

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СКРЫТЫХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКИ МЕНЯЮЩЕГОСЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ПОЧВЫ

М. Е. Семенов¹, Ж. Б. Холмуродов², В. С. Ножкин³

*Кафедра цифровых технологий,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» (1), Воронеж, Россия;
кафедры: «Теоретическая гидрометеорология» (2),
«Гидрометеорологическое обеспечение» (3), nozhkin-v@list.ru,
ФГКВБОУ ВО «ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия
им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия*

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; влагосодержание в почве; гистерезис; заглубленные объекты; преобразователь Прейсаха.

Аннотация: Представлен подход к развитию методов инфракрасной диагностики скрытых в почве объектов с учетом динамически меняющегося влагосодержания. Идентификация скрытых объектов строилась на основе решения задачи теплопроводности в трехмерном пространстве с учетом тепловых аномалий, создаваемых скрытыми объектами. При этом предложенная модель позволяет учитывать динамически меняющиеся показатели влагосодержания почвы. В свою очередь, для моделирования проникновения влаги в почву использовалась компиляция классического закона Дарси и гистерезисной модели, основанной на преобразователе Прейсаха. Основные результаты работы получены в рамках имитационного моделирования. В частности, установлено, что повышение влагосодержания в почве способствует увеличению контраста в ИК-изображениях скрытых объектов.

Обозначения

A, B, C – параметры уравнения;

c – удельная теплоемкость;

$D(t)$ – интенсивность дренажа под почвенный слой;

$E(t)$ – интенсивность испарения, возникающая за счет корней растений, находящихся в почвенном слое;

$E_T(t)$ – интенсивность испарения и транспирации;

Θ – входной параметр оператора Прейсаха с переменным состоянием $\eta(t)$;

$f(t, x)$ – непрерывно дифференцируемая функция по переменным t и x ;

$g(t)$ – непрерывно дифференцируемая функция, кроме точек $T = \{\tau_i\}$, в которых определены и ограничены значения $g(\tau_i - 0)$, $g(\tau_i + 0)$, $g'(\tau_i - 0)$, $g'(\tau_i + 0)$, но $g(t)$ или $g'(t)$ могут иметь ограничен-

ные разрывы в τ_i ; также следует сделать предположение о том, что любой ограниченный интервал содержит конечное число точек τ_i ;

$I(t)$ – интенсивность проникновения влаги в почву;

k – теплопроводность;

L – толщина слоя почвы;

$Q(t)$ – интенсивность наблюдаемых осадков;

Q_s – мощность внешнего источника тепла;

q_{net} – поверхностный тепловой поток;

q_{sun} – поглощение почвой солнечного излучения;

q_{sky} – поглощение почвой атмосферного излучения;

q_{conv} – конвекция между почвой и воздухом;	$\alpha = k / c\rho$ – температуропроводность твердого тела;
q_{emis} – тепловое излучение почвы;	γ – параметр, характеризующий точки полуплоскости $P_{\alpha,\beta}$;
T – температура;	$\theta(t)$ – удельное содержание воды (при условии $0 \leq \theta \leq 1$);
t – время;	ρ – плотность;
x_0 – начальное состояние преобразователя;	ψ – матричный потенциал.
x, y, z – координаты пространства;	

Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты находят широкое применение во всех сферах человеческой деятельности, например, их используют при сборе информации о чрезвычайных ситуациях, обеспечении работы телекоммуникаций, проведении метеорологических измерений, экологического мониторинга, поиска глубинных объектов, а также при доставке грузов и т.п. При этом обнаружение и распознавание наземных объектов является сложной задачей, однако труднее найти и распознать объекты, скрытые под земной поверхностью, в частности мины, заглубленные убежища и т.д. Все это связано со сложными процессами, происходящими как на земной поверхности, так и в ней. Наиболее часто применяемый метод поиска заглубленных объектов – инфракрасный (ИК). Он основывается на контрасте температур фона (земной поверхности) и самого заглубленного объекта. Кроме того, в работах [1 – 5] показано, что глубина укрытия, влажность грунта, свойства грунта и окружающей среды влияют как на максимальную разность поверхностных температур, развивающуюся над заглубленным объектом, так и на отставание по фазе, связанное с появлением горячего или холодного пятна внутри грунта. Также установлено, что максимальной глубиной определения небольших объектов, например, противотанковых и противопехотных мин составляет 17,5 и 5,6 см соответственно. Более того, в работах [4 – 7] отмечено, что содержание влаги в грунте оказывает существенное влияние на нагрев элементов, спрятанных в нем, и распределение тепла внутри него. При этом глубина обнаружения увеличивается. Поэтому формализация и учет влагосодержания почвы представляется естественным развитием методов ИК-диагностики скрытых объектов.

Цель статьи – установление зависимости глубины обнаружения объекта в почве от ее увлажненности на основе экспериментальных и теоретических данных.

Постановка задачи

Рассмотрим трехмерное пространство почвы, в которую помещен скрытый объект. На температуру поверхности влияет множество факторов, таких как тип почвы, глубина залегания объекта, тепловая мощность, коэффициент излучения почвы, ее влажность, а также скорость ветра. Кроме того, будем считать, что и грунт, и заглубленный предмет однородны. На **первом** этапе исследования проведем имитационное моделирование в случае, когда влажность грунта не изменяется при нагревании и охлаждении. Математическое описание эксперимента выглядит следующим образом. Согласно теории теплопроводности, распределение температуры $T(x, y, z, t)$ удовлетворяет следующему уравнению с естественными начальными и граничными условиями:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha(x, y, z) \nabla^2 T. \quad (1)$$

Таблица 1

Тепловые параметры используемых материалов в ходе эксперимента

Материал	Электропроводность	Удельная теплоемкость	Плотность
Сухой песок	0,26	800	1400
Песок влажностью 10 %	1,08	1025	1500
Алюминиевый блок	167	896	2800

Начальные и граничные условия:

$$T(0, x, y, z) = T_0(x, y, z); \quad T(t, x, y, z)|_{\Gamma} = T_{\Gamma}(x, y, z).$$

Оценка начального распределения температуры получается путем интерполяции с использованием значений температуры почвы в данном месте. Температура почвы меняется в зависимости от глубины и внешних условий. При достижении определенной глубины можно считать, что на температуру больше не влияет внешний тепловой поток или заглубленные предметы. Согласно экспериментальным наблюдениям установлено, что при глубине почвы 50 см температуру почвы можно считать постоянной, что представляет собой так называемый слой постоянной температуры. Таким образом, только верхняя поверхность подвергается воздействию воздуха, тепловой поток поверхности почвы определяет количество поглощаемой теплоты

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = q_{\text{net}}. \quad (2)$$

Вертикальная граница адиабатическая, то есть роль заглубления на вертикальной границе незначительна,

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0. \quad (3)$$

Поверхностный тепловой поток q_{net} определяется уравнением

$$q_{\text{net}} = q_{\text{sun}} + q_{\text{sky}} + q_{\text{conv}} - q_{\text{emis}} + Q_s. \quad (4)$$

Параметры материала, используемого в ходе экспериментальной части, приведены в табл. 1.

Имитационное моделирование

Полагаем, что в грунт (сухой песок) помещен объект (алюминиевый блок). В рамках вычислительного эксперимента измеряемая температура воздуха принималась за температуру окружающей среды, а измеренный коэффициент излучения поверхности почвы в равновесном состоянии – эталон излучения окружающей среды на почву. Температура нижней поверхности задавалась постоянной 20 °С, а периферии – адиабатической. Затем в течение 15 мин модельного времени участок почвы равномерно нагревался и остывал естественным образом. Тепловой контраст объекта с фоном количественно определялся на основе разницы средних температур поверхности почвы над объектом и почвы снаружи и вокруг объекта.

Результаты проведенного имитационного моделирования показали, что температура поверхности почвы повышается по мере ее нагрева и снижается при прекращении. Наличие объекта затрудняет теплообмен грунта, из-за чего температура поверхности почвы над объектом повышается быстрее, чем окружающая его почва, и медленнее падает. Контраст температуры поверхности непрерывно увеличивается, достигая пика при $t = 1440$ с.

Очевидно, что теплообмен требует времени, что вызывает задержку времени максимальной разницы температур по сравнению со временем максимальной температуры на поверхности почвы.

На рисунке 1 показано распределение температуры в сухом песке на его поверхности и по глубине почвы на временном интервале $t = 900$ с.

Очевидно, что температура поверхности непосредственно над объектом выше, чем в окружающей местности. Когда разница температур находится в пределах возможностей камеры, ее можно обнаружить. Из-за наличия объекта профиль температуры больше не является равномерным градиентным распределением. Наличие объекта в грунте сильно повлияло на температуру почвы, то есть затруднило изменение температуры почвы, что привело к более быстрому прогреву и более медленному охлаждению поверхности над ней.

Установлено, что изменение перепада температур на поверхности почвы соответствует разной глубине залегания объекта. Чем глубже глубина залегания объекта, тем больше контраст. При глубине в 10 мм разница температур составила $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 20 мм – $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 30 мм – разница намного меньше.

Очевидным остается тот факт, что тенденция контраста температуры поверхности между заглубленными объектами будет совершенно противоположна. Это связано с различными коэффициентами теплопроводности. Так, например, тротилловая шашка будет препятствовать передаче тепла вниз к грунту при нагреве, что приводит к большей температуре над ней, чем вокруг нее. Однако алюминий имеет лучшую теплопроводность, что может ускорить нисходящую теплопередачу почвы во время нагрева, так что температура поверхности алюминиевого блока ниже, чем его окружающая среда.

На основе этого факта можно легко идентифицировать и различать разные захороненные объекты по их конкретным характеристикам температуры поверхности. Это позволит улучшить вероятность обнаружения и снизить частоту ложных целей в процессе обнаружения заглубленных объектов в будущем.

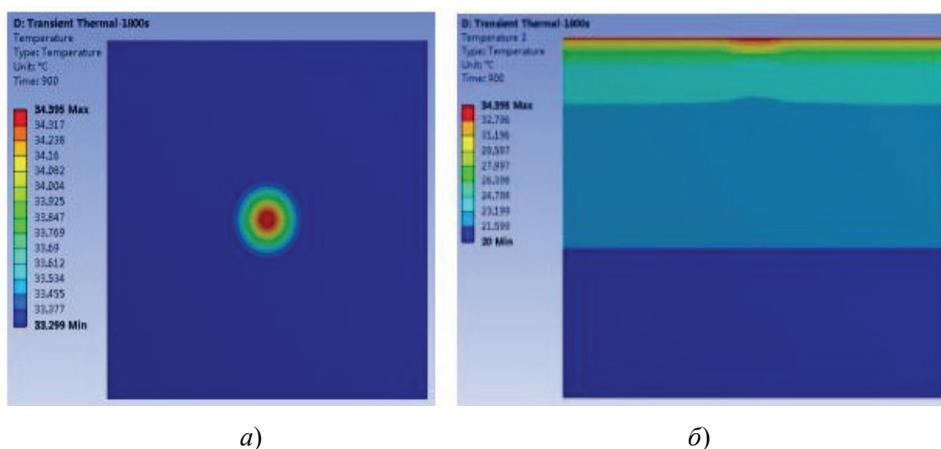


Рис. 1. Распределение температуры в сухом песке на его поверхности (а) и по глубине (б) при $t = 900$ с

Основываясь на приведенном анализе, можно найти лучший способ обнаружения заглубленного объекта в соответствии с различными характеристиками фона цели. Для очевидного случая цель-фон можно определить момент, когда температурный контраст поверхности достигает максимума, который может быть непосредственно обнаружен ИК-камерой. Это время будем считать лучшим моментом обнаружения (или интервалом). Мультивременные данные изображения используются для фильтрации фоновых помех и выделения цели, что, в свою очередь, позволяет снизить частоту ложных срабатываний. В том случае, если максимальная разница температур поверхности выходит за пределы возможностей камеры, необходимо увеличить мощность или увеличить время нагрева, чтобы усилить температурный сигнал, или добавить принудительную конвекцию на этапе охлаждения, чтобы инвертировать сигнал температуры охлаждения, а затем обнаружить усиленный сигнал.

На **втором** этапе исследования проведено имитационное моделирование с влажным грунтом. Математическое описание эксперимента выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha(x, y, z, \theta(t)) \nabla^2 T; \\ L \frac{d}{dt} \theta(t) = I(t) - D(t) - E(t). \end{cases} \quad (5)$$

Начальные и граничные условия:

$$T(0, x, y, z) = T_0(x, y, z); \quad \theta(0) = \theta_0; \quad T(t, x, y, z)|_{\Gamma} = T_{\Gamma}(x, y, z).$$

В классическом законе Дарси правая часть данной модели определяется выражениями:

$$I(t) = \min \left\{ Q(t), \frac{\Psi(t)}{A} \right\}; \quad D(t) = \frac{1}{B} \left(\Psi + \frac{L}{2} \right); \quad E(t) = \frac{E_T(t)}{C}. \quad (6)$$

Физическое объяснение указанной модели основано на следующих предпосылках: проникновение влаги через сеть макропор происходит равномерно и занимает весь объем почвенного слоя. В момент, когда поступающие осадки больше не могут впитываться почвой, излишек уходит на поверхность слоя. Таким образом возникает «запруживание». В данной модели вариант закона Дарси представляет почвенное осушение или дренаж, а также матричные силы, удерживающие воду [8 – 10].

Однако эта модель не в полной мере описывает динамику влагосодержания, поскольку эксперименты показали наличие гистерезисной зависимости между матричным потенциалом и удельным содержанием воды. Чтобы учесть это свойство, зависимость между матричным потенциалом и удельным содержанием воды моделируется с помощью оператора Преисаха P .

Приведем краткое описание соответствующего преобразователя. Для этого рассмотрим двухпозиционное реле с пороговыми числами α и β ($\alpha < \beta$).

Пространством состояний неидеального реле является пара чисел $(0, 1)$. Связь между входом $u(t) \in C[0, T]$ и переменным выходом $x(t) \in \{0, 1\}$ устанавливается оператором $R[\alpha, \beta, x_0]$ [8 – 10]

$$x(t) = R[\alpha, \beta, x_0]u(t). \quad (7)$$

При этом начальное состояние x_0 должно удовлетворять следующим условиям: если $u(0) \leq \alpha$, то $x_0 = 0$; если $u(0) \geq \beta$, то $x_0 = 1$; если $\alpha < u(0) < \beta$, то $x_0 = 0$ или $x_0 = 1$.

Выход преобразователя $x(t)$ ($0 \leq t \leq T$) определяется следующим набором правил:

$$\begin{cases}
 0, \text{ если } u(t) \leq \alpha, \\
 1, \text{ если } u(t) \geq \beta, \\
 x_0, \text{ если } u(t) \in (\alpha, \beta) \text{ при всех } \tau \in [0, t], \\
 x(t) = 0, \text{ если } u(t) \in (\alpha, \beta) \text{ и найдется такое} \\
 \quad t_1 \in [0, t], \text{ что } u(t_1) = \alpha \text{ и } u(\tau) \in (\alpha, \beta) \text{ при всех } \tau \in (t_1, t], \\
 1, \text{ если } u(t) \in (\alpha, \beta) \text{ и найдется такое} \\
 \quad t_1 \in [0, t], \text{ что } u(t_1) = \beta \text{ и } u(\tau) \in (\alpha, \beta) \text{ при всех } \tau \in (t_1, t].
 \end{cases} \quad (8)$$

Динамику входных-выходных соответствий неидеального реле демонстрирует рис. 2.

Представленный преобразователь определен на пространстве непрерывных функций и является детерминированным и статическим. Детальное описание данного преобразователя, а также его свойств, приведено в [8 – 10].

Для описания реальных гистерезисных явлений обычно используется континуальный аналог преобразователя, состоящего из семейства неидеальных реле, соединенных параллельно. Впервые такой преобразователь введен Прейсахом [8 – 10] для описания ферромагнитного гистерезиса. На основе дальнейших исследований установлено, что указанная модель может использоваться для формализации гистерезисных звеньев и допускает имплементацию в модели высокого уровня.

Рассмотрим множество Ω_ψ скалярных функций $\omega(\alpha, \beta)$, заданных на полуплоскости $P_{\alpha, \beta} \equiv \{\alpha, \beta : \alpha < \beta\}$, и таких, что

$$\omega(\alpha, \beta) = \begin{cases} 0, & \text{если } \alpha + \beta > \psi(\beta - \alpha); \\ 1, & \text{если } \alpha + \beta \leq \psi(\beta - \alpha). \end{cases} \quad (9)$$

Множество Ω_ψ – пространство состояний преобразователя Прейсаха, где $\psi(v) \in \psi$. На рис. 3 представлен элемент данного множества.

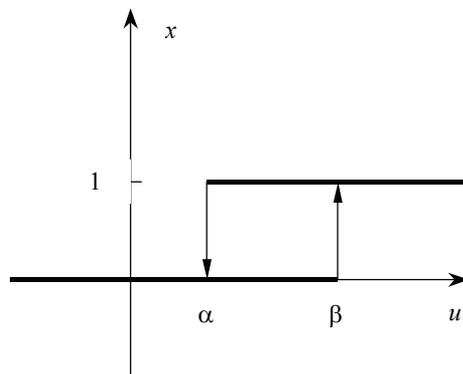


Рис. 2. Характеристика неидеального реле

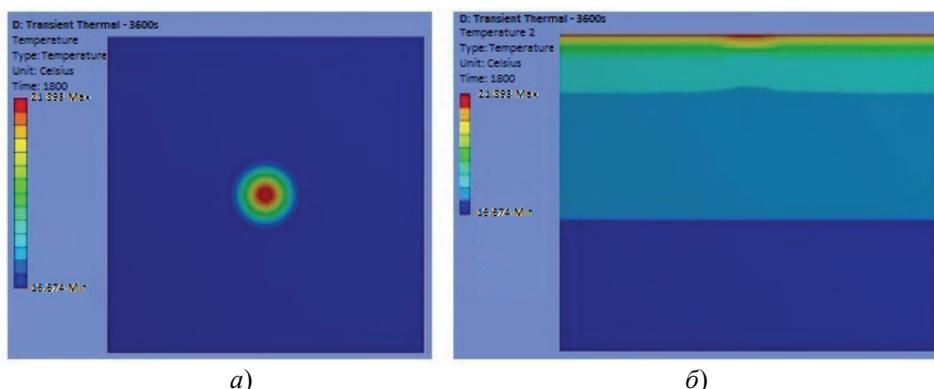


Рис. 4. Распределение температуры во влажном песке на его поверхности (а) и по глубине (б) при $t = 1800$ с

В отличие от результатов эксперимента с сухим песком, в мокром песке увеличилось время достижения пика нагрева $t = 2160$ с. Наличие объекта также затруднило теплообмен грунта, из-за чего поверхность почвы над объектом нагревалась быстрее, чем окружающая его почва, и медленнее падала.

На рисунке 4 показано распределение температуры поверхности и профиля почвы на временном интервале $t = 1800$ с. В отличие от результатов моделирования с сухим песком, при влажном песке увеличилось время его нагрева и максимальное значение температуры. Это связано с тем, что в силу теплового обмена равновесная температура в системе «вода – песок» оказалась ниже, чем в эксперименте с сухим песком (см. рис. 1). Кроме того, увлажненный песок повлиял на изменение перепада температур на поверхности почвы при разной глубине залегания объекта. В отличие от сухого песка, где разница температур в 4°C была достигнута на глубине 10 мм, такая же разница в мокром песке была на глубине 20 мм, минимальную же разницу удалось уловить на глубине 50 мм.

Эксперимент

Результаты имитационного моделирования послужили основой для проведения натурального эксперимента. Суть данного эксперимента заключалась в следующем: в ящик с песком массой 5 кг погружены 4 алюминиевых блока на глубины 10, 20, 30 и 35 мм соответственно. Над ящиком на высоте 2 м установлена лампа с возможностью изменения мощности нагрева. Выше лампы на высоте 4 м размещен тепловизор. Затем лампа включалась и нагревала песок в течение 15 мин, при этом регистрация нагрева песка проводилась тепловизором каждые 60 с. Временные ряды термограмм показаны на рис. 5.

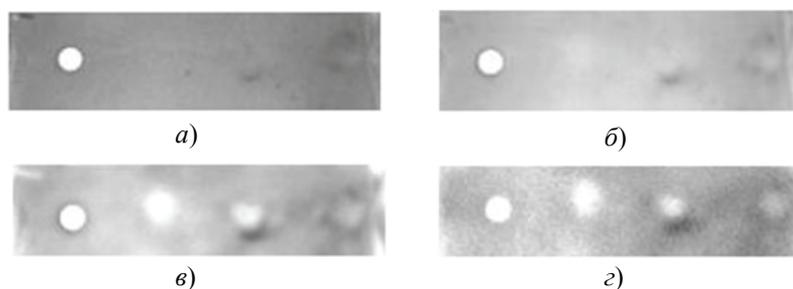


Рис. 5. Временные интервалы процесса нагрева-охлаждения сухого песка 1, 10, 15 и 20 минут (а – г соответственно)

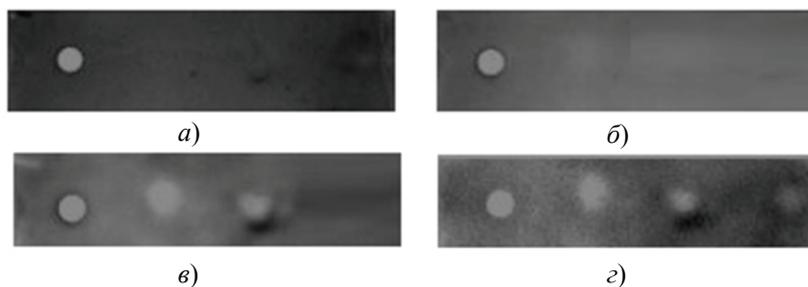


Рис. 6. Временные интервалы процесса нагрева-охлаждения влажного песка 10, 15, 20 и 25 минут (а – д соответственно)

Анализ временных термограмм свидетельствует, что в процессе нагрева и охлаждения температура поверхности над объектом отчетливо прослеживается. Кроме того, отчетливо просматривается температурный контраст за счет глубины залегания объекта. Также следует отметить, что разность температур поверхности достигает максимума после прекращения нагрева, при этом время запаздывания связано с глубиной залегания объекта, но мало связано со временем нагрева. Вероятность обнаружения можно повысить, обратившись к тренду разности температур поверхности и временному интервалу, в котором появляется контрастный пик.

В целях понимания, влияет ли влажность грунта на глубину определения заглубленного объекта, в песок добавим 600 г воды с температурой 10 °С и увеличим глубину залегания алюминиевых блоков на 10 мм, то есть теперь они залегают на 20, 30, 40 и 45 мм соответственно. Нагрев влажного песка ИК-лампой осуществлялся в течение 25 мин, регистрация показаний нагрева регистрировалась каждые 60 с. Временные ряды термограмм алюминиевых блоков во влажном песке показаны на рис. 6.

В отличие от временных термограмм сухого песка, за счет его увлажнения можно сделать следующие выводы: во-первых, промежуток времени, на котором отчетливо наблюдается нагретый объект, увеличился, скорее всего, это связано с большей влажностью, чем прежде; во-вторых, следует отметить, что влажный грунт повлиял на глубину распознавания заглубленного объекта.

Таким образом, проведенные эксперименты с сухим и влажным песком по обнаружению активного излучения в помещении подтвердили результаты имитационного моделирования.

Заключение

В работе предложен метод идентификации скрытых в почве объектов средствами ИК-диагностики с учетом динамически меняющегося влагосодержания земной поверхности. Указанный метод основывается на классических методах диагностики температурных контрастов, определяемых неоднородностями в сочетании с моделью динамически меняющегося влагосодержания в почве. Температурное поле строилось на основе решения прямой задачи теплопроводности в трехмерном пространстве. При этом влияние влагосодержания учитывалось параметрически и зависело от коэффициента теплопроводности и концентрации воды. В свою очередь, моделирование проникновения влаги основывалось на классическом законе Дарси и гистерезисной модели, базирующейся на преобразователе Прейсаха. Количественные показатели, полученные в рамках моделирования, свидетельствуют, что повышение влагосодержания в почве способствует увеличению контраста в ИК-изображениях скрытых объектов.

Список литературы

1. Kasban, H. A Comparative Study of Landmine Detection Techniques / H. Kasban, O. Zahran, M. Elaraby, M. El-Kordy, F. E. Abd El-Samie // *Sensing and Imaging*. – 2010. – Vol. 11, No. 3. – P. 89 – 112. doi:10.1007/s11220-010-0054-x
2. Esposito, S. Experimental Validation of an Active Thermal Landmine Detection Technique / S. Esposito, P. Fallavollita, M. Corcione, M. Balsi // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2014. – Vol. 52, No. 4. – P. 2020 – 2047. doi: 10.1109/TGRS.2013.2257798
3. Kaya, S. Buried and Surface Mine Detection from Thermal Image Time Series / S. Kaya, U. M. Leloglu // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 10, No. 10. – P. 4544 – 4552. doi:10.1109/JSTARS.2016.2639037
4. Deans, J. Analysis of a Thermal Imaging Method for Landmine Detection, Using Infrared Heating of the Sand Surface / J. Deans, J. Gerhard, L. J. Carter // *Infrared Physics & Technology*. – 2006. – Vol. 48, No. 3. – P. 202 – 216. doi:10.1016/j.infrared.2005.06.003
5. Deans, J. An Analysis of a Thermal Imaging Method for Landmine Detection Using Microwave Heating / J. Deans, G. Schmithals, L. J. Carter // *Journal of Applied Geophysics*. – 2001. – Vol. 47, No.2. – P. 123 – 133. doi:10.1016/S0926-9851(01)00052-0
6. Zadorozhniy, V. G. Stochastic Model of Heat Transfer in the Atmospheric Surface Layer / V. G. Zadorozhniy, V. S. Nozhkin, M. E. Semenov, I. I. Ul'shin // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. – 2020. – Vol. 60, No. 3. – P. 459 – 471. doi: 10.1134/S0965542520030173
7. Nozhkin, V. S. A Model of Advective Changes in Air Humidity: a Stochastic Approach / V. S. Nozhkin, V. G. Zadorozhniy, I. I. Ulshin, O. I. Kanishcheva // *International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation*. – 2020. – Vol. 11, No. 4. – P. 160 – 169. doi: 10.1504/IJESMS.2020.111273
8. Semenov, M. E. Oscillations under Hysteretic Conditions: from Simple Oscillator to Discrete Sine-Gordon Model / M. E. Semenov, O. O. Reshetova, A. V. Tolkachev, A. M. Solovyov, P. A. Meleshenko // In book: *Topics in Nonlinear Mechanics and Physics*. – 2019. – P. 229 – 253. doi:10.1007/978-981-13-9463-8_12
9. Borzunov, S. V. Hysteretic Converters with Stochastic Parameters / S. V. Borzunov, M. E. Semenov, N. I. Sel'vesyuk and P. A. Meleshenko // *Mathematical Models and Computer Simulations*. – 2020. – Vol. 12, No. 2. – P. 164 – 175. doi:10.1134/S2070048220020040
10. Semenov, M. E. Self-Oscillations in a System with Hysteresis: the Small Parameter Approach / M. E. Semenov, O. O. Reshetova, S. V. Borzunov, P. A. Meleshenko // *European Physical Journal Special Topics*. – 2021. – Vol. 230. – P. 3565 – 3571. doi:10.1140/epjs/s11734-021-00237-3

Identification of Hidden Objects in Conditions of Dynamically Changing Soil Moisture Content

M. E. Semenov¹, Zh. B. Kholmurodov², V. S. Nozhkin³

Department of Digital Technologies, Voronezh State University (1), Voronezh, Russia; Department of Theoretical Hydrometeorology (2), Department of Hydrometeorological Support (3), nozhkin-v@list.ru, Air Force Academy named Prof. N. E. Zhukovskiy and Yu. A. Gagarin, Voronezh, Russia

Keywords: unmanned aerial vehicle; soil moisture content; hysteresis; buried objects; Preisach converter.

Abstract: The study is devoted to the development of methods for infrared diagnostics of objects hidden in the soil, taking into account dynamically changing moisture content. Identification of hidden objects was built on the basis of solving the problem of heat conduction in three-dimensional space, taking into account thermal anomalies created by hidden objects. At the same time, the proposed model makes it possible to take into account dynamically changing indicators of soil moisture content. In turn, to simulate the penetration of moisture into the soil, a compilation of the classical Darcy law and a hysteresis model based on Preisach transducers was used. The main results of the work were obtained in the framework of simulation modeling. In particular, it has been found that an increase in the moisture content in the soil contributes to an increase in the contrast in the IR images of hidden objects.

References

1. Kasban H., Zahran O., Elaraby M., El-Kordy M., Abd El-Samie F.E. A comparative study of landmine detection techniques, *Sensing and Imaging*, 2010, vol. 11, no. 3, pp. 89-112. doi:10.1007/s11220-010-0054-x
2. Esposito S., Fallavollita P., Corcione M., Balsi M. Experimental validation of an active thermal landmine detection technique, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, vol. 52, no. 4, pp. 2020-2047. doi: 10.1109/TGRS.2013.2257798
3. Kaya S., Leloglu U.M. Buried and surface mine detection from thermal image time series, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, vol. 10, no. 10, pp. 4544-4552. doi:10.1109/JSTARS.2016.2639037
4. Deans J., Gerhard J., Carter L.J. Analysis of a thermal imaging method for landmine detection, using infrared heating of the sand surface, *Infrared Physics & Technology*, 2006, vol. 48, no. 3, pp. 202-216. doi:10.1016/j.infrared.2005.06.003
5. Deans J., Schmithals G., Carter L.J. An analysis of a thermal imaging method for landmine detection using microwave heating, *Journal of Applied Geophysics*, 2001, vol. 47, no. 2, pp. 123-133. doi:10.1016/S0926-9851(01)00052-0
6. Zadorozhniy V.G., Nozhkin V.S., Semenov M.E., Ul'shin I.I. Stochastic model of heat transfer in the atmospheric surface layer, *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2020, vol. 60, no. 3, pp. 459-471, doi:10.1134/S0965542520030173
7. Nozhkin, V.S., Zadorozhniy V.G., Ul'shin I.I., Kanishcheva O.I. A model of advective changes in air humidity: a stochastic approach, *International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation*, 2020, vol. 11, no. 4, pp. 160-169. doi: 10.1504/IJESMS.2020.111273
8. Semenov M.E., Reshetova O.O., Tolkachev A.V., Solovyov A.M., Meleshenko P.A. Oscillations under hysteretic conditions: from simple oscillator to discrete Sine-Gordon model, *In book: Topics in Nonlinear Mechanics and Physics*, 2019, pp. 229-253. doi:10.1007/978-981-13-9463-8_12
9. Borzunov S.V., Semenov M.E., Sel'vesyuk N.I., Meleshenko P.A. Hysteretic Converters with Stochastic Parameters, *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2020, vol. 12, pp. 164-175. doi:10.1134/S2070048220020040
10. Semenov M.E., Reshetova O.O., Borzunov S.V., Meleshenko P.A. Self-oscillations in a system with hysteresis: the small parameter approach, *European Physical Journal Special Topics*, 2021, vol. 230, pp. 3565-3571. doi:10.1140/epjs/s11734-021-00237-3

Identifizierung von versteckten Objekten unter Bedingungen des sich dynamisch verändernden Bodenfeuchtegehalts

Zusammenfassung: Die Arbeit ist der Entwicklung von Methoden zur Infrarotdiagnostik von im Boden verborgenen Objekten unter Berücksichtigung dynamisch veränderlicher Feuchtigkeitsgehalte gewidmet. Die Identifizierung versteckter Objekte wurde auf der Grundlage der Lösung des Problems der Wärmeleitung im dreidimensionalen Raum unter Berücksichtigung der durch versteckte Objekte erzeugten thermischen Anomalien aufgebaut. Gleichzeitig ermöglicht das vorgeschlagene Modell die Berücksichtigung dynamisch veränderlicher Bodenfeuchteindikatoren. Um wiederum das Eindringen von Feuchtigkeit in den Boden zu simulieren, ist die Zusammenstellung des klassischen Darcy-Gesetzes und des auf Preissach-Konvertern basierenden Hysterese Modells verwendet. Die Hauptergebnisse der Arbeit sind im Rahmen der Simulationsmodellierung erzielt. Insbesondere ist festgestellt, dass die Erhöhung des Feuchtigkeitsgehalts im Boden zur Erhöhung des Kontrasts in den IR-Bildern von versteckten Objekten beiträgt.

Identification des objets cachés dans des conditions de changement dynamique de la teneur en humidité du sol

Résumé: L'article est consacré au développement des méthodes de diagnostic infrarouge des objets cachés dans le sol, en tenant compte de l'évolution dynamique de la rétention d'humidité. L'identification des objets cachés est basée sur la résolution de la conductivité thermique dans l'espace tridimensionnel, en tenant compte des anomalies thermiques générées par les objets cachés. Le modèle proposé permet de tenir compte de l'évolution dynamique de la teneur en humidité du sol. Une compilation de la loi classique de Darcy et du modèle d'hystérésis basé sur les transducteurs de Preisach est utilisée pour modéliser la pénétration de l'humidité dans le sol. Les principaux résultats sont obtenus dans le cadre de la simulation. En particulier, est constaté que l'augmentation de la teneur en humidité dans le sol contribue à augmenter le contraste dans les images infrarouges des objets cachés.

Авторы: *Семенов Михаил Евгеньевич* – доктор физико-математических наук, профессор кафедры цифровых технологий, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия; *Холмуродов Жамшид Бахриддинович* – адъюнкт кафедры теоретической гидрометеорологии; *Ножкин Владимир Сергеевич* – кандидат технических наук, преподаватель кафедры гидрометеорологического обеспечения, ФГКВОУ ВО «ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия.
