания кажутся примерно одинаково яркими. На снимке 1994 года средняя яркость здания 326, в котором, как известно, производственная активность была значительно сокращена, понизилась по сравнению с яркостью двух других зданий. Здание 333, деятельность внутри которого мало изменилась, является более ярким по сравнению со своими соседями. Для уточнения анализа я восстановил температуры крыш производственных зданий, и использовал рассмотренные выше относительные метрики.

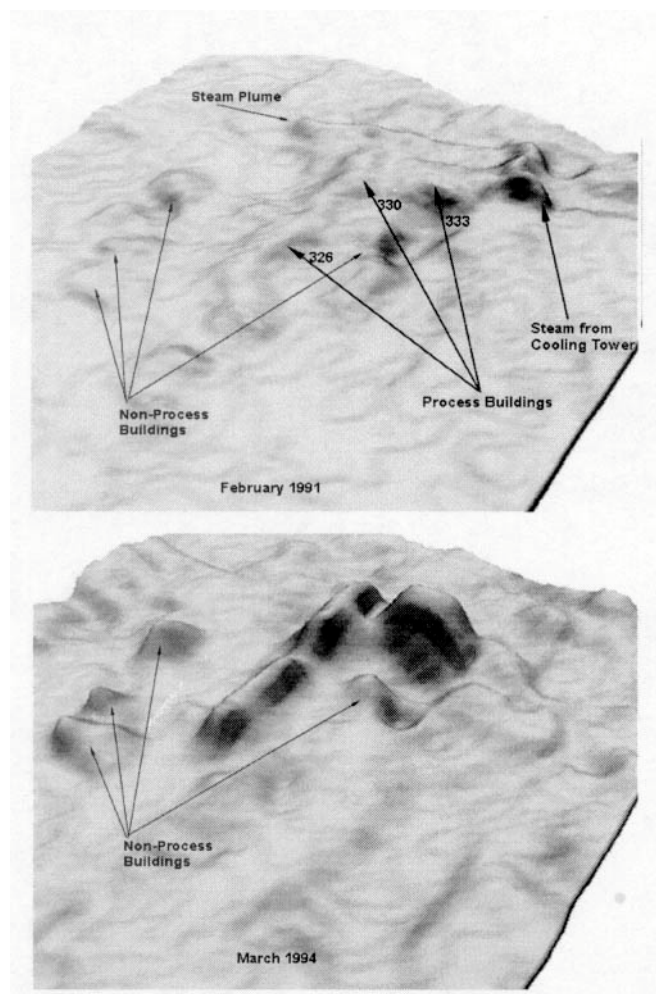


Рис. 4. Рельефные изображения выхода тепла из производственных зданий, определенные по тепловым изображениям с Лэндсата-5. Для всех пикселей был введен масштабный коэффициент 20, чтобы увеличить визуальную наглядность изображений. Стрелкой сверху отмечен султан пара, стрелками слева – вспомогательные здания, стрелками в центре – производственные здания, стрелкой справа – пар из башенного охладителя.

Восстановленные температуры производственных зданий по сравнению с их окрестностями. Для обеих изображений использовалась одинаковая процедура восстановления температуры. Сначала определялся периметр здания по снимкам в видимой и ближней-ИК области. Для каждого из зданий определялась однородная центральная внутренняя область, состоящая из 30 пикселей размером 28,5 x 28,5 м, обработанных повторной выборкой. Для преобразования значений яркости в каждом пикселе внутри этой области в значения температуры использовался стандартный алгоритм¹⁷. Процедура выполнялась с данными без геокоррекции, так что единственными относящимися к данным эффектами были повторная выборка и усреднение по пикселям, которые обсуждались ранее. Поправок к температуре по любым рассмотренным выше однородным сдвигам не вводилось, и использовалась номинальная излучательная способность для гравия, равная 0,9.

В табл. 3 показаны средние температуры крыши и температуры крыши по отношению к фону для каждого здания и для каждого снимка. Повторная выборка и усреднение по пикселям приводят к заметному возможному неоднородному сдвигу, который может приводить к понижению восстановленной температуры до -2°C . Этот эффект, детально рассмотренный в работе², максимален для здания 326. Кроме того, неоднородное изменение излучательной способности на 5% для каждого здания может привести к сдвигу его температуры на $2 - 3^{\circ}\text{C}$, противоположному по знаку изменению излучательной способности. Последний столбец в таблице содержит значения $T_i - T_0$, где T_i – это средняя восстановленная поверхностная

¹⁷ См. ссылку 15.

температура i -го производственного здания, а T_0 – средняя по кадру или ближайшая наземная температура. В последних строках в таблице (для каждого снимка) приводятся средние температуры по кадру (для излучательной способности $\varepsilon = 1$). Средние температуры по кадру лежат в пределах соответствующих температурных диапазонов окружающей среды, измеренных на метеорологической станции (табл. 1), что дает грубую проверку калибровки температуры.

Табл. 2. Средние значения измеренной температуры поверхности для каждого производственного здания при постоянной внутренней площади в 30 пикселей = 24367,5 м². Излучательная способность по всему участку принималась равной $\varepsilon = 0,9$. Повторная выборка и усреднение по пикселям приводят к заметному возможному неоднородному сдвигу, который может приводить к понижению восстановленной температуры до – 2 °С. Кроме того, неоднородное изменение излучательной способности на 5% может привести к сдвигу температуры на 2 °С (см. основной текст). Приведенные ошибки являются чисто статистическими.

Здание	Участок расчета	Средняя температура крыши и разница с фоном (ε = 0,9)	
		T _i	T _i – T ₀
		Снимок 1991 года	
333	3 x 10	4,1 ± 0,3	+ 11,8
330	2 x 15	3,9 ± 0,4	+ 11,6
326	2 x 15	3,4 ± 0,2	+ 11,1
Среднее по кадру		-7,7 °C	
		Снимок 1994 года	
333	3 x 10	26,1 ± 0,7	+ 21,7
330	2 x 15	24,1 ± 0,5	+ 19,7
326	2 x 15	22,1 ± 0,6	+ 17,7
Среднее по кадру		4,4 °C	

Оценка вкладов от внутренней деятельности, солнечного нагрева и ветра. Для того, чтобы мониторинг по тепловым изображениям был эффективен, важно установить, что изменения температуры в табл. 2 в заметной части обусловлены внутренней деятельностью. Используя базовые уравнения теплопередачи вместе со стандартными величинами солнечного нагрева и влияния ветра, я следующим образом рассчитал вклад от каждого источника.

Приравнивая поток через крышу Q_{roof} потоку в окружающий воздух за счет излучения и конвекции Q_{air} , получим:

$$Q_{\text{roof}} = K \left(\frac{T_{\text{int}} - T_{\text{roof}}}{\Delta x} \right) = Q_{\text{air}} = C (T_{\text{roof}} - T_{\text{air}}) + \varepsilon \sigma (T_{\text{roof}}^4 - T_{\text{air}}^4)$$

где $\varepsilon = 0,9$ – излучательная способность, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²град⁴, $\Delta x = 0,1$ м – толщина крыши¹⁸, $K = 0,5$ Вт/м·град – теплопроводность крыши, $C = 10$ Вт/м²град – коэффициент теплопередачи для неподвижного воздуха.

Это уравнение не учитывает солнечного нагрева и движения воздуха. Величина K выбрана для хорошей теплоизоляции, а коэффициент теплопередачи характерен для свободной конвекции в воздухе¹⁹.

T_{int} и T_{air} – это предполагаемые значения внутренней температуры потолка здания и температуры окружающей среды над зданием соответственно. На основании данных^{11,12} я выбрал диапазон значений внутренней температуры T_{int} от 60 до 80 °С. После подстановки разумных значений и решения уравнения были получены значения температуры крыши T_{roof} , приведенные в табл. 3.

¹⁸ Согласно сообщению сотрудников Портсмутского завода, крыша покрыта «несколькими дюймами» составного материала.

¹⁹ M. Ozisik, Basic Heat Transfer, (New York, McGraw Hill, 1977), 8.

В этом уравнении не учитывается солнечный нагрев и принудительная вентиляция, сопровождающаяся отводом тепла через отверстия в крыше. Реальная теплопроводность составной кровли неопределенна, так же как и реальная внутренняя температура в здании. Тем не менее, значения из таблицы дают грубую оценку температурных изменений в результате внутренней деятельности. Как видно из таблицы, даже очень жарким летом ($T_{\text{roof}} = 35\text{ °C}$) температура крыши будет на 6 °C больше температуры окружающей среды при внутренней температуре потолка в 60 °C . Поскольку тепловые изображения характеризуются чувствительностью в несколько °C , этот наихудший случай дает уверенность в том, что эффекты нагрева из-за внутренней деятельности могут наблюдаться в течение всего года.

Табл. 3. Температура крыши производственных зданий T_{roof} и ее отличие от температуры окружающей среды ($T_{\text{roof}} - T_{\text{air}}$) для различных значений температуры внутри и снаружи здания T_{int} и T_{air} .

$T_{\text{int}}\text{ (°C)}$	$T_{\text{air}}\text{ (°C)}$	$T_{\text{roof}}\text{ (°C)}$	$(T_{\text{roof}} - T_{\text{air}})\text{ (°C)}$
60	4	18	14
60	15	26	11
60	35	41	6
80	0	20	20

Полный анализа проведен в Приложении I к работе², где включены поправки на солнечный нагрев и охлаждение ветром. В предположении внутренней температуры 60 °C и средней температуры окружающей среды $4,4\text{ °C}$ предсказанная температура только за счет внутренней деятельности для снимка 1994 года равна 18 °C . Если в дополнение к этим условиям учесть солнечный нагрев потоком 330 Вт/м^2 ²⁰ при коэффициенте поглощения солнечного излучения $0,25$, то температура крыши возрастет до 23 °C , что близко к реально измеренной в 1994 году температуре²¹. Наконец, рассматривая данные 1991 года, на которых явно проявляется влияние ветра, я предполагал, что скорость ветра равна $6,7\text{ м/с}$ (24 км/ч), что привело к уменьшению температуры на 14 °C до примерно 10 °C . И снова грубое соответствие с данными 1991 года является случайным, вызванным произвольным выбором скорости ветра, но тем не менее результат указывает на величину эффекта. Важным выводом является то, что внутренняя деятельность обуславливает значительную часть наблюдаемого повышения температуры над фоном. Несмотря на потенциально заметное влияние солнца и ветра, отличие от фона, вызванное внутренней деятельностью, все еще остается существенно большим по сравнению с разрешением спутников Лэндсат в несколько градусов Цельсия. Кроме того, влияние ветра можно исключить подходящим подбором снимков.

Восстановленная разница температур зданий. В табл. 4 показана разница температур зданий со статистическими ошибками, складываемыми квадратично, для обеих снимков. Если систематические сдвиги реально являются постоянными по зданиям и их окрестностям, то на снимке 1994 года проявляется разность температур между зданиями 326 и 330 в -4 °C (4 стандартных отклонения) по сравнению с разностью температур между этими зданиями в 1991 году. Разность между другими двумя парами зданий меньше, около 2 °C . Кажущееся относительное уменьшение температуры в здании 326 качественно согласуется с известными данными о том, что 90% ступеней в здании 326 не работают.

Благодаря наблюдаемому совпадению между анализом изображений и наземной информацией можно сделать вывод, что относительные изменения температуры здания 326 от 1991 до 1994 года фактически являются результатом существенных изменений в режиме эксплуатации. Существенные изменения относительной средней температуры зданий (т.е., изменения, коррелированные с деятельностью внутри здания, известной из дополнительной информации) могут быть выявлены по снимкам, только если влияние повторной выборки,

²⁰ J.A. Duffie and W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, (New York: John Wiley and Sons, 1980), Table 2.5.1, p. 44, and Table 2.13.1, p. 78.

²¹ Это согласие случайно, поскольку реальная величина коэффициента поглощения солнечного излучения неизвестна – однако разумные значения этой величины приводят к неплохому соответствию с данными.

смешивания пикселей, ветра и атмосферных помех будут одинаковыми для зданий на снимке, и только если изменения излучательной способности будут постоянны по площади зданий и изображений. Это затрудняет доказательное использование относительных температур зданий ($T_i - T_j$) в данном случае. Это не влияет на возможность отождествления любого отдельного здания как работающего по сравнению с фоном при использовании метрики ($T_i - T_0$).

Табл. 4. Разность восстановленных средних температур крыши зданий ($T_i - T_j$) на обеих снимках. Систематический эффект повторной выборки (приведет в таблице со знаком минус) может быть неоднородным и может уменьшить разность температур со зданием 326 на 2 °С. Это может уничтожить кажущуюся разницу температур зданий. Знак $\pm$ относится к статистической ошибке.

Здания	Разница средней температуры зданий ($T_i - T_j$) ($\varepsilon = 0,9$)	
	1991	1994
333,330	$0,2 \pm 0,5 - 1$	$2,0 \pm 0,9 - 1$
330,326	$0,4 \pm 0,5 - 1$	$2,0 \pm 0,8 - 1$
333,326	$0,6 \pm 0,4 - 2$	$4,0 \pm 1,0 - 1$

ОБСУЖДЕНИЕ

Учитывая, что производственные здания ясно видны в тепловом диапазоне обеих изображений, приведенный выше анализ доказывает, что тепловые снимки с коммерческих спутников могут показать, что ГДЗ выглядят «теплыми» по сравнению с их окрестностями, и, как следствие, то, что можно обнаружить выключенное состояние завода. Как в 1991, так и в 1994 году тепловые изображения показывают, что здания значительно теплее фона – существенно выше пределов в несколько градусов Цельсия, устанавливаемых разрешением, даже при учете влияния ветра и солнечного нагрева. Однако, имеющиеся изображения не показывают непосредственно, каким будет казаться любое из зданий при отсутствии внутренней деятельности.

Поскольку значительная часть тепловой нагрузки на крышу приходит от солнечного нагрева, даже полностью выключенное здание будет иметь температуру существенно выше фона. Это просто связано с тем фактом, что полые здания не поглощают и не диссипируют тепло так же эффективно, как окружающая земля, которая является эффективным тепловым стоком. Для уменьшения влияния солнечного нагрева и подтверждения источника эффекта можно использовать снимки, сделанные ночью или ранним утром. Но даже без использования таких снимков увеличение температуры крыши на 5 – 20 °С, обусловленное только внутренней деятельностью, (см. Приложение I к работе²) может быть ясно видимо на существующих и будущих тепловых спутниковых снимках.

Анализ также позволяет предположить, но не доказывает, что тепловые изображения позволяют выявить, что производственное здание размером в несколько гектаров было выключено, или почти выключено, изучая его температуру относительно других производственных зданий и окрестностей до и после выключения. Однако, из-за неблагоприятного ветра на раннем снимке и из-за возможных неоднородных изменений температуры здания от основных источников ошибок, я не смог по имеющемуся набору снимков сделать определенного вывода о том, что это возможно.

В будущем исследовании (или реальном режиме) следует выполнить три важных условия (все они достижимы), для того, чтобы можно было сделать определенные выводы об изменениях температуры крыши. Во-первых, необходимо провести определенные измерения излучательных характеристик крыши для того, чтобы убедиться в том, что наблюдаемые эффекты не связаны с неоднородными изменениями излучательной способности. Во-вторых, для анализа должны отбираться только изображения, на которых доминируют ясные и спокойные условия с низкой влажностью и слабой дымкой. В-третьих, следует минимизировать эффекты усреднения пикселей и повторной выборки, используя данные с лучшим разрешением и другим алгоритмом повторной выборки (или вообще без нее). Четырех-

кратное уменьшение площади пиксела и режим повторной выборки для ближайших соседей, доступные для изображений Лэндсат-7, в основном исключают указанные эффекты. Взятые вместе, эти усовершенствования, возможно, позволят обнаружить разницу в несколько градусов относительных температур производственных зданий. Кроме того, получение ночных тепловых изображений окажется полезным для исключения или уменьшения значительного эффекта солнечного нагрева крыш. В принципе ночные изображения конкретной области со спутников Лэндсат доступны в том же количестве, как и дневные. Изменения температур на ночных изображениях осложняются тем фактом, что будет трудно или невозможно определить контуры зданий из снимков Лэндсат в видимой области. Однако, если использовать близкие по времени дневные снимки в видимой области, то повышенный контраст в тепловом диапазоне может предоставить дальнейшую полезную информацию об эксплуатационном состоянии обогатительных заводов. Изучение таких изображений станет полезным продолжением данного анализа.

Доступность изображений

В этом исследовании для каждой площадки было найдено в общей сложности после отсева облачных или непригодных по другим причинам около пяти изображений в год. Эта величина может оказаться недооценкой, потому что не все из полученных изображений доступны для предварительного просмотра в поисковой системе, применявшейся в данном исследовании. Максимально возможная скорость получения дневных изображений с Лэндсат-7 составляет 22 снимка в год, и это число удвоится, если ночные снимки окажутся полезными. Учитывая, что крупные изменения в эксплуатации ГДЗ, такие, как повторный запуск производства, на практике занимают несколько месяцев, скорость получения от пяти до десяти ясных изображений в год представляется достаточной для того, чтобы такие изменения не остались незамеченными.

Контрмеры

Имеется много способов сознательного изменения температуры крыши с целью скрытия эффектов изменения режима эксплуатации завода. Некоторые примеры таковы:

- Возврат обогащенного продукта из конца каскада НОУ в его начало. Этот процесс называют пакетной рециркуляцией²².
- Наличие нерегулируемых источников тепла в производственном здании или вблизи него.
- Специальное размещение башенных охладителей.
- Изменение излучательной способности крыши производственного здания.
- Изменения охлаждения или изоляции здания.
- Удаление тепла в другие здания многоцелевого предприятия для скрытия возрастания активности в производственных зданиях.

ВЫВОДЫ

Данный анализ показывает, что тепловые снимки со спутников являются техническим средством, хотя и ограниченным, содействия мониторингу производства расщепляющихся материалов. В мире имеются 5 ГДЗ, для мониторинга которых этот метод может быть использован прямо сейчас. Лэндсат-7 увеличит возможности мониторинга этих заводов, но он не позволит расширить применение данного метода на заводы с газовыми центрифугами. Как обсуждалось ранее, это может потребовать улучшения пространственного разрешения по сравнению с Лэндсатом-7 примерно в 2 раза (предполагая минимальное требование обнаружения в 10 пикселей). Кроме того, для подтверждения любых наблюдаемых изменений потребуются дополнительные наземные данные, среди которых следует отметить периодические изменения излучательной способности крыш зданий.

²² Следует отметить, что такого типа изменений трудно ожидать в крупных газодиффузионных заводах, в основном из-за большого запаса продукта в каскаде и длительного времени, необходимого для достижения равновесия в системе.

Несмотря на эти ограничения, тепловые изображения в принципе способны выполнять три полезные функции мониторинга для любого из указанных ГДЗ. Они помогут сократить частоту инспекций на месте, подготовят инспекторов к будущим инспекциям и, возможно, смогут стать средством инициации инспекций на месте или исследований какими-либо другими средствами. Кроме того, возможности метода дополняются невысокой стоимостью данных, несколько сотен долларов за снимок для Лэндсата-7. Тем не менее, из настоящего исследования видно, что не следует ожидать того, что существующие тепловые изображения смогут стать надежным самостоятельным средством мониторинга, но они могут рассматриваться как один из элементов всеобъемлющего режима верификации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Это исследование поддерживалось центром кооперативного мониторинга Национальной лаборатории Сандия. Это многоцелевая лаборатория, управляемая корпорацией Сандия компании Локхид Мартин для Министерства энергетики США по контракту DE-AC04-94AL85000.

Автор желал бы поблагодарить Линн Калверт, Джона Шомейкера, и Сэнди Чилдерс с Портсмутского завода за предоставление важной информации о работе завода. Я много получил от обсуждений и редакторских рецензий Тома Баджа, Джорджа Болдуина, Фрэнка фон Хиппеля и Марти Эбрамса. Наконец, я выражаю благодарность Биллу Балларду, Дугу Хенсону и Ларри Брандту за помощь в выпуске этого отчета. Мнения, выраженные здесь, принадлежат только автору.