

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ИНОРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ПОЧВЕ МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

© 2024 г. Хао Янг¹, Ян Ян¹, Сианлонг Лиу^{1,**}, Хонжин Ванг^{2,***}, Ююн Хоу³, В.П. Вавилов^{4,*}

¹Хунаньский институт инжиниринга конструкций, Хунань, Сиантан, 418000 Китай

²Колледж электрического и информационного инжиниринга, Университет Хунаня, Чангша, 410082 Китай

³Компания Минг Янг «Умная энергия», Жогшан, Гуандонг 528400 Китай

⁴Институт неразрушающего контроля, Томский политехнический университет, Россия 634028 Томск, ул. Савиных, 7

E-mail: *vavilov@tpu.ru; **xianglongliu@163.net; ***hongjinwang2017@outlook.com

Поступила в редакцию 05.06.2024; после доработки 09.07.2024

Принята к публикации 12.07.2024

Предложен метод обнаружения инородных объектов, таких как металлические и пластиковые емкости, банки, бутылки и т.п., в почвах сельскохозяйственного назначения, основанный на использовании инфракрасной термографии для мониторинга динамических температурных распределений на поверхности почвы. Показано, что изменение солнечной иррадиации в ходе суточного цикла приводит к динамическим температурным сигналам над скрытыми объектами, амплитуда которых зависит от мощности солнечного излучения, влажности почвы и контраста теплофизических свойств между материалом объекта и почвой. Экспериментально исследовано влияние факторов окружающей среды на эффективность обнаружения скрытых объектов по их поверхностным температурным отметкам. Эксперименты проводили на имитаторах промышленных отходов в виде банок из алюминия и полиэтилентерефталата, размещенных на различных глубинах в песке с различной влажностью. Применение алгоритма так называемого восстановления теплового псевдопотока для обработки исходных термограмм позволило улучшить выявляемость подповерхностных объектов за счет снижения влияния диффузии тепла в поперечных направлениях. Предложенный метод эффективен и безвреден для людей и окружающей среды.

Ключевые слова: обнаружение твердых отходов, инфракрасная термография, неразрушающий контроль, обработка данных, алгоритм восстановления теплового псевдопотока.

EVALUATING EFFICIENCY OF FOREIGN OBJECT DETECTION TECHNOLOGY BASED ON THE USE OF PASSIVE INFRARED THERMOGRAPHY

© 2024 Hao Yang¹, Yan Yan¹, Xianglong Liu^{1,**}, Hongjin Wang^{2,***}, Yuejun Hou³, V.P. Vavilov^{4,*}

¹Hunan institute of engineering construction project academy, Hunan, Xiangtan, 418000 China

²College of electrical and Information engineering, Hunan University, Changsha, 410082 China

³Ming Yang Smart Energy Group Limited, Zhongshan, Guangdong, 528400 China

⁴Institute of nondestructive testing, Tomsk Polytechnic University, Russia 634028 Tomsk, Savinykh St., 7

E-mail: *vavilov@tpu.ru; **xianglongliu@163.net; ***hongjinwang2017@outlook.com

A new method for detecting subsurface solid objects buried in farmlands, such as plastic bottles, wasted cans, etc., has been proposed by applying the technique of infrared (IR) thermography to monitor the temperature of soil surface subjected to solar irradiation. Through both experimentation and simulation, this study parameterizes the influence of environmental factors on IR images and validates the detection capabilities of the method. To verify the feasibility of IR thermography testing, the experimental section of the work is devoted to monitoring aluminum and polyethylene terephthalate cans buried in sand with varying grades of moisture. The dependencies between the efficiency of foreign object detection and their depth are derived. A restoring pseudothermal flux algorithm was used to reduce the impact of lateral diffusion on IR thermographic detection of foreign objects buried in soil. Variations of soil temperature caused by varying solar radiation during multiple day-night cycles are used to improve the detectable diameter-depth ratio. The described technique is efficient and provides no harm to human beings.

Keywords: land solid waste detection, infrared thermography, nondestructive testing, simulation.

DOI: 10.31857/S0130308224080035

ВВЕДЕНИЕ

Твердые промышленные отходы, такие как пластиковые и металлические банки и бутылки, источники питания и т.п., загрязняют почву и подземные воды и могут угрожать здоровью людей [1]. Присутствие инородных предметов может серьезно сокращать ресурс беспилотных сельскохозяйственных машин, увеличивая, таким образом, расходы на их обслуживание [2].

Существующие средства очистки земной поверхности от твердых предметов, как правило, предусматривают ручной труд или используют принцип электромагнитной индукции [3]. Применение беспилотных летательных аппаратов обеспечило быстрое обнаружение инородных предметов на поверхности почвы с использованием методов анализа изображений, что позволило снизить операционные расходы. Тем не менее, даже в сельском хозяйстве не все инородные предметы находятся на поверхности почвы, а подповерхностные объекты могут существенно вредить машинной технике [2, 4].

Инфракрасная (ИК) термография является многообещающим методом обнаружения инородных предметов в почве [5]. Deans и др. предложили комбинировать микроволновую технику с ИК-термографией для повышения вероятности обнаружения скрытых в почве объектов [6]. Yali Wang разработал метод анализа проходящего ИК-излучения с использованием радиационных характеристик фона [7]. Pracht и Świdorski исследовали возможность и эффективность ИК-термографического контроля композиционных материалов, что заложило основы обнаружения инородных объектов в почве [8]. В более широком смысле речь идет о применении теплового контроля (ТК) для анализа структуры твердых тел [9]. Loganathan и др. использовали ИК-термографию для анализа процесса монотонного нагружения армированных композитов [10]. Hongjin Wang и др. предложили новый метод теплового контроля углепластикового композита, который основан на принципе так называемого восстановления теплового псевдопотока (reduction pseudo heat flow method — RPHF); это позволило решить проблему неоднородного нагрева и «поперечной» диффузии тепла [11]. В более поздних исследованиях, в алгоритм обработки данных был введен блок выделения характеристик дефектов, что позволило обнаруживать инородные объекты в почве [12—16]. Близкое исследование было выполнено Strag и Świdorski [17], а также Nüßler и Jonuscheit [18]. Vavilov и др. исследовали особенности обнаружения имитаторов противопехотных мин в почве при изменяющихся погодных условиях и солнечной радиации [19, 20].

Предполагается, что соответствующее моделирование тестовых ситуаций способно улучшить результаты контроля и верифицировать экспериментальные данные. Florides и Kalogirou проанализировали изменение температуры по глубине почвы, создав тем самым теоретические предпосылки для дальнейшего развития ИК-термографического контроля заглубленных объектов [21]. Pręgowski и др. использовали решение трехмерной задачи теплопроводности для оценки того, как результаты теплового метода в комбинации с микроволновым контролем зависят от температуры воздуха, влажности почвы и присутствия в ней минеральных частиц [22]. Yan Duan и др. рассмотрели влияние влагосодержания на теплопроводность песка и получили соответствующее линейное уравнение, тем самым облегчив моделирование дефектных ситуаций [23]. Guozeng Liu и др. исследовали методы неразрушающего контроля (НК) в применении к сотовым сэндвичным панелям, продемонстрировав эффективное выявление зон со скрытой водой в гемопоэтических стволовых клетках [24]. Zorin и Krasnenkov применили комплекс Microlab-Z2 для диагностики металлических структур [25]. Rongxin Sun и др. исследовали связь нелинейных коэффициентов, полученных в результате частотного анализа, с параметрами трещин в композитах [26]. В качестве дополнения к концепции НК был предложен индекс повреждаемости для количественной оценки разрушения и длины распространения трещины.

В настоящем исследовании проанализировано применение пассивной ИК-термографии для обнаружения твердых предметов в зонах ведения сельского хозяйства с использованием естественного солнечного нагрева. Исследованы ряд факторов, влияющих на результаты ИК-термографического контроля, а именно времени суток, температуры окружающей среды, погодных условий и теплофизических характеристик скрытых объектов.

ПРИНЦИП ДИНАМИЧЕСКОГО ИК-ТЕРМОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Пассивная ИК-термография является процедурой ТК с использованием естественных источников тепла, а именно Солнца, окружающей среды, геотермальных источников и т.п., что позволяет выявлять тепловые аномалии на поверхности твердых тел в квазистационарном режиме. При этом не требуется применять дополнительные источники нагрева, как это предусмотрено в классических процедурах активного ТК.

Таким образом, ИК-термографическая техника является на самом деле неразрушающей и позволяет обнаруживать дефекты сравнительно большого размера, в частности, инородные предметы, зоны структурных неоднородностей, скрытые источники тепла, расслоения в строительных конструкциях и т.п. Сущность метода состоит в регистрации и анализе естественного теплового излучения тел с помощью ИК-тепловизора. Тепловые (температурные) аномалии на поверхности объектов контроля, называемые отметками (индикациями), могут быть идентифицированы как поверхностные «отпечатки» скрытых дефектов. В некоторых случаях дополни-

тельным преимуществом ТК является то, что многие неметаллы обнаруживают прозрачность в ИК-части спектра, что позволяет обнаруживать дефекты на больших глубинах по сравнению с рентгеновским и ультразвуковым контролем. Технику ТК используют для неразрушающих испытаний в авиакосмической и энергетической промышленности, машиностроении и других областях.

Пассивная процедура ТК может быть применена только при наличии температурного градиента между объектом контроля и окружающей средой. Если температура объекта равна температуре окружающей среды, наступает тепловое равновесие, и обнаружение тепловых аномалий невозможно. Для активного ТК необходимо наличие дополнительного (искусственного) источника тепла, и аппаратура контроля становится более сложной. Следует заметить, что в пассивной ИК-термографии, например, Солнце может рассматриваться как дополнительный источник нагрева, мощность которого периодически изменяется во времени согласно суточному циклу.

При обнаружении инородных объектов на небольших глубинах схема контроля, показанная на рис. 1а, может быть сведена к упрощенной трехслойной модели (рис. 1б). Если, например, объект толщиной d_1 и диаметром W находится в почве на глубине d_0 , то поперечной диффузией тепла у краев объекта можно пренебречь. Тогда модель включает зоны 1, 2 и 3, как видно из рис. 1б.

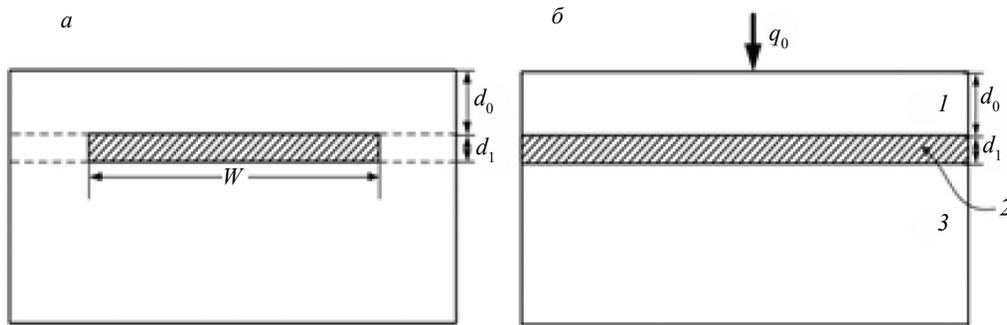


Рис. 1. Схема обнаружения дефекта: реальная (а); упрощенная (б).

Уравнение теплопроводности с соответствующими условиями имеет вид [11]:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \alpha_{11} \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \alpha_{11} \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + \alpha_{12} \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \alpha_{21} \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \alpha_{21} \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \alpha_{22} \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial t} = \alpha_{11} \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \alpha_{11} \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} + \alpha_{12} \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2}; \quad (3)$$

$$T_{1,z=d_0} = T_{2,z=d'_0}; \quad (4)$$

$$k_{12} \frac{\partial T_1}{\partial Z_{z=d_0}} = k_{22} \frac{\partial T_2}{\partial Z_{z=d'_0}}; \quad (5)$$

$$T_{1,z=d_0+d_1} = T_{2,z=d_0+d'_1}; \quad (6)$$

$$k_{12} \frac{\partial T_3}{\partial Z_{z=d_0+d_1}} = k_{22} \frac{\partial T_2}{\partial Z_{z=d_0+d'_1}}; \quad (7)$$

$$k_{12} \frac{\partial T_1}{\partial Z_{z=0}}(x_0, y_0, 0) = q_0, \quad (8)$$

где T — температура, °С, К; x , y , и z — нормализованные пространственные координаты; q_0 — солнечный поток на поверхности тела, Вт · м⁻²; $\alpha = k/(\rho c)$ — температуропроводность, м² · с⁻¹; k — теплопроводность, Вт · м⁻¹ · К⁻¹; ρ — плотность, кг · м⁻³; c — теплоемкость, Дж · кг⁻¹ · К⁻¹; индексы переменных соответствуют трем зонам в модели на рис. 1. В присутствии дефекта решение уравнений (1)–(8) для поверхностной температуры получают, используя преобразование Фурье—Ханкеля [11]:

$$\overline{T_1} \approx \frac{\overline{q}}{k_1 \eta_1 \sqrt{\frac{i\omega}{\alpha_{11}} + \xi^2}} \overline{G}(\xi, \omega) \overline{f}(\xi), \quad (9)$$

где ξ — пространственная частота в пространстве Ханкеля, связанная с радиусом $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; ω — временная частота в пространстве Фурье; $G(x, y)$ — температурный отклик дефекта, структура которого зависит от геометрии дефекта [8]. Здесь $f(x, y)$ — функция, описывающая геометрию дефекта в поперечном направлении (равна 1 в области дефекта и 0 в других точках):

$$f(x, y) = \begin{cases} 1 & (x, y) \in \Omega_{\text{defect}} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (10)$$

Наличие инородных тел в почве приводит к изменению ее средней плотности, теплоемкости и теплопроводности, в результате чего в процессе нестационарной теплопередачи возникают температурные аномалии в зоне неоднородности почвы. Анализ этих аномалий позволяет обнаружить скрытые инородные объекты и оценивать их параметры.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальные образцы

При разработке пассивного термографического контроля инородных тел в почве был использован метод управляющих переменных (control variable method), согласно которому наиболее критичные параметры сохранялись неизменными в ходе экспериментов. Твердые отходы с различной теплопроводностью имитировали, используя бытовые банки из полиэтилентерефталата (ПЭТ) и алюминия, заполненные парафином (теплопроводность 0,12 Вт · м⁻¹ · К⁻¹). Указанные предметы размещали в песок на различной глубине в условиях естественной солнечной радиации. Возможности метода ИК-термографии для обнаружения вышеуказанных имитаторов были исследованы наряду с определением оптимальных периодов временной регистрации температурных контрастов между скрытыми объектами и «бездефектными» зонами.

С целью исследовать влияние глубины залегания объектов на их термографические отметки в каждой группе экспериментов анализировали три образца, из которых один был размещен на поверхности песка, а два других — на глубинах 5 и 10 мм. Метод управляющих переменных использовали для поддержания одних и тех же условий солнечного облучения и влажности почвы при испытаниях всех типах объектов, заполненных парафином.

Алюминиевые объекты имели диаметр 10 см и высоту 5 см, ПЭТ-объекты — 10 и 7,5 см соответственно. Объекты размещали в боксе размерами 51×38×31 см, заполненном песком (см. рис. 2). В позиции № 1 объекты выходили на поверхности песка (нулевая глубина залегания). В позиции № 2 алюминиевые и ПЭТ-объекты размещали на глубине 5 мм и соответственно в позиции № 3 — на глубине 10 мм. Очевидно, что с ростом глубины тепловые отметки становились более расплывчатыми вследствие диффузии тепла в поперечном направлении. С целью избежать взаимного влияния объектов друг на друга объект № 3 размещали на большем расстоянии от менее заглубленных объектов.

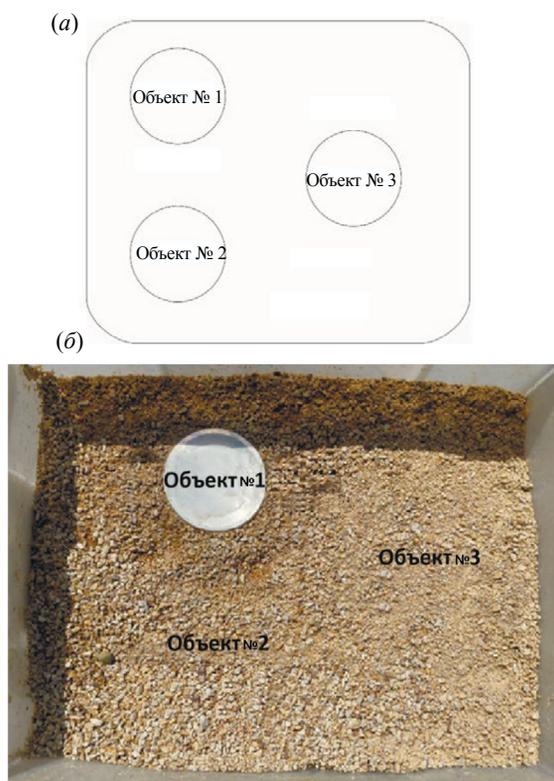


Рис. 2. Размещение инородных объектов в боксе с песком (объект № 1 выходит на поверхность, глубина объекта № 2—5 мм, глубина объекта № 3 — 10 мм).

Аппаратура

Эксперименты проводили сентябре в г. Чангша (провинция Хунань, Китай) при интенсивном солнечном излучении и длинном световом дне. Аппаратура контроля показана на рис. 3. Температуру и влажность песка определяли датчиком BRW100-2006, температурные распределения в боксе измеряли с интервалом 15 мин с помощью тепловизора MAG62 (спектральный диапазон 7—15 мкм, матричный ИК-детектор 640×480, максимальная частота записи термограмм 50 Гц).

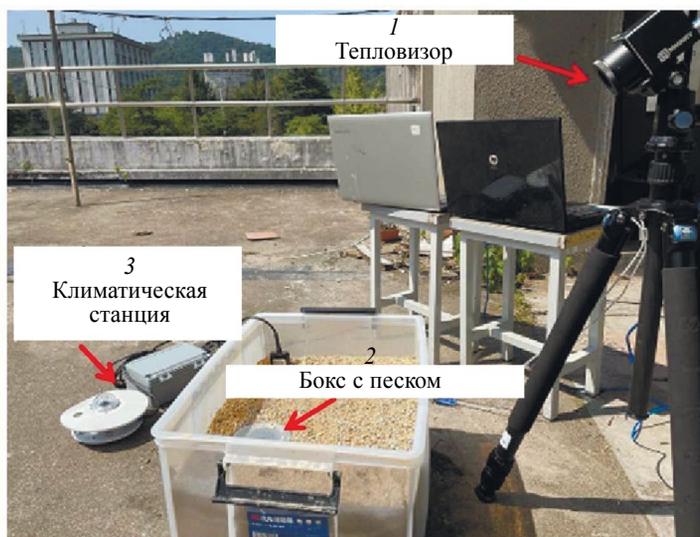


Рис. 3. Экспериментальная аппаратура (1—тепловизор; 2—бокс с песком; 3—климатическая станция).

Период солнечной иррадиации длился с 8:00 до 20:00. В течение дня мощность солнечного излучения измеряли каждые 15 мин с помощью портативной климатической станции YGY-TVQ. Тепловизор располагали на расстоянии 1,2 м от бокса с песком, что обеспечивало пространственное разрешение 0,8×0,8 мм. Датчик влажности и температуры был вставлен в песок вертикально на расстоянии 130 мм от объектов, интервал времени измерений также составлял 15 мин.

Всего провели 3 экспериментальные сессии. В первых двух сессиях объекты контроля из алюминия и ПЭТ последовательно размещали в песке на различных глубинах. Бокс выдерживали на открытом воздухе в течение двух дней перед началом измерений. Третья сессия включала два этапа экспериментов на ПЭТ-объекте при различной влажности песка (3 и 19 %). В последнем случае объекты выдерживали на открытом воздухе в течение двух дней, после чего в течение следующих двух дней выполняли измерения в период с 8:00 до 20:00.

Очевидно, что условия солнечной иррадиации не были идентичны в ходе экспериментов, но в долгосрочной перспективе можно принять, что они были близки в течение нескольких последовательных солнечных дней. Заметим, что такие же погодные условия имеют место, например, на Кипре, поэтому технология обнаружения инородных тел должна быть одной и той же для локаций, расположенных на одной и той же географической широте.

ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изменение эффективности обнаружения во времени

Термограммы поверхности песка над алюминиевыми и ПЭТ-объектами были записаны в течение различных периодов времени, связанных с длительностью солнечного облучения. Изменения средних температур поверхности песка над объектами из алюминия и в бездефектной зоне показаны на рис. 4 (всего последовательность включала 65 термограмм).

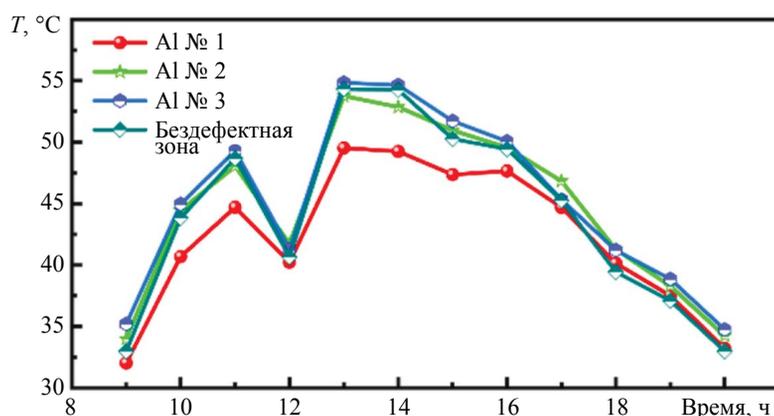


Рис. 4. Изменение температуры поверхности песка во времени (объекты из алюминия).

Сравнивая температурные профили, видно, что все три объекта из алюминия отчетливо выявляются на глубинах 0, 5 и 10 мм в течение всего периода наблюдения. Наилучшие условия обнаружения имеют место от 9:00 до 14:00, затем они ухудшаются от 15:00 до 18:00 и снова улучшаются в период от 19:00 до 20:00. Следует заметить, что алюминиевый объект на поверхности песка отчетливо виден на ИК-термограмме благодаря комбинированию температурных и излучательных эффектов.

Вторая серия экспериментов включала анализ объектов из ПЭТ. Результаты приведены на рис. 5 (65 термограмм).

Как и в случае алюминия, ПЭТ-объекты наблюдаются на поверхности песка в течение всего времени наблюдения благодаря изменению как температуры, так и коэффициента излучения. На глубине 5 мм такой объект невидим от 14:00 до 20:00, в то время как для объектов на глубине 10 мм температурный сигнал отсутствует от 16:00 до 20:00. Наилучший период наблюдения имеет место от 9:00 до 14:00, в то время как уже около 15:00 «видимость» ПЭТ-объекта ухудшается. Заметим, что с 16:00 до 20:00 тепловые отметки объектов были размытыми и не обеспечивали надежного обнаружения.

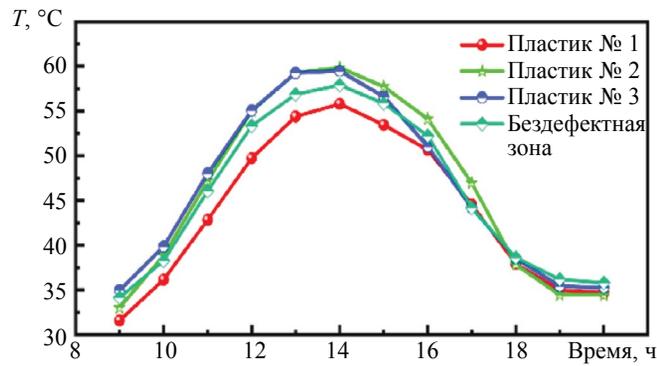


Рис. 5. Изменение температуры поверхности песка во времени (объекты из ПЭТ).

Следует заметить, что, когда объекты из алюминия были заменены ПЭТ-объектами, тепловой баланс всей системы нарушался, и для его восстановления требовалось 1-2 дня. Сравнение температурных распределений до и после достижения теплового баланса приведены на рис. 6.

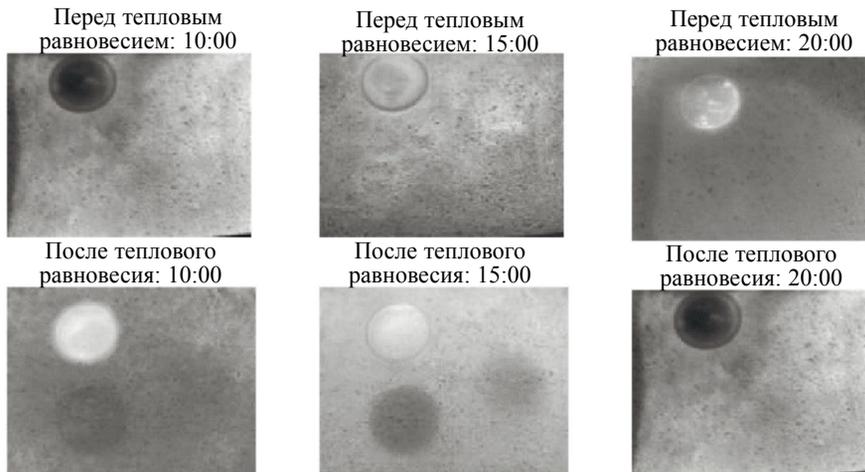


Рис. 6. Сравнение термограмм до и после теплового равновесия.

Рис. 7 представляет сравнение исходных термограмм и результатов обработки с использованием алгоритма RPHF [11] при обнаружении ПЭТ-объектов. На исходных термограммах

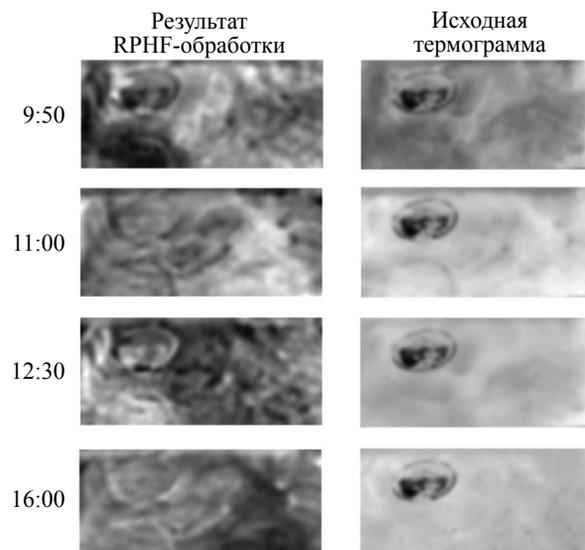


Рис. 7. Сравнение исходных термограмм и результатов обработки с помощью алгоритма RPHF (ПЭТ-объекты).

видны только поверхностные предметы в силу ранее указанных причин, тогда как отметки заглубленных объектов существенно смазаны. Обработка данных по методу RPHF улучшает температурные индикации скрытых дефектов, однако качество изображений остается низким.

Зависимость эффективности обнаружения от влажности почвы

С целью анализа влияния влажности почвы на характеристики обнаружения ПЭТ-объектов с 9:00 до 14:00 была выполнена 3-я сессия экспериментов на песке с влажностью 3 и 19 %. Изменения температуры характерных точек во времени показаны на рис. 8.

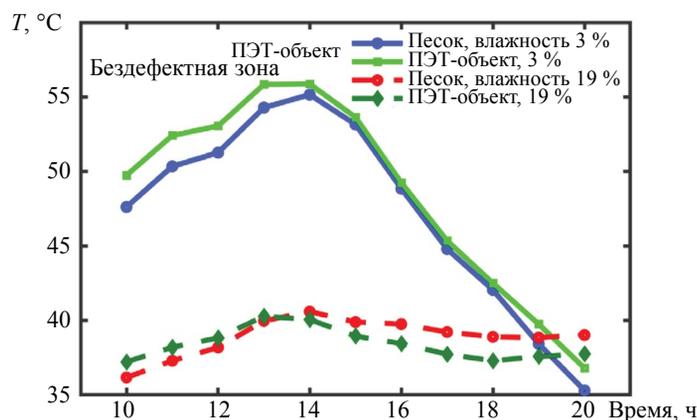


Рис. 8. Изменение температуры поверхности во времени при обнаружении ПЭТ-объектов на глубине 10 см при различной влажности песка.

На поверхности сухого и низкой влажности песка температура в результате солнечного нагрева достигала почти 55 °С, что сравнимо с условиями пустыни. При этом профили изменения температуры, а также солнечной радиации, была близки к косинусоидальному. На поверхности песка с влажностью 19 % температура достигала 40 °С. Разница температур между дефектными и бездефектными участками становилась заметной рано утром, затем снижалась и вновь становилась заметной после 20:00. При высокой влажности песка (см. рис. 8) дифференциальные температурные сигналы были сравнительно низкими рано утром (до 10:00) и достигали регистрируемого уровня после 16:00.

Рис. 9 показывает температурные отпечатки над объектами в песке с различной влажностью в течение дневного цикла. При низкой влажности песка (3 %) инородные объекты ранним

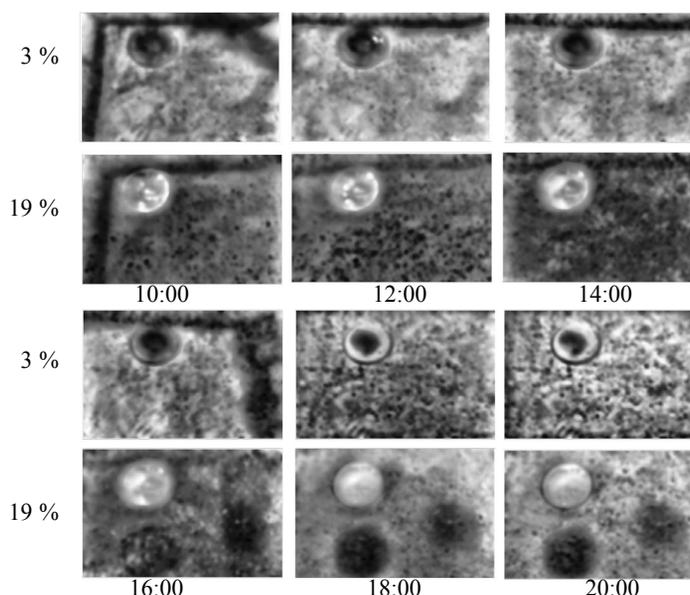


Рис. 9. Термограммы инородных ПЭТ-объектов в песке с различной влажностью.

утром характеризуются слабым контрастом, причем этот контраст уменьшается с ростом солнечной иррадиации. Аналогичным образом эффективность обнаружения объектов снижается после захода солнца. Во влажной почве (19 %) объекты обнаруживаются после 16:00, когда солнечная иррадиация начинает снижаться. Указанные феномены обусловлены тем, что влажность изменяет теплофизические характеристики почвы, что приводит к различному поведению дифференциальных температурных сигналов во времени. Фактически исследование динамики температуры почвы может также служить инструментом оценки влажности почвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отличие от ряда предыдущих работ по обнаружению инородных предметов в почве с помощью микроволнового излучения в настоящем исследовании продемонстрированы возможности тепловидения, используя солнечную иррадиацию для нагрева поверхности почвы. Показано, что основным фактором эффективности контроля является правильный выбор периода наблюдения в течение цикла день/ночь. Установлено, что инородные объекты (как металлические, так и неметаллические) могут быть обнаружены на глубине до 10 мм. Другим важным фактором эффективности обнаружения является контраст теплофизических свойств объекта и почвы, в частности, различия в теплопроводности и теплоемкости. В случае объектов на глубинах до 10 мм оптимальным является период наблюдения от 9:00 до 14:00. Эффективность обнаружения улучшается с повышением влажности почвы вследствие роста ее теплопроводности. На влажность почвы влияют дождевые осадки, а также возможно ее искусственное увеличение путем ирригации. Будущие исследования будут направлены на анализ возможности обнаружения инородных объектов в почве на глубинах более 10 мм в сложных погодных условиях. Обработку последовательности исходных ИК-термограмм целесообразно производить с использованием алгоритма восстановления теплового псевдопотока, который позволяет снизить влияние поверхностных помех и тепловой диффузии в поперечных направлениях.

Настоящее исследование финансировалось Отделом образования провинции Хунань, Китай, по контракту № 22A0517, Фондом естественных наук провинции Хунань по гранту № 2023JJ30166, а также частично Национальным молодежным фондом естественных наук по гранту № 61901167.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li C., Hu X., Zhong C., Zeng, Shen H. Solid waste detection in cities using remote sensing imagery based on a location-guided key point network with multiple enhancements // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2023. V. 16. P. 191—201.
2. Nishar A., Richards S., Breen D., Robertson J., Breen B. Thermal infrared imaging of geothermal environments and by an unmanned aerial vehicle (UAV): A case study of the Wairakei — Tauhara geothermal field, Taupo, New Zealand // Renewable Energy. 2016. V. 86. P. 1256—1264. DOI: 10.1139/juvs-2015-0030
3. ElMasry G., ElGamal R., Mandour N., Gou P., Al-Rejaie S., Etienne B., Rousseau D. Emerging thermal imaging techniques for seed quality evaluation: Principles and applications // Food Research International. 2020. V. 131. P. 109025. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109025
4. Kalogirou S.A., Florides G.A. Measurements of ground temperature at various depths / Proc. 3rd International Conference on Sustainable Energy Technologies. 2004. Nottingham, U.K. P. 1—6.
5. Jinmin Dai, Zijun Wang. Infrared thermography non-destructive testing technology and its applications // Techniques of Automation and Applications. 2007. V. 26 (1). P. 10—16.
6. Deans J., Schmithals G., Carter L.J. An analysis of a thermal imaging method for landmine detection using microwave heating // J. Appl. Geophys. 2001. V. 47 (2). P. 123—133. DOI: 10.1016/S0926-9851(01)00052-0
7. Yali Wang. The invention relates to an imaging performance deduction method for infrared detection // China Science and Technology Information. 2024. No. 6. P. 121—124.
8. Pracht M., Świdorski W. Analysis of the possibility of non-destructive testing to detect defects in multi-layered composites reinforced fibers by optical IR thermography // Composite Structures. 2019. V. 213. P. 204—208.
9. Mix P.E. Introduction to nondestructive testing: a training guide. John Wiley & Sons. June 2005.
10. Loganathan T.M., Sultan M.T.H., Muhammad Amir S.M., Jamil J., Yusof M.R., Md Shakh A.U. Infrared thermographic and ultrasonic inspection of randomly-oriented short-natural fiber-reinforced polymeric composites // Frontiers in Materials. 2021. No. 7. P. 604459.
11. Hongjin Wang, Sheng-Jen Hsieh, Xunfei Zhou, Bo Peng. Restored pseudo heat flux (RPHF) algorithm for carbon fibre composite defect detection using thermography under uneven heating // Quantit. InfraRed Thermogr. J. Dec. 2017. V. 15 (4). P. 1—15. DOI: 10.1080/17686733.2017.1417807

12. Wang H., Wang N., He Z., He Y. Phase-locked restored pseudo heat flux thermography for detecting delamination inside carbon fiber reinforced composites // IEEE Trans. Ind. Informat. May 2018. V. 15. No. 5. P. 2938—2946.
13. He Z., Wang H., Li Y., Zhang Z., Zhang Y., Bi H., He Y. A deconvolutional reconstruction method based on Lucy–Richardson algorithm for joint scanning laser thermography // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2020. V. 70. P. 1—8.
14. Hongjin Wang, Yuejun Hou, Yunze He, Can Wen. A Physical-constrained decomposition method of infrared thermography: Pseudo restored heat flux approach based on Ensemble Bayesian Variance Tensor Fraction // In IEEE Transactions on Industrial Informatics. March 2024. V. 20. No. 3. P. 3413—3424. DOI: 10.1109/TII.2023.3293863
15. Yunze He, Xinying Mu, Jiarong Wu, Yue Ma, Ruizhen Yang, Hong Zhang, Pan Wang, Hongjin Wang, Yaonan Wang. Intelligent detection algorithm based on 2D/3D-UNet for internal defects of carbon fiber composites // Nondestructive Testing and Evaluation. 2024. V. 39 (4). P. 923—938. DOI: 10.1080/10589759.2023.2234548
16. Hongjin Wang, Hsieh S.J. Solving the inverse heat conduction problem in using long square pulse thermography to estimate coating thickness by using svr models based on restored pseudo heat flux (rphf) in-plane profile // J. Nondestr. Eval. 2018. V. 37 (4).
17. Strag M., Świdorski W. Non-destructive inspection of military-designated composite materials with the use of Terahertz imaging // Composite Structures. 2023. V. 306. P. 116588.
18. Nüßler D., Jonuscheit J. Terahertz based non-destructive testing (NDT). Making the invisible visible // tm-Technisches Messen. 2021. V. 88 (4). P. 199—210. DOI: <https://doi.org/10.1515/teme-2019-0100>
19. Vavilov V.P., Burleigh D.D., Demin V.G. Advanced modeling of thermal NDT problems: from buried landmines to defects in composites / Proc. SPIE “Thermosense XXIV”. V. 4710. P. 507—521.
20. Vavilov V.P., Burleigh D. Infrared Thermography and Thermal Nondesrtuctive Testing. Switzerland: Springer Nature, 2020. 595 p.
21. Florides G., Kalogirou S. Annual ground temperature measurements at various depths, Environm. Science. Physics. 2005. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:92914544>
22. Prgowski P., Świdorski W., Walczak R.T., Lamorski K. Buried mine and soil temperature prediction by numerical mode / Proc. SPIE. Aug. 2000. V. 4038. P. 1—6. DOI: 10.1117/12.396227
23. Yan Duan, Hua Jin, Qiang Zhen. Testing study on moisture content effect on thermal conductivity for clay and sand // Yellow river. 2016. V. 38 (02). P. 114—120 (in Chinese).
24. Guozeng Liu, Weicheng Gao, Wei Liu, Xionghui Zou, Jiangxun Xu, Tao Liu. Debonds and water-filled defects detection in honeycomb sandwich composites based on pulse infrared thermography NDT technique // Rus. J. Nondestr. Test. 2023. V. 59. P. 583—591. DOI: 10.1134/s1061830923600089
25. Zorin A.E., Krasnenkov V.I. Diagnostic Microlab-Z2 complex for nondestructive evaluation of structural and deformation parameters of metal constructions // Rus. J. Nondestr. Test. 2024. V. 60. P. 75—84. DOI: 10.1134/S1061830923601447.
26. Rongxin Sun, Cong Liu, Wei Li, Feng Yang, Peng Jiang. Characterization of crack damages in composite materials by using frequency- and time-domain analysis // Rus. J. Nondestr. Test. 2024. V. 60. P. 22—34. <https://doi.org/10.1134/s1061830923600582>