

УДК 535.15

# МОНИТОРИНГ ОЧАГОВ ВОЗГОРАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

© 2024 г. Д. А. Жиляев, Б. М. Смирнов\*, Д. В. Терешонок

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

\*E-mail: bmsmirnov@gmail.com

Поступила в редакцию 13.06.2024 г.

После доработки 28.08.2024 г.

Принята к публикации 08.10.2024 г.

Дополнительно к современным методам мониторинга температуры объектов, находящихся на поверхности Земли, предложен метод обнаружения очагов возгорания по повышенной концентрации молекул углекислого газа. В основу данного метода положены спектроскопические измерения. Проанализировано изменение потока излучения молекул углекислого газа на лазерных линиях (в области 10.6 и 9.4 мкм), которые попадают в окно прозрачности атмосферы. Это изменение определяется как увеличением концентрации молекул углекислого газа у поверхности Земли, которые выделяются в результате горения, так и повышенной температурой излучающих молекул. Проанализированы возможности предлагаемого метода.

DOI: 10.31857/S0040364424060143

## ВВЕДЕНИЕ

Тепловизоры широко используются для определения температуры объектов на основании испускаемого ими инфракрасного (ИК) излучения. Современные тепловизоры позволяют определить температуру объектов с точностью до сотых долей градуса [1]. В процессе развития техники тепловизоров разработаны оптимальные материалы для фокусировки, отражения, распределения по длинам волн и детектирования ИК-излучения [2, 3]. Одним из направлений использования тепловизора является обнаружение очагов горения в пожарном деле. В этом случае тепловизор направляется на поверхность и риск возгорания объекта определяется по температуре его поверхности.

Однако этот риск может быть установлен на основании концентрации углекислого газа вблизи объекта, поскольку его возгорание – это результат теплового взрыва при окислении углерода объекта, а продуктом этого окисления является углекислый газ. Для этой цели может быть использован лазерный усилитель на углекислом газе, который работает в области длин волн с центрами 9.4 и 10.6 мкм и перестраивается в этой области длин волн на основе фурье-преобразователя [4]. В случае измерения в естественной атмосфере важно, что данная область длин волн попадает в область прозрачности атмосферы. Совокупность указанной измерительной техники дает возможность определять тем-

пературу атмосферного воздуха по излучению молекул углекислого газа в отмеченной области длин волн. В этом случае измерительная аппаратура в виде вращающегося тепловизора с усилителем расположена на самолете или дроне, находящемся на высоте порядка километра, и собирает излучение атмосферы примерно на той же высоте в области радиусом в несколько километров. Положение зон подземного возгорания устанавливается по повышенной температуре воздуха над ними. Целью данной работы является обоснование предложенного метода детектирования очагов возгорания применительно к лесам.

Развитие приборной техники, основанной на усилении и детектировании инфракрасного излучения, позволяет фиксировать небольшие потоки излучения на расстоянии и проводить мониторинг очагов возгорания лесов. Целью мониторинга является установление очагов подземного возгорания находящихся там органических продуктов. Это горение затруднено из-за отсутствия кислорода в зоне горения, и его продукты вырываются из-под земли наружу в виде струй воздуха с повышенной температурой и высокой концентрацией углекислого газа. Далее эти струи перемешиваются с воздухом, так что температура и концентрация углекислого газа в нем выше, чем в окружающем воздухе.

С помощью тепловизора пожарные подразделения производят поиск очагов возгорания, что особенно актуально в условиях сильного задым-

ления. При этом тепловизор дистанционно позволяет определить температуру пламени или находящихся рядом объектов, конструкций. Все это значительно повышает скорость принятия оперативных решений. Тепловизор (тепло + лат. visio – зрение) – устройство для наблюдения за распределением температуры исследуемой поверхности. В рамках развивающегося метода термографии распределение температуры отображается на дисплее как цветная картинка, где разным температурам соответствуют разные цвета.

Метод идентификации объектов на поверхности Земли со спутников и самолетов по их излучению в ИК-области спектра имеет богатую историю. Еще пятьдесят лет назад был продемонстрирован способ обнаружения движущихся подводных лодок. Оказалось, что теплая струя, создаваемая двигателем подводной лодки, выходит на поверхность открытой воды и сохраняется там в виде следа, который виден, пока подводная лодка проходит путь в несколько километров [5]. Другой пример связан с обнаружением со спутника заболевших ковидом в Китае, которые выделялись из толпы идущих людей по повышенной температуре. Современные методы мониторинга поверхности Земли со спутников на основе тепловизоров позволяют различать нагретые объекты на поверхности Земли размежевом в несколько метров [5]. В этом случае фиксируется тепловое излучение объектов, находящихся на поверхности Земли. Возникают и другие ситуации, когда температура объекта меняется слабо, но он является источником дополнительного излучения. В случае, когда возгорание лесов не связано с деятельностью человека, оно формируется под землей, где из-за повышенной температуры происходит окисление органических остатков. Далее при определенных условиях оно может вырваться наружу, где усиление горения связано с более интенсивным приходом кислорода.

В данной работе рассматривается метод выявления объектов – источников углекислого газа. Основой метода является увеличение потока излучения, создаваемого молекулами углекислого газа, в области нахождения этих объектов с использованием принципов переноса инфракрасного излучения в атмосфере [6–8]. Рассматриваемая область длин волн попадает в окно прозрачности атмосферы, занимающее диапазон длин волн от 8 до 12 мкм. Отметим, что спектр излучения углекислого газа в атмосферном воздухе состоит из спектральных линий, каждая из которых отвечает определенному переходу между вращательными или колебательно-вращательными состояниями атмосферных молекул. В случае молекулы углекислого газа при не-

очень больших значениях вращательного числа  $j$  разности энергий для соседних колебательно-вращательных переходов одинаковы и составляют примерно  $1.6 \text{ см}^{-1}$ , тогда как ширина спектральной линии для рассматриваемых переходов равна примерно  $0.1 \text{ см}^{-1}$  при атмосферном давлении. При этом отношение интенсивностей излучения в центре спектральной линии и посередине между соседними линиями равно примерно 40 при комнатной температуре. Это показывает возможность разделения соседних линий и их идентификации.

Согласно закону Вина, данные переходы происходят наиболее интенсивно при температурах 400–500 К. Поскольку температура воздуха в очаге горения превышает тысячу градусов, предлагаемый метод позволяет выявлять очаги горения по следам продуктов горения, если они находятся глубоко под землей. В частности, большой бедой нашего времени стало горение лесов в сухую погоду особенно в труднодоступных местах, таких как Сибирь и Дальний Восток. Существенно, что очаги возгорания формируются в течение долгого времени под землей на глубине нескольких метров, где находятся органические остатки и теплоотвод ограничен. Подземное горение лимитируется проникновением кислорода в зону горения, и поэтому формирование очага горения составляет несколько суток. После этого горение выходит наружу и с высокой скоростью распространяется по поверхности Земли. Своевременное выявление очагов горения является важной задачей при борьбе с горением лесов.

Мониторинг очагов подземного горения может быть осуществлен со спутников или дронов в безоблачную погоду, когда они в основном и формируются, с помощью тепловизоров. Однако спектроскопические приборы, работающие как детекторы и усилители излучения в области лазерных переходов для углекислого газа с длиной волны 9.4 и 10.6 мкм, имеют на порядки величины более высокую чувствительность.

## МЕТОД ДЕТЕКТИРОВАНИЯ МОЛЕКУЛ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ

Рассмотрим характер прохождения фотона, рожденного вблизи поверхности Земли, через атмосферу. Геометрия процесса измерения представлена на рис. 1. Здесь  $R$  – радиус зоны с повышенным содержанием углекислого газа,  $L$  – расстояние,  $\Omega$  – телесный угол. Детектор излучения расположен на спутнике и характеризуется площадью  $s$ , на которой регистрируются фотоны,  $V$  – эффективный объем, из которого излучаются фотоны. Если предполагать, что фотоны излучаются изотропно, число фотонов  $K_{\omega}$ , реги-

стрируемых в единицу времени детектором, составит

$$K_{\omega} = \frac{s}{4\pi L^2} N_{\omega} V g(u_{\omega}). \quad (1)$$

Здесь  $N_{\omega}$  – число фотонов с данной частотой, испускаемых единицей объема;  $g(u_{\omega})$  – вероятность поглощения фотона с данной частотой на пути от источника до детектора;  $u_{\omega}$  – оптическая толщина атмосферы на пути фотона. Входящая в формулу (1) вероятность выживания фотона при перпендикулярном направлении к поверхности Земли определяется выражением [9]

$$g(u_{\omega}) = 2 \int_0^1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{u_{\omega}}{\cos \theta}\right) \right] d \cos \theta.$$

Оптическая толщина атмосферы равна

$$u_{\omega} = \int k_{\omega} dz,$$

где интеграл берется по пути фотона в направлении, перпендикулярном к поверхности Земли;  $dz$  – элемент пути фотона;  $k_{\omega}$  – коэффициент поглощения фотона с данной частотой в данной точке атмосферы. В случае изотропной эмиссии фотонов, как это имеет место на практике, входящая в формулу (1) вероятность выживания фотона с данной частотой в области оптических толщин  $u_{\omega} \sim 1$  аппроксимируется зависимостью [9]

$$g(u_{\omega}) = \exp(-1.6u_{\omega}).$$

Очевидно, детектирование излучения, генерируемого на поверхности Земли и фиксируемого на больших высотах, относится к окну прозрачности атмосферы, и средняя оптическая толщина атмосферы в этой области длин волн составляет примерно  $u_{\omega} = 0.15$  [10, 11]. Предельные возможности тепловизоров можно оценить при условии, что они позволяют фиксировать изменение температуры объекта с площадью порядка  $1 \text{ м}^2$  на величину  $\sim 0.1 \text{ К}$ . В этом случае относительное изменение потока излучения составляет порядка  $10^{-3}$ . При данных условиях это соответствует изменению мощности излучения объекта на величину около  $0.1 \text{ Вт}$ .

Таким образом, современные методы изучения объектов, находящихся на поверхности Зем-

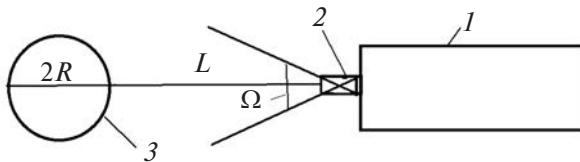


Рис. 1. Характер детектирования излучения с поверхности Земли: 1 – Земля; 2 – объект, источник излучения; 3 – детектор излучения.

ли, заключаются как в сканировании отраженного света, так и в измерении параметров собственного излучения объекта в инфракрасном и видимом спектре. Минимальная площадь исследуемых объектов оценивается как  $1 \text{ м}^2$ , а относительная разность потоков в исследуемой и окружающей областях составляет 0.1%.

### ПОТОКИ ИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ ЗА СЧЕТ МОЛЕКУЛ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

В отличие от стандартного метода детектирования излучения, относящегося к малым объектам на поверхности Земли, в представленном методе сравниваются потоки излучения в узкой спектральной области, причем детектируемое излучение усиливается с использованием лазерных усилителей на углекислом газе. Результаты сравнения сигналов над предполагаемой зоной возгорания и в соседней области поверхности Земли позволяют выявить зоны возгорания на основе повышенной концентрации углекислого газа над ней. Прежде чем анализировать возможности этого метода, представим особенности излучения атмосферных молекул углекислого газа, а также их участия в поглощении сигнала.

На рис. 2 представлена схема колебательных переходов для низких колебательных состояний молекулы углекислого газа [9] с учетом параметров излучательных переходов, взятых из банка данных HITRAN [12, 13]. Три атома молекулы  $\text{CO}_2$  расположены на одной прямой. Реализуются три типа колебаний:  $v_1$  – симметричные,  $v_2$  – деформационные и  $v_3$  – антисимметричные.

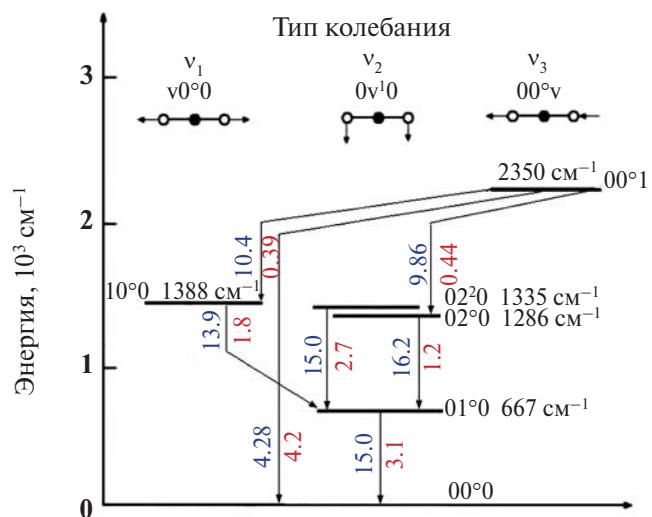


Рис. 2. Энергетические уровни и спектр для низких вибрационных состояний молекулы  $\text{CO}_2$ , построенные на основе банка данных HITRAN [12, 13]: слева от стрелки указана длина волны в мкм, справа – коэффициент Эйнштейна в  $\text{s}^{-1}$ .

трические колебания. Энергии возбуждения выражены в  $\text{см}^{-1}$ , длины волн для перехода между колебательными состояниями с нулевым вращательным моментом показаны слева от прямых и даны в мкм, а коэффициенты Эйнштейна для этих переходов — справа и выражены в  $\text{s}^{-1}$ . Вычислим дополнительные потоки излучения, которые создаются инжектируемыми в атмосферу молекулами углекислого газа в результате действия локальных очагов возгорания. Видимо, наиболее удобными для этого являются лазерные переходы  $001 \rightarrow 100$  и  $100 \rightarrow 020$  на длинах волн 10.6 и 9.4 мкм. Эти переходы удобны для рассматриваемого метода, поскольку имеются лазеры и лазерные усилители, работающие в данной области длин волн.

Для расчетов используется компьютерная программа [14]. В нее включены главные парниковые компоненты (молекулы воды и углекислого газа), облака, которые состоят из микрокапель воды, а также следовые компоненты —  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$ , хотя их вклад в парниковый эффект атмосферы мал. Высотные профили плотностей для молекул воды и углекислого газа, а также их плотности у поверхности Земли берутся в соответствии с моделью стандартной атмосферы [15]. Высота границы облаков, составляющая несколько километров, выбирается так, чтобы рассчитанный полный поток излучения на поверхность Земли отвечал измеренному, используемому в энергетическом балансе Земли. Однако эти параметры могут изменяться в соответствии с конкретными атмосферными условиями.

Участие молекул углекислого газа в процессах создания потока излучения или его поглощения на пути к детектору характеризуется коэффициентом поглощения  $k_{\omega}$  при частоте  $\omega$  в атмосферном воздухе. Пусть воздух находится в локальном термодинамическом равновесии, которое определяет распределение молекул по колебательно-вращательным состояниям. Считая газовую и вращательную температуры одинаковыми, имеем для вклада в коэффициент поглощения молекулярного газа в результате определенного колебательно-вращательного перехода [16, 17]

$$\begin{aligned} k_{\omega} &= N_v \sigma_{\omega} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{\hbar \omega}{T} \right) \right] = \\ &= N_v \frac{\pi^2 c^2}{\omega^2} \frac{a_{\omega} g_0}{A_j g_i} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{\hbar \omega}{T} \right) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

а полный коэффициент поглощения на данной частоте равен сумме вкладов за счет разных колебательно-вращательных переходов. Здесь  $\sigma_{\omega}$  — сечение поглощения фотона;  $T$  — температура, выраженная в энергетических единицах;

$N_v$  — плотность молекул в начальном колебательном состоянии  $v$ ;  $A_j$  — первый коэффициент Эйнштейна для данного перехода;  $a_{\omega}$  — функция распределения фотонов по частотам, нормированная на единицу

$$\int a_{\omega} d\omega = 1.$$

Далее учитывается, что при давлении воздуха порядка атмосферного реализуется ударный механизм уширения спектральных линий, возникающий в результате столкновений излучающих молекул с молекулами воздуха. Тогда функция распределения фотонов по частотам  $a_{\omega}$  для данного колебательно-вращательного перехода определяется формулой [18]

$$a_{\omega} = \frac{v_j}{2\pi[(\omega - \omega_j)^2 + (v_j/2)^2]},$$

где  $\omega$  — частота фотона, частота  $\omega_j$  соответствует центру этой линии,  $v_j$  — ее ширина.

Кроме того, согласно термодинамическому равновесию, плотность молекул  $N_{vj}$  в заданных колебательном  $v$  и вращательном  $j$  состояниях определяется формулой Больцмана, которая в рассматриваемом случае  $T \gg B$  ( $B$  — вращательная постоянная молекулы) имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} N_{vj} &= N_v \frac{2B}{T} (2j+1) \left[ 1 - \exp \left( -\frac{\hbar \omega}{T} \right) \right], \\ \sum_j N_{vj} &= N_v. \end{aligned}$$

Здесь принято во внимание, что реализуются только четные или нечетные значения моментов вращения и важны большие значения моментов вращения  $j$  [19]. Используя соотношение между частотой фотона  $\omega$  и моментом вращения молекулы  $j$ , можно получить следующее выражение для коэффициента поглощения (2) как функции частоты фотона  $\omega$ :

$$\begin{aligned} k_{\omega} &= \frac{\pi^2 c^2}{\omega^2} A_j N_v \frac{\hbar |\omega - \omega_0|}{T g_i} \exp \left[ -\frac{\hbar^2 (\omega - \omega_0)^2}{4BT} \right] \times \\ &\quad \times \left[ 1 - \exp \left( -\frac{\hbar \omega}{T} \right) \right] \sum_j a_{\omega - \omega_j}. \end{aligned}$$

Если ширина отдельной спектральной линии мала по сравнению с разницей частот соседних переходов, функция распределения частот поглощенных фотонов группируется вокруг центров соответствующих спектральных линий.

Введем оптическую толщину атмосферы для этой частоты  $u_{\omega}$  на пути следования фотона от точки его образования до детектора:

$$u_{\omega} = \int k_{\omega} dz,$$

где  $z$  – направление движения фотона, интеграл берется между точкой рождения фотона и детектором.

Очевидно, оптимальная область частот для рассматриваемых измерений должна находиться в области прозрачности атмосферы. В этой области спектра находятся спектральные линии лазера на углекислом газе. На рис. 3 представлена зависимость от частоты для оптической толщины стандартной атмосферы в области частот, отвечающих лазерному переходу  $001 \rightarrow 020$  вблизи длины волны 9.4 мкм. Основываясь на параметрах излучательных переходов, содержащихся в [12, 13], представим оптическую толщину в атмосфере в виде

$$u_{\omega} = \sum_j S_j \frac{S_j v_j}{(\omega - \omega_j)^2 + (v_j/2)^2} \int N_v dz.$$

Здесь  $S_j$  – интенсивность перехода из состояния с колебательным квантовым числом  $v$  и вращательным числом  $j$ , которая пропорциональна коэффициенту Эйнштейна или обратному времени излучательного перехода.

Очевидно, что для регистрации очагов возгорания необходима область частот, где оптическая толщина атмосферы меньше единицы, но не очень мала. В частности, на рис. 3 приведена оптическая толщина стандартной атмосферы. Область лазерных переходов вблизи длины волны 10.6 мкм занимает диапазон энергий фотонов  $940-960 \text{ cm}^{-1}$ . Это соответствует «хвосту» функции распределения молекул по вращательному квантовому числу.

На рис. 4 представлена оптическая толщина стандартной атмосферы в узкой по сравнению с рис. 3 области частот. Температура воздуха в этой части атмосферы составляет 302 К, концентрация углекислого газа – 1%. В данном диапазоне частот оптические параметры атмосферы определяются углекислым газом. Указаны кванто-

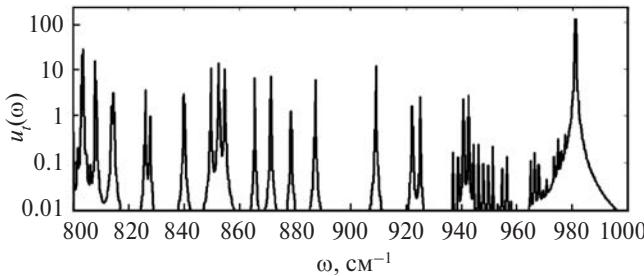


Рис. 3. Оптическая толщина стандартной атмосферы для направления, перпендикулярного поверхности Земли, в области прозрачности атмосферы для частот, включающих лазерный переход в лазере на углекислом газе с длиной волны вблизи 10.6 мкм.

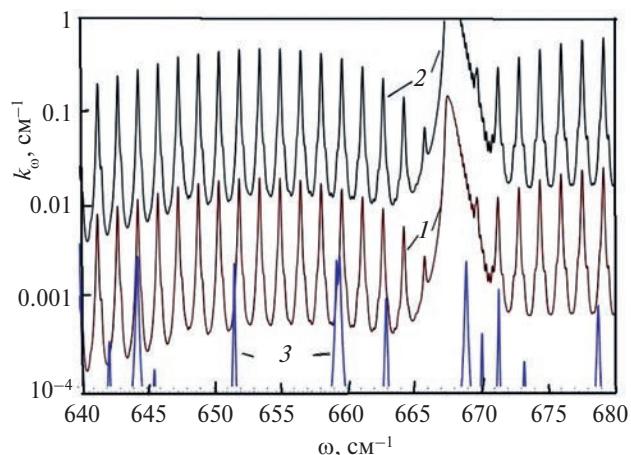


Рис. 4. Коэффициент поглощения стандартной атмосферы в области спектра в окрестности перехода  $\text{CO}_2(010 \rightarrow 000)$ , где излучение молекул углекислого газа доминирует: 1 – коэффициент поглощения для стандартной атмосферы на высоте 1 км; 2 – коэффициент поглощения атмосферы, которую пронизывают струи продуктов подземного горения; 3 – коэффициент поглощения стандартной атмосферы за счет молекул воды.

вые параметры перехода, за счет которого создается данная спектральная линия. Лазерный усилитель, используемый для идентификации углекислого газа, выделяет сигнал относительно малой ширины. Отметим, что разность частот для соседних колебательно-вращательных излучательных переходов молекулы углекислого газа для основных моментов вращения  $j \sim 10$  равна примерно  $1.6 \text{ cm}^{-1}$ , а ширина этих спектральных линий для воздуха при атмосферном давлении составляет около  $0.1 \text{ cm}^{-1}$ .

Схема измерения основана на следующем выражении для потока излучения, малая часть которого регистрируется детектором:

$$J_{\omega} = I_{\omega} \exp(-u_{\omega}) + i_{\omega} + \Delta i_{\omega} \exp(-u_{\omega}). \quad (3)$$

Здесь  $I_{\omega}$  – поток излучения объекта, находящегося на поверхности Земли, регистрируемый детектором;  $i_{\omega}$  – соответствующая часть излучения, формируемая за счет атмосферного углекислого газа; поток  $\Delta i_{\omega}$  создается молекулами углекислого газа, образуемого в результате горения в очаге возгорания. В рассматриваемом методе сравниваются относительные величины сигналов, принятых детектором из очагов возгорания и из соседних областей.

## ИЗЛУЧЕНИЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА АТМОСФЕРЫ

Оценим условия, при которых углекислый газ из очагов возгорания может заметно увеличить поток излучения в подходящей области спек-

тра, что позволит идентифицировать очаги возгорания. Образующийся в результате окисления органических веществ углекислый газ, а также угарный газ (продукт неполного сгорания) вырываются из-под земли в виде одной или многих струй, повышая концентрацию углекислого газа над очагом возгорания.

Проведем грубые оценки. Пусть размер зоны возгорания составляет  $l \sim 10$  м, а толщина подземного слоя углерода  $d \sim 1$  м, и этот углерод сгорает в течение 10 сут, инициируя возгорание леса над ним. Далее выделяется углекислый газ, который уносится в окружающее пространство под действием ветра, средняя скорость которого равна 5 м/мин [20], т.е. типичное время нахождения молекулы углекислого газа над очагом возгорания составляет примерно 2 мин. Отсюда получаем массу углекислого газа над очагом возгорания 50 мг/м<sup>2</sup>. При стандартных условиях масса естественного углекислого газа в атмосфере, приходящаяся на единицу площади поверхности Земли, равна 600 мг/м<sup>2</sup>. Как видно, при данных условиях концентрация углекислого газа, образуемого в результате подземного возгорания органических остатков, достаточна для идентификации.

Воспользовавшись компьютерной программой, разработанной в [14], вычислим конкретные значения величин, характеризующих данную задачу. За основу расчета взята формула(3), и для потока излучения  $I_\omega$  с поверхности Земли используется формула

$$J_\omega = \alpha I_\omega^0(T),$$

где  $\alpha$  – альбедо поверхности при температуре поверхности  $T$ , которое близко к единице;  $I_\omega^0(T)$  – поток излучения при данной частоте с поверхности абсолютно черного тела. Одна из основных задач заключается в разделении излучения естественного углекислого газа, углекислого газа подземного образования и излучения исследуемой поверхности. Это можно сделать, фиксируя излучение для разных частей спектральной области и сравнивая их.

Вычислим поток излучения, который попадает на детектор в рамках схемы рис. 1, считая, что эта схема позволяет фиксировать излучение в интервале частот  $\Delta\omega$ . Тогда в соответствии со схемой на рис. 1 поток излучения, фиксируемый детектором в случае, когда детектор направлен на высоту с температурой атмосферы  $T$ , составляет

$$J_\omega = I_\omega(T)d\omega\Delta\omega,$$

где  $I_\omega(T)$  – поток излучения абсолютно черного тела, согласно формуле Планка [13, 14]:

$$I_\omega(T) = \frac{\hbar\omega}{4} \frac{i_\omega}{c^2} = \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2 c^2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\hbar\omega}{T}\right) \right]^{-1}.$$

Поэтому в случае, когда детектор направлен параллельно поверхности Земли на центр струй подземного горения, в соответствии со схемой на рис. 1 имеем для потока излучения, поглощаемого детектором:

$$J_\omega = I_\omega(T)d\omega\Delta\omega \left[ 1 - \exp(-k_\omega L) \right] + \\ + I_\omega(T_g)d\omega\Delta\omega \exp(-k_\omega L) \left[ 1 - \exp(-2Rk_\omega) \right],$$

где  $k_\omega$  – коэффициент поглощения над областью подземного горения,  $T_g$  – температура атмосферного воздуха над областью подземного горения; значения остальных параметров взяты из таблицы. Отсюда следует, что максимальное относительное увеличение фиксируемого потока излучения  $\gamma$  в рамках рассматриваемой модели составляет

$$\gamma = \frac{I_\omega(T_g)\exp(-k_\omega L)[1 - \exp(-2Rk_\omega)]}{I_\omega(T)[1 - \exp(-k_\omega L)]}.$$

При оптимальном значении расстояния  $L$  до области над зоной горения, равном

$$L = \frac{\ln 2}{k_\omega}, \quad (4)$$

рассматриваемое отношение записывается как

$$\gamma = \frac{I_\omega(T_g)\exp(-k_\omega L)[1 - \exp(-2Rk_\omega)]}{2I_\omega(T)}, \quad (5)$$

$$(R + L)d\omega \ll 1.$$

Ориентируясь на геометрию измерения (рис. 1), проанализируем излучение (в области прозрачности атмосферы), которое попадает на детектор, если он направлен на поверхность Земли, а область спектра находится в области переходов в лазере на углекислом газе. В этой области спектра при отсутствии облаков единственным парниковым компонентом является углекислый газ, и поток излучения составляет

$$I_\omega = \alpha I_\omega^0(T) + \int_0^l k_\omega dz,$$

где  $l = h/\cos\theta$  – расстояние от детектора до поверхности Земли,  $\theta$  – угол между этим направлением и нормалью к поверхности Земли,  $h$  – высота детектора над поверхностью Земли.

Рассматриваемый метод мониторинга атмосферного углекислого газа состоит в измерении температуры атмосферы на небольшой высоте с использованием вращающихся тепловизоров, находящихся на летящем дроне или самолете. Каждый из тепловизоров позволяет определить температуру атмосферы на высоте порядка сотен метров по излучению молекул углекислого газа в подходящем интервале частот. Ориентируясь на ширину диапазона частот порядка 10 см<sup>-1</sup>, определим среднюю тем-

Параметры поглощения фотонов ИК-излучения в области спектра шириной  $\Delta\omega = 10\text{см}^{-1}$ , где поглощение молекулами углекислого газа доминирует

Номер области спектра	1	2	3	4	5
Частота центра полосы $\omega$ , $\text{см}^{-1}$	675	735	985	1080	2277
$k_{\max}$ , $\text{см}^{-1}$	$2.3 \times 10^{-2}$	$4.4 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-6}$	$5.0 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-4}$
$k_{\min}$ , $\text{см}^{-1}$	$6.7 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.7 \times 10^{-8}$	$1.3 \times 10^{-7}$	$5.6 \times 10^{-6}$
$k_{\max}/k_{\min}$	35	42	64	39	27
$\bar{k}_{\omega}$ , $\text{см}^{-1}$	$3.9 \times 10^{-3}$	$6.6 \times 10^{-5}$	$1.4 \times 10^{-7}$	$8.1 \times 10^{-7}$	$2.9 \times 10^{-5}$
$L$ , км	2.5	20	6	3	20
$I_{\omega}(T)\Delta\omega$ , $\text{Вт}/\text{м}^2$	3.8	3.6	2.4	1.9	0.039
$I_{\omega}(T_g)\Delta\omega$ , $\text{Вт}/\text{м}^2$	4.8	4.6	3.3	2.8	0.086
$k_{\omega}/\bar{k}_{\omega}$	25	25	26	49	47

Примечание.  $k_{\min}$ ,  $k_{\max}$  – минимальный и максимальный коэффициенты поглощения стандартной атмосферы в указанной области спектра на высоте 1 км,  $k_{\omega}$  – коэффициент поглощения атмосферы на этой высоте над областями подземного горения, параметр  $L$  определяется соотношением  $\gamma_{\omega}(L) = 1/2$ .

пературу на расстоянии 1 км от тепловизоров в каждом направлении.

Сначала сделаем простые оценки для подземного горения. Для определенности принято, что источником этого процесса является находящийся под землей торф. Полная толщина слоя подземного торфа равна 1 м, а его полное сгорание происходит за 10 сут. Образующийся углекислый газ выходит из-под земли в виде струй воздуха с примесью углекислого газа. Поток углекислого газа в атмосфере при этих условиях составляет  $J_c \sim 2 \times 10^4 \text{ гC}/(\text{м}^2 \text{ сут})$ , т.е. масса продуктов пересчитывается на массу содержащегося в них углерода. Для сравнения средний поток углекислого газа, поглощаемого растениями в результате фотосинтеза, равен среднему потоку углекислого газа, выбрасываемому в атмосферу в результате гниения и дыхания растений, и составляет  $J_c \sim 1 \text{ гC}/(\text{м}^2 \text{ сут})$ .

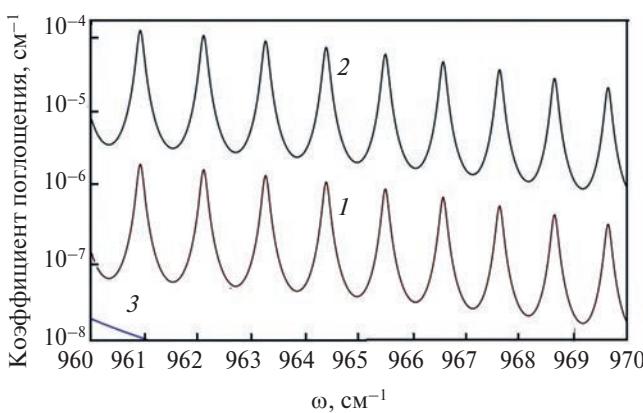
Сгорание органических остатков приводит к выделению энергии и нагреванию земли и атмосферного воздуха. При заданных условиях поток энергии в атмосферу в результате сгорания подземного торфа будет равен  $J_c \sim 5 \times 10^5 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

Средний поток излучения Солнца на поверхность Земли составляет  $340 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . Как видно, подземное горение, которое предваряет лесные пожары, приводит не к слабым возмущениям атмосферы, а к существенному изменению ее характеристик. Для рассматриваемой схемы мониторинга атмосферы пространственная структура изменения параметров атмосферы не играет роли и проявляется в интегральных значениях атмосферы. Опираясь на приведенные оценки, будем считать среднюю концентрацию углекислого газа в атмосфере над очагами возгорания на уровне 1%. Кроме того, примем для определен-

ности, что температура над областями подземного горения на 20 градусов выше, чем при отсутствии подземного горения. Основываясь на этих оценках, построим подходящую схему мониторинга атмосферы.

### МЕТОД МОНИТОРИНГА УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА АТМОСФЕРЫ

Рассматриваемый метод мониторинга областей подземного горения на основе детектирования излучения молекул атмосферного углекислого газа требует, чтобы излучение над областью подземного горения могло быть заметно на фоне больших флуктуаций в интенсивности излучения естественной атмосферы. Концентрация молекул углекислого газа (отношение числа молекул углекислого газа к числу молекул воздуха) в данной области составляет 1%. Ориентируясь на высоту порядка 1 км, допускаем, что температура стандартной атмосферы составляет 282 К, а температура воздуха над зоной подземного горения равна 302 К. Выделим спектральные области в тепловом излучении, где излучение определяется углекислым газом, а другие парниковые компоненты атмосферы при этих частотах несущественны. Одна из таких областей, находящаяся внутри основной полосы поглощения теплового излучения молекулами углекислого газа, представлена на рис. 4. Другая область спектра, где поглощение теплового излучения молекулами углекислого газа доминирует, приводится на рис. 5. Здесь показаны зависимости коэффициентов поглощения для стандартной атмосферы на высоте 1 км за счет молекул воды и углекислого газа, а также молекул углекислого газа в пространственных областях,



**Рис. 5.** Коэффициент поглощения атмосферы на высоте 1 км в узкой области спектра для лазерного излучательного перехода  $\text{CO}_2(001 \rightarrow 020)$ , где излучение молекул углекислого газа доминирует: 1 – для стандартной атмосферы, 2 – для части атмосферы с температурой воздуха 302 К и концентрацией углекислого газа 1%; 3 – поглощение за счет молекул воды.

находящихся на той же высоте над областями подземного горения.

Отсюда получим для отношения максимального потока излучения над зоной подземного горения к потоку излучения в отсутствии подземного горения вместо формулы (5)

$$\gamma_{\omega}(L) = \frac{I_{\omega}(T_g)[1 - \exp(-2Rk_{\omega})]\phi(L)}{I_{\omega}(T)}, \quad (6)$$

$$(R + L)d\theta \ll 1.$$

По аналогии с формулой (4) имеем для расстояния до зоны подземного горения  $L$ , на котором в среднем теряется половина испускаемого излучения:

$$\gamma_{\omega}(L) = \frac{1}{2}.$$

При этом критерий справедливости формулы (6) требует малости телесного угла, с которого собирается излучение. Однако уменьшение данного угла, которое ведет к улучшению чистоты измерения, требует также повышения его точности. В конечном итоге это ограничивает возможности измерений на расстояниях, составляющих километры. Оставим пока в стороне эту проблему, которая решается практически.

Выберем несколько областей спектра шириной  $10 \text{ cm}^{-1}$ , где излучение молекул углекислого газа доминирует. Параметры стандартной атмосферы для этих областей спектра приведены в таблице. Данные этой таблицы позволяют настроить измерительные приборы на оптимальную область спектра, что даст возможность находить области подземного горения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье обнаружение зон подземного горения по его следу в атмосфере основано на изменении концентрации углекислого газа в воздухе и температуры воздуха по измерению потоков ИК-излучения в узкой области спектра, которые создаются молекулами углекислого газа как продукта подземного горения, выбрасываемого в атмосферу в виде струй. Это является одним из аспектов связанной с излучением энергетики атмосферы [16].

Представленный метод мониторинга атмосферы основан на применении тепловизоров, что связано с созданием и модификацией линз, зеркал и детекторов для ИК-излучения. В данной работе выделены области спектра теплового излучения атмосферы, где эмиссия молекул углекислого газа доминирует. При этом концентрация молекул углекислого газа, как и температура атмосферного воздуха, повышается над областями подземного горения. Тем самым мониторинг потоков ИК-излучения, создаваемого атмосферой, позволяет обнаруживать очаги подземного горения.

Предлагаемый мониторинг можно реализовать в разных областях ИК-спектра, где излучение молекул углекислого газа вносит основной вклад в излучение атмосферы. Разница между этими областями спектра состоит в разных коэффициентах поглощения для соответствующих этим областям длин волн. Возможно, имеет смысл проводить мониторинг одновременно в разных оптимальных областях спектра, которые отвечают разным колебательным переходам. При этом чем меньше коэффициент поглощения, тем на более далеких расстояниях может быть зафиксирована область атмосферы с параметрами, соответствующими областями подземного горения. Но тогда для ее детектирования требуется и больший размер области подземного горения.

Отметим, что рассматриваемый метод настроен на естественные процессы, где подземное горение органических остатков является одним из каналов превращения углерода органических остатков в углекислый газ в рамках баланса углерода на поверхности Земли и в атмосфере. Тем самым подземное горение представляет одну из стадий в цепи процессов, устанавливающих равновесие для углерода биосфера, т.е. находящегося на поверхности Земли и в атмосфере. Эта стадия длится одну-две недели и может стать предвестником возгорания леса. Своевременная фиксация зоны подземного горения и последующее проведение соответствующих мероприятий позволяет предотвратить это стихийное бедствие. Конечно, это не относится к поджогам леса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thermography. <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermography#Cameras>
2. Ring E.F., Ammer K. Infrared Thermal Imaging in Medicine // *Physiol. Meas.* 2012. V. 33. P. 33.
3. Huang Yao, Rongjun Qin, Xiaoyu Chen. Unmanned Aerial Vehicle for Remote Sensing Applications – A Review // *Remote Sens.* 2019. V. 11. P. 1443.
4. Fourier Transform Infrared Spectroscopy. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Fourier\\_transform\\_infrared\\_spectroscopy](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Fourier_transform_infrared_spectroscopy)
5. Goody R.M. Atmospheric Radiation: Theoretical Basis. London: Oxford Univ. Press, 1964. 436 p.
6. Goody R.M. Principles of Atmospheric Physics and Chemistry. London: Oxford Univ. Press, 1995. 336 p.
7. Hudson R.D., Hudson J.W. The Military Applications of Remote Sensing by Infrared // Proc. IEEE. 1975. V. 63. P. 104.
8. Smirnov B.M. Transport of Infrared Atmospheric Radiation. Berlin: de Gruyter, 2020. 250 p.
9. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературные гидродинамические явления. М.: Наука, 1966. 688 с.
10. Смирнов Б.М. Инфракрасное излучение в энергетике атмосферы // ТВТ. 2019. Т. 57. № 4. С. 609.
11. Смирнов Б.М. Проблемы глобальной энергетики атмосферы // ТВТ. 2021. Т. 59. № 4. С. 589.
12. Center for Astrophysics. <https://www.cfa.harvard.edu/>
13. HITRAN. <https://hitran.iao.ru/>
14. Smirnov B.M., Zhilyaev D.A. Greenhouse Effect in the Standard Atmosphere // Foundations. 2021. V. 1. P. 184.
15. U.S. Standard Atmosphere, 1976. Washington DC: Gov. Printing Office, 1976. 243 p.
16. Krainov V.P., Reiss H.R., Smirnov B.M. Radiative Processes in Atomic Physics. N.Y.: Wiley, 1997. 309 p.
17. Krainov V.P., Smirnov B.M. Attomeric and Molecular Radiative Processes. Switzerland: Springer Nature, 2019. 273 p.
18. Собельман И.И. Введение в теорию атомных спектров. М.: Наука, 1977. 320 с.
19. Reif F. Statistical and Thermal Physics. Boston: McGraw Hill, 1965. 651 p.
20. Barrett R.T. Investigation into Integrated Free-form and Precomputational Approaches for Aerostructural Optimization of Wind Turbine Blades. Master Sci. Thesis. Brigham Young University, 2018. 76 p.