

расчета с учетом национальных условий и особенностей устоявшихся толкований определенных и терминов. Кроме того, в Рекомендации регулярно вносят изменения [4].

Следует отметить, что данные инвентаризации ПГ являются основой для подготовки национальных сообщений и других отчетных документов Республики Беларусь для Секретариата РКИК ООН и Парижского соглашения, выполнения прогнозов выбросов ПГ разработкой национальных программных и стратегических документов в области изменения климата [2].

#### Список использованных источников

1. Хамзина Ш.Ш., Кадырова М.С., Шереметьев Д.В. Подходы к оценке и инвентаризации выбросов парниковых газов. Вестник КазНУ. Серия экологическая. №2/2 (38), 2013. С. 384–387.

2. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2017 гг. РУП "Бел НИЦ "Экология", Минск, 2018. 220 с.

3. Коротков В.Н., Романовская А.А. Особенности учета выбросов и стоков парниковых газов при облесении, обезлесении и лесоуправлении в рамках отчетности по киотскому протоколу // Труды Санкт-петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства № 2. Санкт-Петербург, 2013. С. 12–15.

4. Национальная система мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь: результаты наблюдений, 2016 год / [Электронный ресурс]. Электрон.текстовые, граф. дан. (21 Мб), – Минск, Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, 2017. С. 265–297.

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., Буэндия 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 гиросtabilization 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 вертолетного 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).

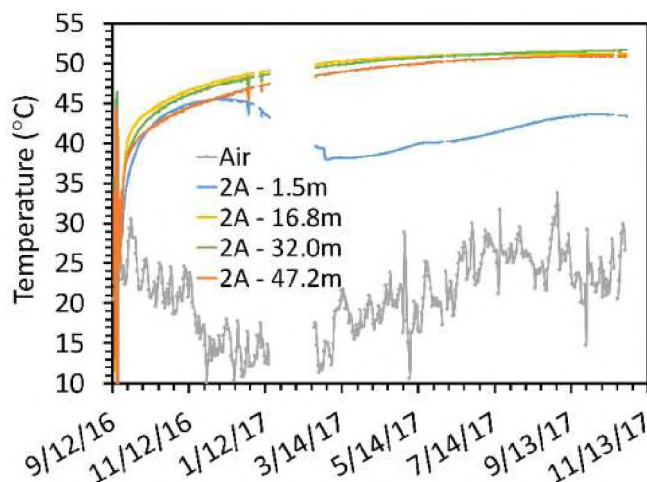


Рисунок 1– Изменение температуры в массиве отходов в направлении от поверхности к середине [5]

**Формула Планка** описывает распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела:

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

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

Продифференцировав формулу Планка (1) по  $\lambda$  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  $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} \approx 5,6696 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  – 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  $\rho$ ,  $\alpha$ ,  $\tau$  выделены, соответственно, падающее на тело, отражённое, поглощенное, прошедшее через тело излучение.

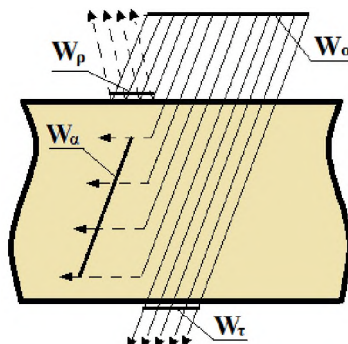


Рисунок 2 – Схема взаимодействия энергии падающего излучения с веществом объекта

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

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

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:

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

Коэффициенты  $\rho_\lambda$ ,  $\alpha_\lambda$ ,  $\tau_\lambda$  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  $W_{\lambda\_об\gamma}$  к спектральной излучательной способности черного тела  $W_{\lambda\_б}$ :

$$\varepsilon_\lambda(\lambda, T) = \frac{W_{\lambda\_об\gamma}(\lambda, T)}{W_{\lambda\_б}(\lambda, T)}. \quad (6)$$

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  $\varepsilon_\lambda = f(\lambda, T)$ ,  $\varepsilon_\lambda \leq 1$ .
- $\varepsilon$  – обозначение постоянного коэффициента излучения, не зависящего от длины волны.

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

(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  $W_\lambda$  и коэффициент спектрального поглощения –  $\alpha_\lambda(\lambda, T)$  позволяют сформулировать **закон Кирхгофа** для теплового 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 –  $W_{\lambda\_obj}(\lambda, T)$  к спектральному коэффициенту поглощения объекта –  $\alpha_\lambda(\lambda, T)$  не зависит от природы тела и является универсальной функцией  $W_{\lambda\_b}(\lambda, T)$ , зависящей только от температуры и длины волны.** Из закона Кирхгофа следует, что излучательная способность тела  $W_{\lambda\_obj}$  тем больше, чем больше его спектральный коэффициент поглощения –  $\alpha_\lambda$ . 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 излучение, 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 видеотермо-

графирования. Диапазон измерений большинства тепловизоров, применяемых для решения профессиональных задач тепловой экодиагностики, составляет от минус 30 до 650°C с абсолютной и относительной погрешностью  $\pm 2^\circ\text{C}$  и  $\pm 2\%$  соответственно. К наиболее известным отечественным и зарубежными производителям тепловизионного оборудования следует отнести Fluke Corporation (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 подобранным гидрологическим аналогом по среднемесячным расходам воды за каждый месяц в течение года. В результате восстановленных по уравнениям связи стоковых величин существенно