



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01N 21/27 (2019.05)

(21)(22) Заявка: 2018141971, 28.11.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
28.11.2018

Дата регистрации:
19.07.2019

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 28.11.2018

(45) Опубликовано: 19.07.2019 Бюл. № 20

Адрес для переписки:

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦЗИС, для
Савостиковой Е.С. (МФ МГТУ)

(72) Автор(ы):

Давыдов Вячеслав Фёдорович (RU),
Комаров Евгений Геннадьевич (RU),
Соболев Алексей Викторович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Московский государственный
технический университет имени Н.Э.
Баумана (национальный исследовательский
университет)" (МГТУ им. Н.Э. Баумана) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2422807 С1, 27.06.2011. RU
2422859 С1, 27.06.2011. RU 2613841 С1,
21.03.2017. US 2014353531 A1, 04.12.2014.

(54) Способ измерений содержания парниковых газов в атмосфере

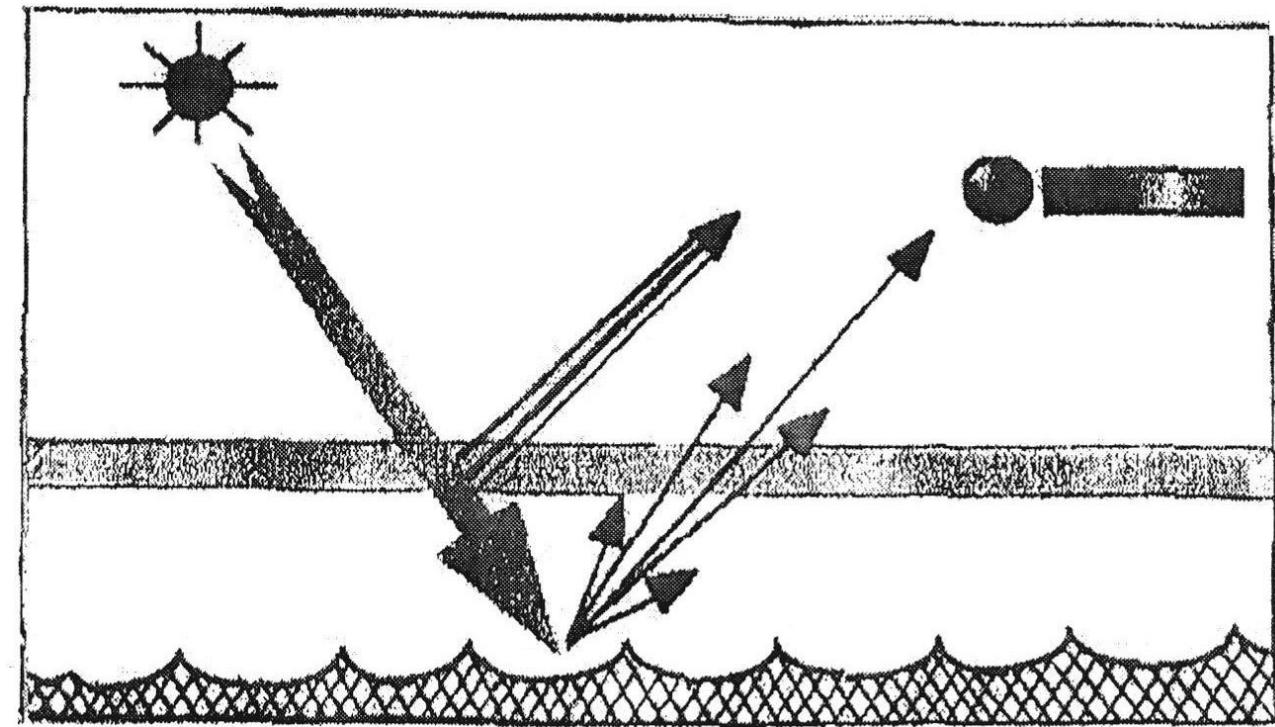
(57) Реферат:

Изобретение относится к области экологии, к дистанционным методам мониторинга природных сред. Способ включает зондирование подстилающей поверхности спектрометром с широким полем зрения во всем интервале полос переизлучений газовых молекул Лаймана, Бальмара, Пашена, определение средневзвешенного сдвига длин волн $\Delta\lambda$ и энергии затухания ΔE между спектрами падающего и отраженного световых потоков, вычисление числа столкновений N газовых молекул с фотонами через отношение ΔE к энергии одного кванта,

расчет количества молей парниковых газов в объеме луча зондирования как отношения N к числу Авогадро и их веса умножением M на средний молярный вес молекул парниковых газов, определение концентрации $\text{мг}/\text{м}^3$ делением веса на объем луча зондирования для стратифицированного слоя тропосферы высотой 200 м. Технический результат - достоверность и оперативность количественной оценки концентрации во всем слое тропосферы без ограничений к типу подстилающей поверхности и коэффициенту отражения. 7 ил.

RU 2695086 С1

RU 2695086 С1



Фиг. 1

R U 2 6 9 5 0 8 6 C 1

R U 2 6 9 5 0 8 6 C 1

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(52) CPC
G01N 21/27 (2019.05)

(21)(22) Application: 2018141971, 28.11.2018

(24) Effective date for property rights:
28.11.2018Registration date:
19.07.2019

Priority:

(22) Date of filing: 28.11.2018

(45) Date of publication: 19.07.2019 Bull. № 20

Mail address:
105005, Moskva, ul. 2-ya Baumanskaya, 5, str. 1,
MGTU im. N.E. Baumana, TSZIS, dlya
Savostikovo E.S. (MF MGTU)

(72) Inventor(s):

Davydov Vyacheslav Fedorovich (RU),
Komarov Evgenij Gennadevich (RU),
Sobolev Aleksej Viktorovich (RU)

(73) Proprietor(s):

federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniya "Moskovskij gosudarstvennyj
tekhnicheskij universitet imeni N.E. Baumana
(natsionalnyj issledovatelskij universitet)"
(MGTU im. N.E. Baumana) (RU)

(54) METHOD OF MEASURING CONTENT OF GREENHOUSE GASES IN ATMOSPHERE

(57) Abstract:

FIELD: ecology.

SUBSTANCE: invention relates to ecology, to remote methods of natural environment monitoring. Method involves probing the underlying surface with a spectrometer with a wide field of view in the entire range of re-radiation bands of Lyman, Balmar and Paschen gas molecules, determining weighted average wavelength shift $\Delta\lambda$ and attenuation energy ΔE between spectra of incident and reflected light flux, calculating the number of collisions N of gas molecules with photons through ratio ΔE to energy of one quantum, calculating the number of moles of greenhouse gasesin the volume of the probing beam as a ratio of N to the Avogadro number and their weight by multiplying M by the average molar weight of the greenhouse gas molecules, concentration determination mg/m^3 dividing weight by volume of probing beam for stratified layer of troposphere with height of 200 m.

EFFECT: technical result is reliability and efficiency of quantitative assessment of concentration in entire layer of troposphere without restrictions on type of underlying surface and reflection coefficient.

1 cl, 7 dwg

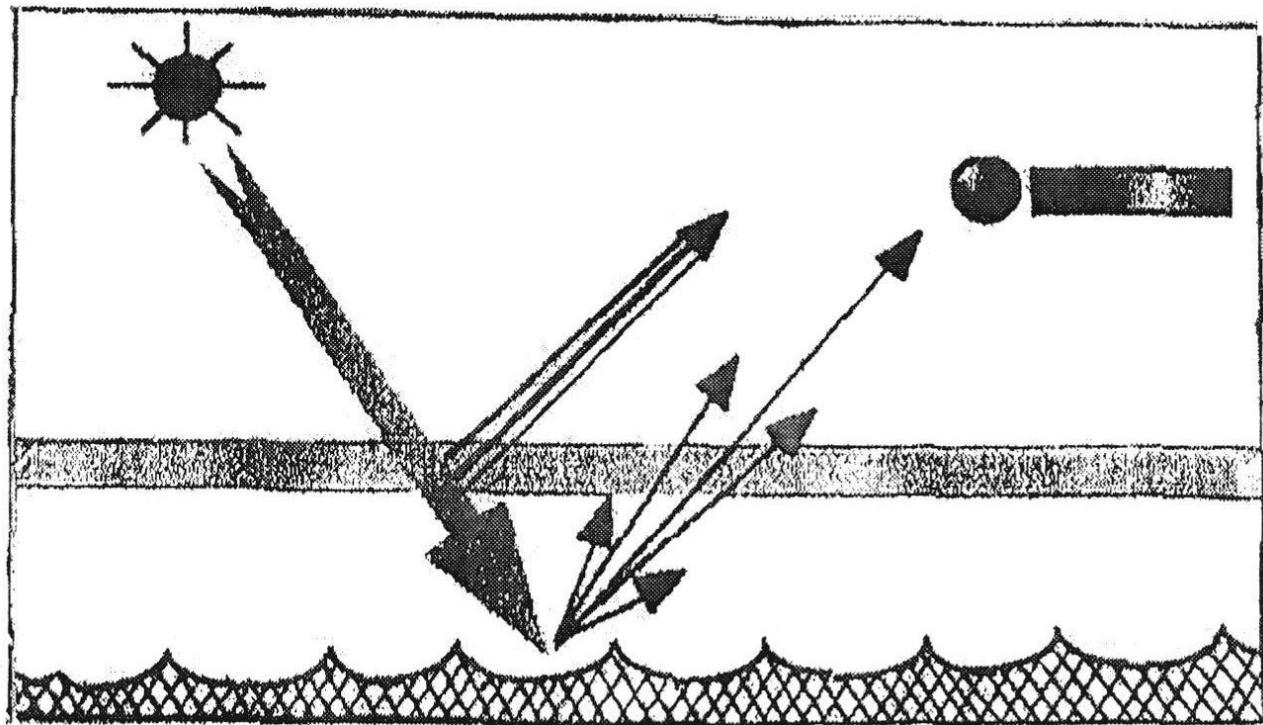
C 1
2 6 9 5 0 8 6

R U

R
U
2 6 9 5 0 8 6

C 1

R U 2 6 9 5 0 8 6 C 1



Фиг. 1

R U 2 6 9 5 0 8 6 C 1

Изобретение относится к области экологии, в частности к дистанционным методам мониторинга природных сред и может найти применение в системах санитарно-эпидемиологического контроля промышленных регионов и региональных Центрах МЧС.

5 Промышленный прогресс неизбежно связан с увеличением выбросов в атмосферу, так называемых, «парниковых газов», вызывающих положительный тренд средней температуры Земли.

10 Контроль загрязнения атмосферы является составной частью обязанностей государств по экологическому мониторингу природных сред, подписавших Парижские соглашения 2015 г. Наземные методы обычно обеспечивают измерения приземной концентрации на высоте 2 м от поверхности.

15 Для решения объемных пространственных задач используют методы дистанционного зондирования Земли космическими средствами. Известен «Способ определения концентрации углекислого газа в атмосфере», Патент RU №2422807 от 27.06.2011 г. - аналог.

20 В способе аналога путем лабораторных наземных измерений выбирают равное количество смежных спектральных полос поглощения кислорода O_2 и углекислого газа CO_2 в ближнем инфракрасном диапазоне, осуществляют, с космического носителя, спектрометрические измерения на выбранных спектральных полосах светового потока, отраженного от подстилающей поверхности и дважды прошедшего атмосферу, рассчитывают энергию регистрируемых сигналов в полосе кислорода

$$25 \quad W(O_2) = \sum_n \left[\frac{I_i(O_2)}{\lambda_{1i}(O_2)} \right]^2$$

30 и углекислого газа

$$35 \quad W(CO_2) = \sum_n \left[\frac{I_i(CO_2)}{\lambda_{1i}(CO_2)} \right]^2$$

40 вычисляют суммарные потери на затухание в полосах O_2 и CO_2 как разницу между энергией эталонного, по Планку, солнечного спектра в тех же полосах $W_{этал}(O_2)$ и $W_{этал}(CO_2)$ и энергией зарегистрированных сигналов:

$$\Delta W(O_2) = W_{этал}(O_2) - W(O_2); \Delta W(CO_2) = W_{этал}(CO_2) - W(CO_2),$$

а концентрацию углекислого газа в атмосфере по трассе полета носителя в каждом кадре спектрометрических измерений рассчитывают из соотношения:

$$CO_2[\%] = O_2[\%] \frac{\Delta W(CO_2)}{\Delta W(O_2)}$$

где $O_2[\%]$ - концентрация кислорода в атмосфере, равная 21%;

$I_i(O_2)$, $I_i(CO_2)$ - амплитуды регистрируемых сигналов каждого из газов;

λ_i - средняя длина волны спектральной линии;

n - количество спектральных линий в каждой полосе.

Недостатками аналога являются:

- локальность получаемых результатов измерений, привязанная только к трассе узкого луча зондирования;

- однокомпонентная оценка загрязнения атмосферы углекислым газом, в то время, как антропогенные выбросы содержат множество газовых компонент.

Ближайшим аналогом к заявляемому техническому решению является «Способ определения загрязнения атмосферы мегаполисов» - Патент RU №2422859, 2011 г.

В способе ближайшего аналога осуществляют дистанционное получение спектронального снимка региона, содержащего контрольные промышленные площадки, в виде цифровых значений спектральной яркости $I(x, y)$ изображений видимого диапазона, расчет гистограммы распределения пикселей по яркости, привязку относительного закона распределения пикселей к абсолютным значениям индекса состояния атмосферы контрольных площадок, отличающейся тем, что измеряют гиперспектрометром спектральную характеристику отражений светового потока от границы атмосфера - подстилающая поверхность с одновременным получением изображения региона в красной полосе 570...670 нм, вычисляют средневзвешенное значение длины волны λ и энергию отраженного потока W , определяют загрязнение атмосферы по регрессионной зависимости:

$$q_{\Sigma}[\text{ПДК}] = 1,2(\lambda, \lambda_{\text{эт}})^{1,5} \cdot (W_{\text{эт}}/W)^{2,6},$$

сортируют пиксели полученного изображения по яркости и строят их гистограмму, отождествляют среднее значение яркости гистограммы с расчетной величиной q_{Σ} , осуществляют пересчет значений яркости в значения ПДК по обратно пропорциональной зависимости, представляют абсолютное распределение загрязнений по площади региона в виде распределения Рэлея с полученными расчетными числовыми характеристиками, где

q_{Σ} - среднее значение индекса состояния атмосферы региона, ПДК;

$\lambda_{\text{эт}}$ - средневзвешенное значение длины волны эталонного (по Планку) солнечного спектра, равное ~ 500 нм;

$W_{\text{эт}}$ - энергия эталонного солнечного спектра, нормированного относительно

максимума, равная ~ 15,6.

К недостаткам ближайшего аналога следует отнести:

- необходимость наличия в получаемом изображении контрольных площадок с абсолютными значениями индекса состояния атмосферы над ними;

5 - неточность регрессионных зависимостей ввиду нелинейности смещения спектра светового потока при его взаимодействии с молекулами парниковых газов.

Задача, решаемая заявлением техническим решением, состоит в количественном измерении веса парниковых газов в объеме луча зондирования путем раздельной оценки потерь энергии в отраженном потоке при поглощении молекулами парниковых газов 10 и при отражении от подстилающей поверхности.

Поставленная задача решается тем, что способ измерений содержания парниковых газов в атмосфере включает дистанционное получение спектрограммы светового потока, отраженного от подстилающей поверхности, дважды прошедшего тропосферу, спектрометром с широким полем зрения в полосах переизлучений газовых молекул

15 Лаймана, Бальмера, Пашена, вычисление разниц между средневзвешенными длинами волн $\Delta\lambda$ и энергиями ΔE падающего и отраженного световых потоков, определение количества поглощенных квантов N_0 на трассе зондирования через отношение ΔE к энергии одного кванта $h\nu$ и количества столкновений N молекул парниковых газов с фотонами как $N=N_0/e$, расчет количества молей (M) парниковых газов

20

25

$$M = \frac{N}{\text{число Авогадро}}, \text{ и их веса } Q \text{ в}$$

объеме луча зондирования умножением на средний молярный вес молекулы парниковых газов, оценку концентрации парниковых газов через отношение их веса Q к объему 30 луча зондирования $V[m^3]$, исчисляемого из угла поля зрения спектрометра и приведенной высоты стратифицированного слоя тропосферы для региона проведения измерений.

Изобретение поясняется чертежами, где:

35 фиг. 1 - схема трассы отраженного потока, дважды прошедшего атмосферу;

фиг. 2 - полосы (Лаймана, Бальмера, Пашена) переизлучения газовых молекул при их столкновении с фотонами светового потока;

фиг. 3 - распределение (Больцмана) энергетических уровней газовых молекул;

фиг. 4 - эталонный (по Планку) солнечный спектр;

40 фиг. 5 - вероятность (Шредингера) поглощения или индуцированного переизлучения фотонов молекулами газов;

фиг. 6 - функция распределения вероятностей спектра отраженного светового потока;

фиг. 7 - функциональная схема устройства, реализующая способ.

Техническая сущность заявленного технического решения состоит в следующем. На 45 рисунке фиг. 1 иллюстрируется трасса отраженного солнечного потока, дважды прошедшего атмосферу и дистанционно регистрируемого измерителем, установленным на космическом носителе. При взаимодействии фотонов падающего светового потока с молекулами смогов наблюдаются явления, как то: поглощение, рассеяние, флуоресцентное переизлучение - интегральный эффект состоит в смещении спектра

видимого диапазона в его длинноволновую часть (красная область) [см., например, Р. Межерис, Лазерное дистанционное зондирование, перевод с англ., Мир, М, 1987 г., стр. 124, табл. 3.4 Волновые числа комбинационного сдвига на длине волны 337,1 нм] Ниже представлены некоторые извлечения из данной таблицы для некоторых «парниковых» молекул смогов.

Тип молекулы вещества	NO ₂	SO ₂	CO ₂	NH ₃	C ₂ H ₂	H ₂ S	CO	NO	H ₂ O
Длина волны рассеянного излучения, нм	345,7	350,8	352,5	378,8	380,3	369	363,9	365,9	384,4
Абсолютная величина смещения $\Delta\lambda$, нм	8,6	13,7	15,4	42,7	43,2	32	16,8	18,8	47,3

В результате комбинационного рассеяния солнечного света происходит перераспределение энергии между спектральными составляющими видимого диапазона, а регистрируемое спектрозональное изображение антропогенно загрязненных участков приобретает преимущественно оранжевый или темно-вишневый оттенок.

Известны полосы переизлучения газовых молекул: Лаймана в ультрафиолете, Бальмера в видимом диапазоне, Пашена в ближнем инфракрасном диапазоне [см., например, А.С. Жданов «Учебник по физике» Наука, М, 1978 г., стр. 498-499]. Полосы переизлучения газовых молекул иллюстрируются рисунком фиг. 2.

Переход с одного энергетического уровня на другой зависит от энергии молекул,

средняя величина которой составляет $\frac{3}{2} kT^\circ$. В общем случае,

распределение молекул N_i по энергетическим уровням определяется распределением Больцмана [см. Советский энциклопедический словарь под ред. А.М. Прохорова, 4-е изд., Сов. энц., М, 1989 г., стр. 154, Больцмана распределение]

$$N_i = N \cdot e^{-E/kT}$$

где: Е - энергия молекулы;

$k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град - постоянная Больцмана.

Функция распределения молекул по энергетическим уровням иллюстрируется графиком фиг. 3 [см., например, Г.А. Зисман, О.М. Тодес, «Курс общей физики», Наука, М, 1964 г., стр. 116].

В свою очередь, вероятность квантового перехода молекулы с одного энергетического уровня на другой (вероятность поглощения или индуцированного

переизлучения) определяется уравнением квантовой механики Шредингера: [см. Советский энциклопедический словарь, стр. 1542]. Максимальная вероятность квантового перехода наблюдается при совпадении частоты внешнего возбуждающего поля с частотой Бора (квантового перехода). Спектр внешнего, возбуждающего поля, 5 иллюстрируется графиками фиг. 4 (эталонный, по Планку, солнечный спектр). Функция вероятности квантовых переходов иллюстрируется графиком фиг. 5.

Располагая функцией энергетических уровней частиц (фиг. 3) и спектральной 10 характеристикой падающего светового потока (фиг. 4), можно теоретически рассчитать спектр на выходе загазованного участка. По определению, вероятность, с которой 15 функция $I(\lambda)$ попадает в интервал $\Delta\lambda$ $[W(\lambda) \cdot \Delta\lambda]$ равна вероятности, с которой аргумент $W(E)$ (энергетический уровень молекул) попадает в интервал ΔE , или:

$$15 \quad W(\lambda) \cdot \Delta\lambda = W(E) \cdot \Delta E$$

Откуда, плотность распределения вероятностей длин волн индуцированного 20 переизлучения составит:

$$20 \quad 25 \quad W(\lambda) = \frac{W(E)}{|d\lambda / dE|}$$

Предварительно, распределение энергетических уровней частиц (Больцмана) 30 представляется в энергии квантовых переходов. Энергия единичного квантового перехода $E=hv$, где h - постоянная Планка, равная $6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·сек, v - частота, равная скорости света $c=3 \cdot 10^8$ м/с деленной на длину волны λ . После численных преобразований, 35 зависимость переизлученного спектра представляется в виде:

$$35 \quad 40 \quad W(\lambda) = \ln \frac{N}{N_i} \cdot \lambda \cdot \left| \frac{dE}{d\lambda} \right|$$

Результат теоретического расчета смещенного спектра при прохождении солнечного 45 потока сквозь толщу парниковых газов в тропосфере иллюстрируется графиком фиг. 6.

Потери энергии отраженного светового потока на трассе зондирования (фиг. 1) зависят не только от поглощения его молекулами парниковых газов, но и от коэффициента отражения подстилающей поверхности. Для зондирования в надир,

коэффициент отражения (К) в первом приближении равен:

$$K = \frac{n-1}{n+1}$$

где n - коэффициент преломления среды, который существенно зависит от длины волны, [см, например, Л.И. Чапурский, «Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400...2500 нм, часть I, Мин. Обороны СССР, 1986 г., стр. 116-137, таблицы П(1...7)]. Коэффициент отражения природных образований изменяется в зависимости от длины волны в интервале 0,1...0,6. Существуют методы параметрического разделения 15 эффектов подстилающей поверхности в результирующей яркости [см., например, «Итоговый отчет по исследованию параметров Атмосфера-Поверхность дистанционными методами», Эксперимент МКС-М-МКФ-6 на Станции Салют-7, 1983...1985 гг, М, ИКИ, АН СССР, стр. 23-31]. Одним из методов исключения влияния 20 коэффициента отражения на спектральные характеристики отраженного сигнала является использование спектрометров невысокого пространственного разрешения с широким углом поля зрения. При оговоренных условиях, спектральная характеристика отраженного потока полностью определяется индуцированным переизлучением.

Интегральный эффект взаимодействия фотонов светового потока с молекулами 25 смогов состоит в сдвиге спектра в длинноволновую (красную) область, как это иллюстрируется фиг. 6. Количественным параметром такого смещения служит средневзвешенная длина волны λ_{cp} отраженного потока, исчисляемая как:

$$\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{no}} I(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_{no}}^{\lambda_{max}} I(\lambda) d\lambda$$

Средневзвешенное значение длины волны делит площадь под графиками фиг. 4, фиг. 40 6 пополам.

Средневзвешенное значение длины волны падающего потока $\lambda_{cp}=550$ нм, отраженного $\lambda_{cp}=660$ нм. Смещение $\Delta\lambda$ составляет 110 нм. При оговоренных выше 45 условиях, спектральное смещение обусловлено исключительно индуцированным переизлучением молекулами парниковых газов. Потери энергии при индуцированном переизлучении определяют как разницу между энергией падающего (эталонного по Планку) светового потока и энергией зарегистрированного отраженного потока:

$$\Delta E = \sum_i^n \left[\frac{I(\lambda_i)}{\lambda_i} \right]^2 ?$$

10

где $I(\lambda_i)$ - амплитуда сигнала на спектральной линии λ_i ;

n - количество спектральных линий в полосе, на которых проводят измерения.

Определяют количество квантовых переходов N_0 как отношение затухания ΔE к

15 энергии одного кванта ($h\nu$). Поскольку существует вероятность перехода молекулы при столкновении с фотоном на любой виртуальный уровень (согласно графика фиг. 2), то количество столкновений молекул меньше количества квантовых переходов. Из уравнения Шредингера наибольшая вероятность квантового перехода наблюдается

20 при совпадении энергии светового потока $h\nu$ с энергией молекулы $h\nu=nKT$ т.е. $N_i=e^{-1}$.

Таким образом, количество столкновений в диапазоне зондирования от 200 нм до 1100 нм (или в диапазоне изменения энергии фотонов $h\nu$) в 2,72 раза меньше количества квантовых переходов N_0 . Вычисляют количество молей молекул парниковых газов (M) в объеме луча зондирования:

25

$$M = \frac{N_0 / e}{\text{число Авогадро} 6,8 \cdot 10^{23}} ;$$

30

Парниковые газы по ЮНЕП, окислы углерода CO_2 , окислы азота NO_2 , окислы серы SO_2 , углеводороды типа метан C_2H_4 имеют средний молярный вес порядка 50 г/моль.

35 Вычисляют общий вес (Q) загрязнителей в объеме луча зондирования как:

40

$Q = M \times \text{молярный вес}$

и их концентрацию как отношение веса Q к объему (V) луча зондирования

45

$$Q/V (\text{мг/м}^3)$$

Количественные оценки заявленного способа представлены ниже в примере

конкретной реализации.

Пример реализации способа

Заявленный способ может быть реализован по схеме фиг. 7. Функциональная схема устройства фиг. 7 содержит орбитальный комплекс наблюдения 1, типа космического аппарата (КА) «Ресурс» с установленными на его борту гиперспектрометром 2 типа «Астра» с широким полем зрения 3. Трассовую покадровую съемку запланированных районов 4 осуществляют по командам от бортового комплекса управления (БКУ) 5 из Центра управления полетом (ЦУП) 6 по радиолинии командного управления 7.

Результаты измерений записывают в буферное запоминающее устройство 8 с привязкой кадров по координатам от бортового устройства потребителей 9 системы позиционирования «ГЛОНАСС». В зонах радиовидимости КА с наземных пунктов, по командам БКУ, информацию измерений сбрасывают по мобильному каналу связи на наземные пункты приема информации (ППИ) 10. После предварительной обработки кадров по служебным признакам (номер витка, время съемки, координаты участка) на средствах 11, информацию передают в Центр тематической обработки 12, где через устройство ввода 13 она вводится в ПЭВМ 14 в стандартном наборе элементов: процессор 15, винчестер 16, оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) 17, дисплей 18, принтер 19, клавиатура 20. Спектрометр «Астра» имеет угол поля зрения 6° , при высоте полета носителя «Ресурс» 230 км, площадь кадра зондирования составит

120×20 км или $4 \cdot 10^8$ м². Приземной слой тропосферы, в котором наблюдается максимальная концентрация загрязнителей для Центрального региона (Московская, Рязанская, Калужская, Владимирская, Смоленская области) составляет по высоте ~ 200 м [см., например, «Методика расчета концентрации в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий», ОНД-86, Госгидромет, СССР, Ленинград, 1987 г, стр. 5]

При оговоренных исходных данных, объем луча зондирования (V) составит $8 \cdot 10^{10}$ м³

Для спектров падающего и отраженного потоков (графики фиг. 4, фиг. 6) приведенных к единому масштабу, средневзвешенные значения длин волн составили 550 нм и 660 нм, $\Delta\lambda \approx 110$ нм.

Энергия эталонного потока $E_{этал} = 5,1 \cdot 10^{12}$; энергия отраженного потока $E_{отр} = 0,8 \cdot 10^{12}$; $\Delta E = 4,3 \cdot 10^{12}$

Количество поглощенных квантов

$$N_0 = \frac{\Delta E}{h\nu} = 16,8 \cdot 10^{30}$$

5 Количество столкновений: $N = \frac{N_0}{e} = 6,2 \cdot 10^{30}$

Количество молей:

10 $M = \frac{N}{\text{число Авогадро}} = \frac{6,2 \cdot 10^{30}}{6,8 \cdot 10^{23}} = 0,92 \cdot 10^7$

15 Вес парниковых газов:

20 $M \times 50 \text{ г} = 4,6 \cdot 10^8 \text{ г}$

25 Концентрация в атмосфере $\frac{Q}{V} = 5,8 \text{ мг} / \text{м}^3$

30 Заявленный способ может быть реализован на существующей технической базе аналогов. Эффективность способа характеризуется глобальностью, оперативностью, достоверностью и точностью результатов измерений.

Способ позволяет измерять содержание парниковых газов в любом регионе, без наличия эталонных площадок в кадре измерений, независимо от коэффициента отражения падающего светового потока от подстилающей поверхности.

35 (57) Формула изобретения

Способ измерений содержания парниковых газов в атмосфере включает дистанционное получение спектограммы светового потока, отраженного от подстилающей поверхности, дважды прошедшего тропосферу, спектрометром с широким полем зрения в полосах переизлучений газовых молекул Лаймана, Бальмера, 40 Пашена, вычисление разниц между средневзвешенными длинами волн $\Delta\lambda$ и энергиями ΔE падающего и отраженного световых потоков, определение количества поглощенных квантов N_0 на трассе зондирования через отношение ΔE к энергии одного кванта $h\nu$ и количества столкновений N молекул парниковых газов с фотонами как $N=N_0/e$, расчет

45

количество молей (M) парниковых газов

$$M = \frac{N}{\text{число Авогадро}} \text{ и их веса } Q$$

10 в объеме луча зондирования умножением на средний молярный вес молекулы парниковых газов, оценку концентрации парниковых газов через отношение их веса Q к объему луча зондирования $V[m^3]$, исчисляемого из угла поля зрения спектрометра и приведенной высоты стратифицированного слоя тропосферы для региона проведения измерений.

20

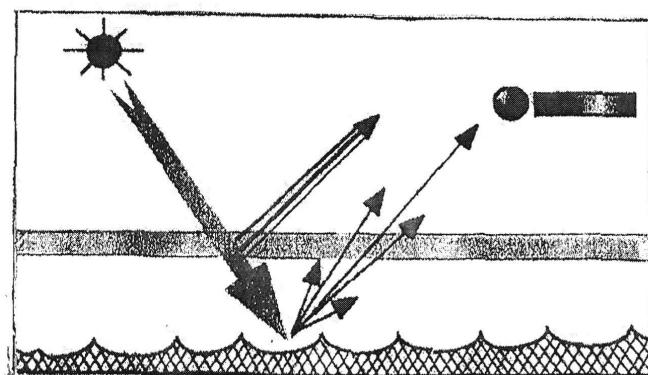
25

30

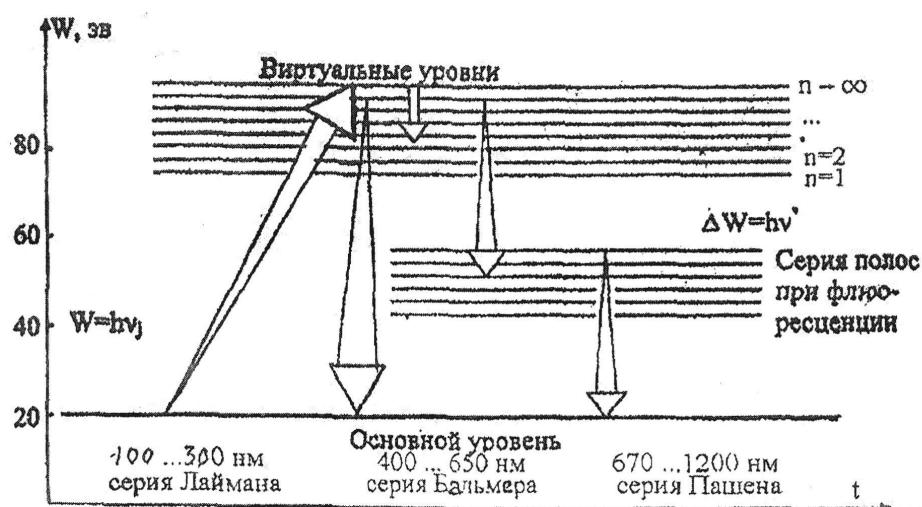
35

40

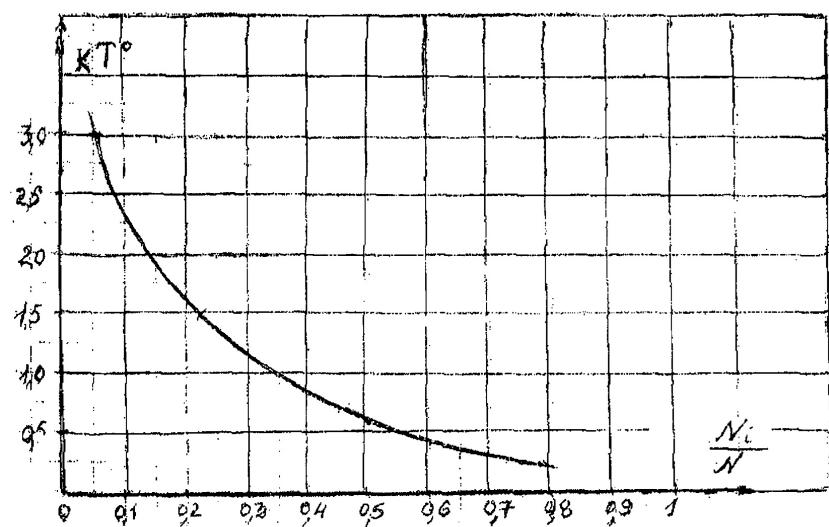
45



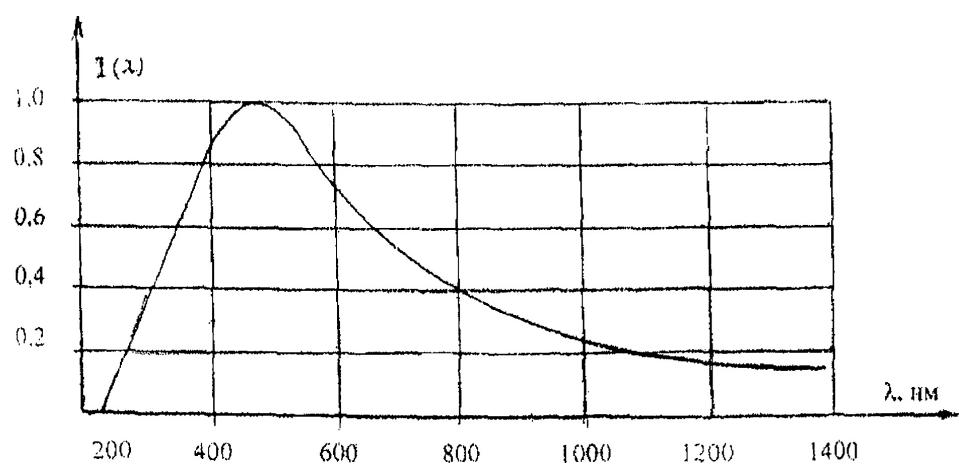
Фиг. 1



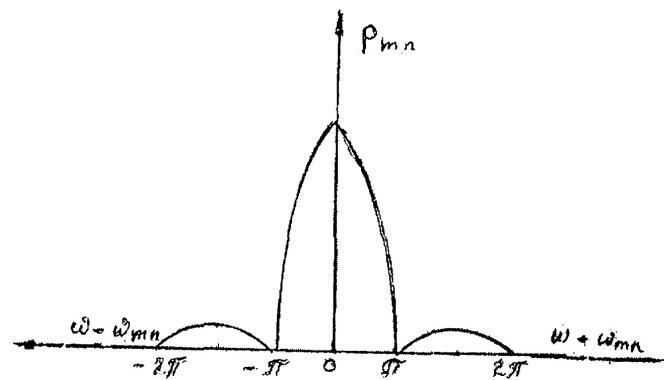
Фиг. 2



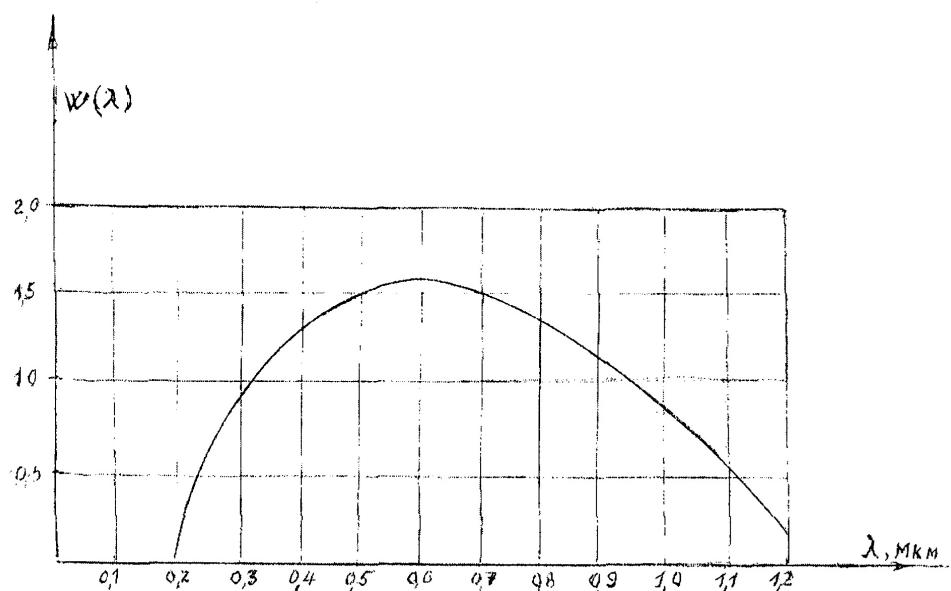
Фиг. 3



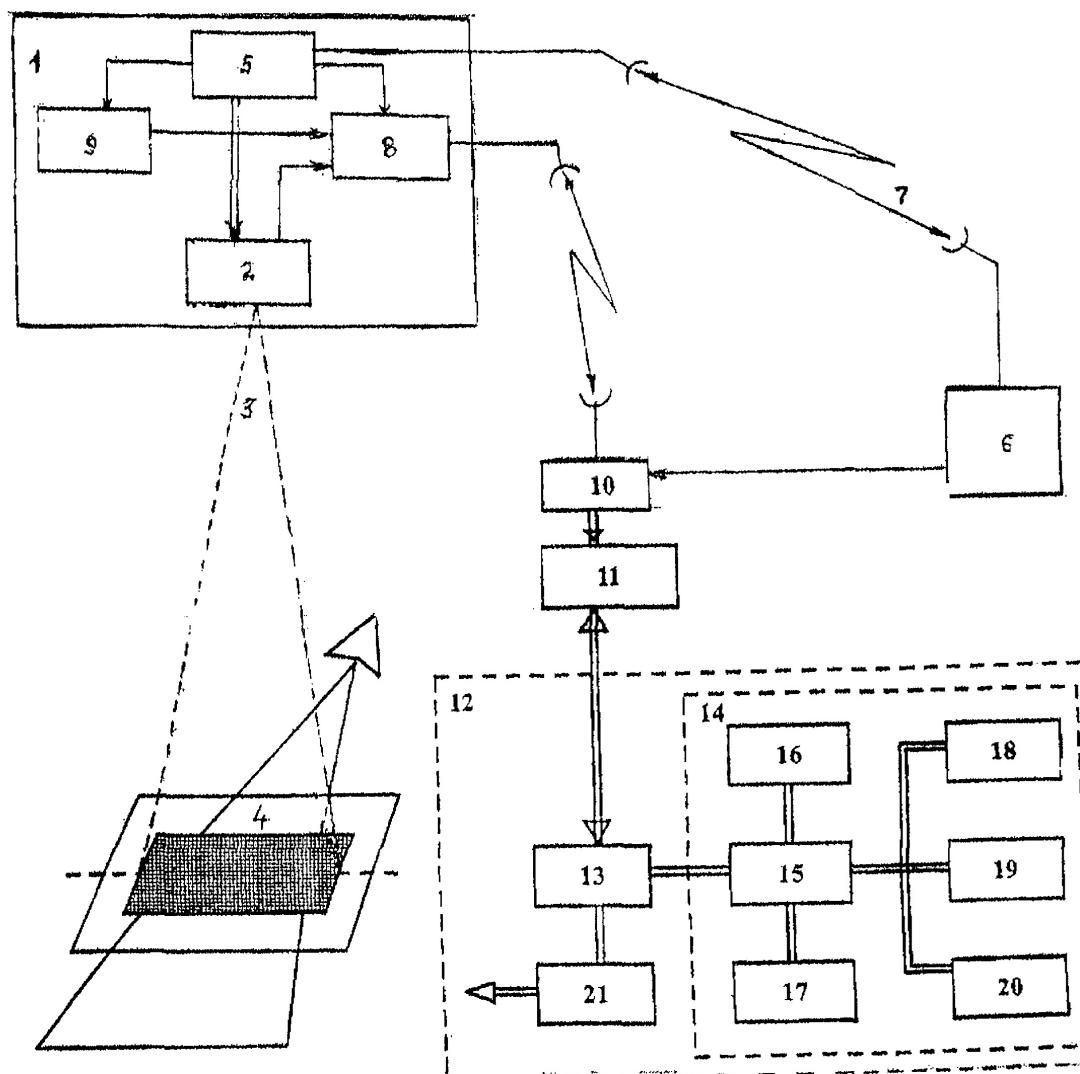
Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7