

5. Рожков Л.Н. Методические подходы расчета углеродных пулов в лесах Беларуси // Экология, лесоводство и охотничье хозяйство. ISSN 1683-0377. Труды БГТУ, 2011. № 1. Лесное хозяйство. С. 62-70.

6. МГЭИК 2006, Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов, МГЭИК, 2006. Подготовлено Программой МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов, Игглестон Х.С., Буэндиа Л., Мива К., Нгара Т. и Танабе К. (редакторы). Том 4: Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования. Часть 1. ИГЕС, Япония.

7. Филипчук А.Н. Новые аспекты оценки поглощения парниковых газов лесами России в контексте Парижского соглашения об изменении климата [Электронный ресурс] / А.Н. Филипчук, Б.Н. Моисеев, Н.В. Малышева // Лесохоз. информ. : электрон.сетевой журн. – 2017. – № 1. – С. 88–98. URL: <http://lhi.vniilm.ru/>

УДК 504.064

В.М. Бурак, О.Н. Вавилонская, Е.А. Мойсейчик, А.Е. Мойсейчик
РУП «Бел НИЦ «Экология»

СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ ТЕПЛООБРАЗОВАНИЯ В МАССИВЕ ОТХОДОВ

Введение. В рамках ГП Союзного государства Беларуси и России «Мониторинг–СГ» РУП «Бел НИЦ «Экология» совместно с Институтом физики НАН Беларуси выполнил задание по созданию экспериментальной комплексной системы координированных спутниковых и наземных дистанционных наблюдений опасных выбросов в атмосферу и контроля крупномасштабного переноса загрязнений. При этом было установлено, что космический мониторинг позволяет выявлять экологически неблагоприятные территории и динамику их изменения, но в силу технических особенностей не решает ряда практически значимых локальных и др. задач в области охраны окружающей среды и рационального природопользования.

Новейшим направлением исследовательских работ в области охраны окружающей среды и рационального природопользования является комбинирование возможностей беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оснащенных миниатюрными приборами дистанционного исследования источников загрязнения окружающей среды, с соответствующими традиционными технологиями. В течение последних десятилетий в области БПЛА произошел технологический прорыв. Миниатюризация вычислительных систем и развитие спутниковой навигации (GPS/ГЛОНАСС) позволили создавать БПЛА, у которых габариты, масса, стоимость на порядки меньше прежних. Благодаря прогрессу в развитии гражданских беспилотных систем, миниатюризации приборов дистанционного контроля и систем обработки данных, сформировалась новая технология решения задач геоэкологического контроля природно-технических систем [1,2]. В зависимости от решаемых задач БПЛА могут оснащаться сменными бортовыми приборами: цифровой, тепловизионной, многоспектральной аппаратурой, радиометром-дозиметром гамма-излучения, детектором метана, газоанализатором (для различных газов), пылемером и др. В области охраны окружающей среды и рационального природопользования БПЛА широко применяются в зарубежных странах, в т. ч. в России и других странах СНГ.

Использование этой технологии в Беларуси находится в начальной стадии из-за отсутствия необходимого материального обеспечения.

Цель настоящей работы – обосновать структуру системы дистанционного контроля окружающей среды на основе теплообразования в массиве отходов с использованием малогабаритных беспилотных летающих аппаратов (БПЛА).

Требования к БПЛА. Достижения в области разработки датчиков и методов анализа данных делают системы дистанционной экодиагностики практичными и привлекательными для использования в исследованиях и управлении процессами, происходящими в массиве отходов. Такой способ диагностирования предполагает размещение измерительных приборов на специальных платформах, находящихся на некотором расстоянии от исследуемых объектов (на космических системах, самолетах, вертолетах, дирижаблях и т.д.) [1-3]. Системы крепления приборов к БПЛА должны удовлетворять ряду требований. Прежде всего, обеспечивать гиостабилизацию приборов видео- и ИК съемки (панорамной, плановой). Конструктивное исполнение должно обеспечивать надежное крепление отдельных приборов (или их комбинации), создающих различные полезные нагрузки на БПЛА. Не менее важны такие характеристики, как продолжительность и высота полета, возможность зависания над объектом, автономный полет по заданной программе, возможность работы в сложных метеоусловиях и с ограниченных площадок, долговечность и экономичность. Для решения задач экологического дистанционного контроля окружающей среды на основе теплообразования аппараты вертолётного типа могут оказаться наиболее перспективными [2, 3].

Физико-химические процессы и основы дистанционного измерения температуры твердых отходов. На свалках твердых бытовых отходов развиваются различные физико-химические процессы, приводящие к разогреву отдельных зон массива. Так, на подмосковных свалках в результате экзотермических химических реакций и микробиологических процессов температура на их поверхности достигает 33...37 °С (при температуре окружающего воздуха 0 °С) [4]. Возрастание температуры при приближении к очагам разогрева характеризуется градиентом порядка 4 °С/см [4]. Динамика разогрева массива отходов с начала их складирования приведена в работе американских исследователей (рис.1) [5]. В данном случае температура в теле отходов приближается примерно к 50 °С. В других ситуациях температура разогрева массива может быть иной, в том числе и более высокой, вызывающей тление и даже самовозгорание отходов.

Контроль температуры в теле свалки имеет важное значение для оценки потенциала теплообразования, планирования технологии и контроля процессов разложения в массиве твердых отходов. Такой контроль позволяет регулировать процессы биологического разложения в массиве и управлять выделением свалочных газов.

Температуру в экодиагностике используют в качестве основного диагностического параметра [5]. В этих же целях можно контролировать химический состав, излучательную и отражательную способность, прозрачность, соленость, кислотность, наличие микробиогенных и зоогенных факторов, концентрацию ионов и другие.

Большинство дистанционных температурных измерений производится в диапазонах инфракрасных и видимых лучей. Соотношения между температурой тела и характеристиками его излучения теоретически устанавливаются с помощью законов излучения (законы: Планка, Вина, Стефана–Больцмана, Кирхгофа).

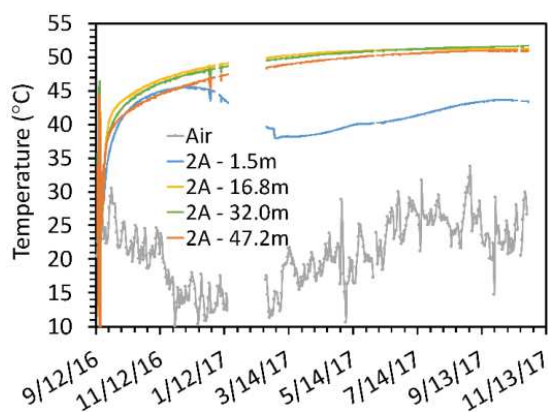


Рисунок 1– Изменение температуры в массиве отходов в направлении от поверхности к середине [5]

Формула Планка описывает распределение энергии в спектре излучения абсолютного черного тела:

$$W_{\lambda-b}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \cdot 10^{-6}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot \text{мкм}, \quad (1)$$

где $W_{\lambda-b}(\lambda, T)$ – спектральная излучательная способность черного тела (b–black body) на длине волны λ ; h – постоянная Планка, $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; k – постоянная Больцмана, $k = 1,4 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; c – скорость света, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; T – абсолютная температура черного тела; λ – длина волны.

Продифференцировав формулу Планка (1) по λ и приравняв полученное выражение нулю, найдем выражение для длины волны, соответствующей максимумам спектральной излучательной способности при различных температурах, которое выражает **закон смещения Вина**:

$$\lambda_{\max}(T) = \frac{2898}{T}, \text{ мкм}. \quad (2)$$

В соответствии с законом Вина при повышении температуры тела максимум спектральной излучательной способности смещается в сторону коротких длин волн. Из формулы (2) следует, что тело при комнатной температуре 300 К имеет максимум спектральной излучательной способности на длине волны 9,7 мкм (длинноволновая инфракрасная область).

Интегрирование формулы Планка (1) от $\lambda = 0$ до $\lambda = \infty$ дает выражение для интегральной излучательной способности черного тела

$$W_b(T) = \sigma T^4, \text{ Вт} \cdot \text{м}^2, \quad (3)$$

Выражение (3) описывает **закон Стефана–Больцмана**: интегральная излучательная способность черного тела (W_b) пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры (T).

Величина $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} \approx 5,6696 \cdot 10^{-8}$, Вт/(м²·К) – постоянная Стефана-Больцмана.

Обычные тела не являются абсолютно черными. Им присуще не полное поглощение падающего излучения. Поэтому сформулированные законы Планка и Стефана–Больцмана могут применяться к ним с введением некоторых уточнений. На рисунке 2 схематически изображены процессы взаимодействия объекта с энергией падающего излучения W_0 . Индексами ρ , α , τ выделены, соответственно, падающее на тело, отражённое, поглощенное, прошедшее через тело излучение.

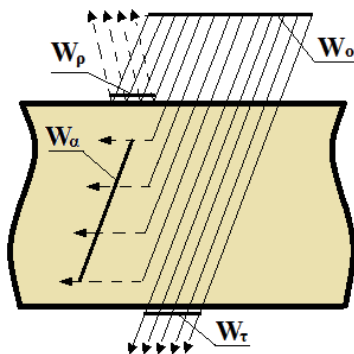


Рисунок 2 – Схема взаимодействия энергии падающего излучения с веществом объекта

Пусть мощность падающего излучения W_0 при взаимодействии с телом разделяется на потоки (рис. 2): 1) частично отражается от тела (W_ρ), 2) частично поглощается (W_α) и 3) частично проходит сквозь тело (W_τ), тогда $W_\rho + W_\alpha + W_\tau = W_0$. Разделив обе части этого равенства на W_0 , получим

$$\frac{W_p}{W_0} + \frac{W_\alpha}{W_0} + \frac{W_\tau}{W_0} = 1. \quad (4)$$

Выражение (4) представим в виде:

$$\rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (5)$$

В формуле (5) для описания взаимодействия мощности или энергии падающего излучения с объектом используются три коэффициента:

$\rho_\lambda(\lambda) = \frac{W_p}{W_0}$ – спектральный коэффициент отражения, который находится как отношение мощности, отраженной на определенной длине волны W_p , ко всей падающей мощности W_0 .

$\alpha_\lambda(\lambda) = \frac{W_\alpha}{W_0}$ – спектральный коэффициент поглощения. Он определяется как отношение мощности поглощенной на определенной длине волны W_α ко всей падающей мощности W_0 .

$\tau_\lambda(\lambda) = \frac{W_\tau}{W_0}$ – спектральный коэффициент пропускания, равный отношению мощности, прошедшей сквозь объект на определенной длине волны W_τ , ко всей падающей мощности W_0 .

Коэффициенты ρ_λ , α_λ , τ_λ называют спектральной отражательной, поглощательной и пропускательной способностью, соответственно. Для описания части излучения черного тела, испускаемого реальными телами, вводят **спектральный коэффициент излучения** – $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$, который представляет отношение спектральной мощности излучения объекта к спектральной мощности излучения черного тела при одних и тех же температуре и длине волны. Выражение для спектрального коэффициента излучения можно записать как отношение спектральной излучательной способности объекта W_{λ_Obj} к спектральной излучательной способности черного тела W_{λ_b} :

$$\varepsilon_\lambda(\lambda, T) = \frac{W_{\lambda_Obj}(\lambda, T)}{W_{\lambda_b}(\lambda, T)} \quad (6)$$

Коэффициент излучения $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$ характеризует тип излучателя:

- черное тело $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = 1$;
- серое тело $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = \text{const}$, $\varepsilon < 1$;
- избирательный излучатель $\varepsilon_\lambda = f(\lambda, T)$, $\varepsilon_\lambda \leq 1$.

ε – обозначение постоянного коэффициента излучения, не зависящего от длины волны.

Таким образом, коэффициент ε_λ (6), принимая значения от 0 до 1, показывает какая доля энергии черного тела излучается объектом на длине волны λ , то есть ε_λ характеризует степень черноты тела. Введение спектрального коэффициента излучения ε_λ позволяет записать законы Планка и Стефана – Больцмана для тел, не являющимися черными. Так, для серого тела формула Планка переписется:

$$W_{\lambda_gray}(\lambda, T) = \varepsilon \cdot W_{\lambda_b}(\lambda, T), \quad (7)$$

а для избирательного излучателя:

$$W_{\lambda_sel}(\lambda, T) = \varepsilon_\lambda(\lambda, T) \cdot W_{\lambda_b}(\lambda, T). \quad (8)$$

Закон Стефана–Больцмана для серого и избирательного излучателя примет вид:

$$W_{gray}(T) = \varepsilon \cdot W_b(T), \quad (9)$$

$$W_{sel}(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_\lambda(\lambda, T) \cdot W_{\lambda_b}(\lambda, T) d\lambda. \quad (10)$$

Введенные выше понятия: спектральная излучательная способность W_λ и коэффициент спектрального поглощения – $\alpha_\lambda(\lambda, T)$ позволяют сформулировать **закон Кирхгофа** для теп-

лового излучения любых материальных тел. Если поместить несколько различных тел с неравными температурами в откачанную адиабатическую оболочку с идеально отражающими стенками, то обмен энергией между телами возможен только за счет излучения и поглощения ими электромагнитных волн. Излучение, испускаемое одним телом, может частично или полностью отражаться, поглощаться или проходить сквозь другие тела. Температура более нагретых тел при излучении будет понижаться, а температура менее нагретых тел, поглотивших излучение, будет повышаться. По законам термодинамики через некоторое время все тела будут иметь одну и ту же температуру и установится равновесное состояние между тепловым излучением тел и поглощением ими электромагнитных волн. Для этого случая Кирхгоф сформулировал один из **основных законов теплового излучения: отношение спектральной излучательной способности объекта – $W_{\lambda \text{ обь}}(\lambda, T)$ к спектральному коэффициенту поглощения объекта – $\alpha_{\lambda}(\lambda, T)$ не зависит от природы тела и является универсальной функцией $W_{\lambda \text{ в}}(\lambda, T)$, зависящей только от температуры и длины волны.** Из закона Кирхгофа следует, что излучательная способность тела $W_{\lambda \text{ обь}}$ тем больше, чем больше его спектральный коэффициент поглощения – α_{λ} . Также из закона Кирхгофа следует, что всякое тело при данной температуре излучает преимущественно на тех длинах волн, которые оно при той же температуре сильнее всего поглощает.

О структуре системы дистанционного контроля окружающей среды на основе теплообразования. Тепловая экодиагностика осуществляется в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах длин волн с помощью фотографических, телевизионных и оптико – электронных сканирующих приборов. Приборы дистанционного зондирования бывают двух основных типов – активные и пассивные. Активные приборы используют собственный источник энергии для освещения диагностируемых объектов. Пассивные датчики обнаруживают энергию излучения, которая испускается или отражается наблюдаемым объектом. Большинство пассивных систем, используемых в практике дистанционного зондирования, работают в видимой, инфракрасной, тепловой инфракрасной и микроволновой частях электромагнитного спектра.

Для регистрации и анализа собственного теплового излучения объектов часто используют тепловизионную аппаратуру (тепловизоры). **Тепловизор** – это оптико-электронный прибор, предназначенный для бесконтактного (дистанционного) наблюдения, измерения и регистрации пространственного/ пространственно-временного распределения радиационной температуры объектов, находящихся в поле зрения прибора, путем формирования временной последовательности термограмм и определения температуры поверхности объекта по известным коэффициентам излучения и параметрам съемки (температура окружающей среды, пропускание атмосферы, дистанция наблюдения и т. п.) (СТБ ГОСТ Р 8.619-2009. Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки). Современные тепловизоры изготавливаются в стационарном и переносном исполнении с функцией аудиозаписи и видеотермографирования. Диапазон измерений большинства тепловизоров, применяемых для решения профессиональных задач тепловой экодиагностики, составляет от минус 30 до 650°C с абсолютной и относительной погрешностью ± 2 °C и ± 2 % соответственно. К наиболее известным отечественным и зарубежным производителям тепловизионного оборудования следует отнести FlukeCorporation (США), FLIR Systems (США), Testo SE & Co. KGaA (Германия), ООО «ИРТИС/IRTIS» (Россия), и др.

Третьей составляющей системы экодиагностики должны быть приборы исследования массива отходов (его морфологических особенностей, слоев, неоднородностей и т.д.), загрязненности почвы и грунтов, нахождения утечек веществ, мест захоронения отходов и установления их характеристик и др. Такие задачи решаются с использованием георадаров.

Список использованных источников

1. Андреев, В.Л. Геоэкологический мониторинг природно-технических систем на основе беспилотных летательных аппаратов/ В.Л. Андреев, В.И.Биненко, Р.В. Иванов// Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, 2011, №18. – С.139-150.

2. Пашкевич, М. А. Использование малогабаритных беспилотных летательных аппаратов в целях экологического мониторинга / М. А. Пашкевич, А. С. Данилов, Ю. Д. Смирнов // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики : сборник научных трудов 9-й Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. В 2 т. Т. 2 / под общ.ред. А. Б. Копылова, И. А. Басалай. – Минск : БНТУ, 2013. – С. 79 – 85.

3. Беспилотные летательные аппараты: справочное пособие.–Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2015.–620с.

4. Лаврентьев, А.А. Загрязнение атмосферы в районе полигонов по переработке отходов/Вестник ФГОУ ВПО МГАУ, 2008, № 1.– С.84–85.

5. Faitli, J. Characterization of thermal properties of municipal solid waste landfills/ J.Faitli, T.Magyar, A. Erdélyi, A. Murányi// Waste Management, v. 36, 2015.– p.213–221.

УДК 556.167 (476)

Е.Е. Петлицкий, М.В. Водейко
РУП «ЦНИИКИВР»

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ МИНИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ ДЛЯ РЕК НЕМАНСКОГО БАССЕЙНА

Для исследования речного стока в меженные периоды по основным рекам, принадлежащим к Неманскому бассейну, были проведены подробные расчеты основных статистических характеристик минимальных среднемесячных расходов воды за период зимней и летне-осенней межени.

Исследования проводились по всем существующим ранее и сейчас гидрологическим постам, охватывающим всю территорию Неманского бассейна – 54 гидрологического поста.

В связи с тем, что не все ряды гидрологических наблюдений представляли достаточную длительность для получения надежных статистических характеристик – либо короткие ряды, либо с большими перерывами в наблюдениях – необходимо было восстановить недостающую гидрологическую информацию. Для выполнения работ по удлинению этих рядов использовался метод корреляционного анализа на основании подбора соответствующих створов – аналогов в соответствии с законами гидрологической аналогии в условиях формирования речного стока, в том числе в меженные периоды [1].

Таким образом, на основании выбранного подобия «расчетный створ – створ-аналог» был проведен корреляционный анализ связей между расчетным створом и подобранном гидрологическим аналогом по среднемесячным расходам воды за каждый месяц в течение года. В результате восстановленных по уравнениям связи стоковых величин существенно расширился исходный массив данных расходных характеристик рек по функционирующим и закрытым гидрологическим постам. В бассейне реки Неман были продлены ряды в 25 стационарных створах.

Полученные данные с учетом удлинённых (восстановленных) рядов стока позволили получить в расчетном створе следующие характеристики: средняя величина минимального среднемесячного расхода воды (за зимнюю и летне-осеннюю межень) за весь период многолетних наблюдений и соответствующее значение коэффициента вариации (C_v). По каждому речному створу оценено 16 статистических параметров (8 для зимней межени и 8 для летне-осенней межени). Весь массив этих параметров описывает многолетние особенности меженных расходов воды в 53 створах бассейна реки Неман с рекой Виляя. На основе эмпирических кривых обеспеченностей показаны характерные ординаты – среднемесячные минимальные расходы воды обеспеченностью 50%, 75%, 80%, 90% и 95%. Кроме этого по-