

УДК 528.8.04

## Применение метода дифференциального поглощения и рассеяния для оценки загрязненности подстилающей поверхности сельскохозяйственных угодий

В.А. Романюк<sup>1</sup>, С.В. Нестеренко<sup>2</sup>, И.А. Черепнев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальная академия национальной гвардии Украины (г. Харьков, Украина)

<sup>2</sup>Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова (г. Харьков, Украина)

<sup>3</sup>Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко (г. Харьков, Украина)

Решение проблемы охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов во многом зависит от разработки и внедрения методов оперативного контроля воздуха и воды. В связи с этим большой интерес вызывают вопросы, относящиеся к различным аспектам дистанционного мониторинга. Эти исследования в первую очередь направлены на выявление очагов загрязнения атмосферы и океана, оценку биологической продуктивности моря, состояния подстилающей поверхности и растительного покрова.

В статье проведен анализ относительно возможности применения лидарного двухчастотного метода зондирования земли для мониторинга загрязненности подстилающей поверхности сельскохозяйственных земель. Построение аналитической модели процесса обнаружения загрязняющих веществ базируется на методе дифференциального поглощения и рассеяния (ДПР), как наиболее чувствительном методе измерения малых концентраций газов. При этом учитываются все специфические для условий локации на протяженной трассе и параметров исследуемой области, факторы, которые обуславливают точность лидарных измерений.

Разработана аналитическая модель процесса обнаружения вредных воздушных примесей. Данная модель описывает процесс сравнения измеренной концентрации молекул газовой компоненты с ее пороговым (фоновым) значением. Исследование возможности реализации метода дифференциального поглощения и рассеяния показало, что процесс обнаружения вредных газовых примесей описывается аналитической моделью, которая учитывает условия дистанционного зондирования по наклонным трассам, зависимость эффективности измерений от состава исследуемой области, ослабления зондирующего излучения за счет поглощения фоновой компонентой газа на всей длине трассы.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, двухчастотный метод, сечение поглощения

**Актуальность работы.** Опасность, порождаемая хозяйственной деятельностью человека, сегодня уже превышает все размеры и результаты естественных катастроф и катаклизмов. Она со всех сторон подступила к жизненной среде человека. На сегодня существует реальная угроза дальнейшего существования человечества. Подтверждение этому мы видим в современном загрязнении мирового океана и атмосферы, трансграничном переносе загрязнителей, деградации почв, в опустынивании и исчезновении лесов отдельных территорий, в накоплении в биосфере вредных веществ. Последствиями вредного воздействия для природы мы видим в изменении климата за счет «парникового эффекта» и в периодическом выпадении кислотных дождей, а для человека - в онкозаболеваниях и в возникновении аллергических реакций у каждого третьего человека. И экологическая обстановка в Украине не является исключением.

Например, по территории Украины проходит уникальный объект транспортной инфраструктуры химического комплекса - аммиакопровод. Он является частью магистрального аммиакопровода от г. Тольятти (РФ) в г. Южный (Одесская обл.). Построенный в 1979 – 1981 годах и соответственно находится на грани срока безопасной эксплуатации. Общая длина аммиакопровода составляет 2417 км, из которых 1021 км проходит по территории 8 областей Украины. По данным специалистов, во время полной нагрузки каждый километр трубопровода содержит до 56 т аммиака. Несмотря на наличие систем автоматического контроля и перекрытия магистрали в случае чрезвычайных событий, опасность возникновения аварийных ситуаций остается высокой. Кроме того, аммиакопровод находится вблизи зоны вооруженного конфликта, поэтому существует опасность его повреждения в результате боевых действий или диверсии. По данным ГСЧС

Украины, в зоне возможного поражения в результате аварии аммиакопровода может оказаться от 200 до 15 000 человек [1]. В связи с этим является актуальной тема оперативного мониторинга загрязнения окружающей среды.

**Постановка проблемы и анализ литературы.** Дистанционные методы изучения природных сред известны уже давно. Это основные методы исследования в астрофизике, метеорологии и океанологии. Примерами могут служить определение атмосферного аэрозоля, водяного пара и озона по яркости и цвету дневного неба, океанической взвеси и растворенной органики — по цвету морской воды и т. д. Во всех этих исследованиях непосредственно измеряемыми величинами являются характеристики электромагнитного поля. Из них мы получаем информацию о свойствах среды, через которую оно прошло. Современное развитие дистанционных методов проходит под знаком двух выдающихся событий — освоения космоса и возникновения квантовой электроники. Установка приемников электромагнитного излучения на космических кораблях дала возможность одновременно получать огромное количество информации о глобальном состоянии планеты [2]. Для успешного использования лазерных систем зондирования и контроля газовых составляющих атмосферной среды необходимы количественные данные о характере распространения лазерного излучения в атмосферной среде. Распространение лазерного излучения в атмосфере сопровождается определенным набором явлений линейного и нелинейного взаимодействия, ни одно из которых не называется отдельно. Энергетическое затухание электромагнитных волн в атмосфере обусловлено, главным образом, явлениями его поглощения и рассеяния молекулами газов и различными аэрозольными частицами [3].

Проводятся исследования по компьютерному моделированию работы аэрозольного лидара с двумя приемными каналами для исследования эффекта усиления мощности обратно рассеянного в атмосфере излучения. Моделирование осуществлено с учетом несоосности приема рассеянного излучения в одном из приемных каналов. Определены требования к параметрам приемопередающей оптики лидара и геометрии измерительных трасс, обеспечивающие регистрацию эффекта усиления мощности обратно рассеянного излучения [4 - 5].

**Изложение основного материала.** Построение аналитической модели процесса обнаружения загрязняющих веществ базируется на методе ДПР, как наиболее чувствительном методе измерения малых концентраций газов.

Процесс обнаружения заключается в принятии решения о наличии веществ в зондируемом

объеме пространства на основе результатов лидарного измерения концентрации выбранных газов и сравнения полученного значения концентрации с некоторой пороговой величиной.

Решение об обнаружении принимается в случае превышения измеренного значения концентрации газа над ее пороговым значением. Такой алгоритм процесса обнаружения предусматривает выполнение определенного перечня и последовательности операций, обуславливающих получение достоверного результата. При реализации метода ДПР модель процесса обнаружения должна включать следующие операции.

1. Измерение текущего значения концентрации  $N_{изм}$  выбранной компоненты газа на основе сравнения принятых сигналов на длинах волн  $\lambda_0$  и  $\lambda_\omega$  (в центре и вне линии контура поглощения).

2. Вычисление порогового значения концентрации  $N_{пор}$  на основе анализа результатов измерения принятого сигнала на длине волны  $\lambda_0$ .

3. Сравнение измеренного ( $N_{изм}$ ) и порогового ( $N_{пор}$ ) значений концентрации и принятие решения о наличии (отсутствии) загрязнения в зондируемом объеме пространства.

Исходной посылкой при разработке модели явился тот факт, что дифференциальное уменьшение наблюдаемого сигнала на центральной длине волны  $\lambda_0$  фактически определяется лишь протяженностью  $\Delta R$  области зондирования, которая находится на расстоянии  $R$  от лидарной системы.

При использовании метода ДПР концентрация исследуемых молекул определяется по разнице сигналов, полученных от двух, имеющих небольшое различие в длине волны лазерных импульсов, рассеянных в обратном направлении. Дифференциальное уменьшение наблюдаемого сигнала  $\Delta E$  в районе длины волны  $\lambda_0$  возникает из-за ослабления сигнала от исследуемых молекул, на линию поглощения которых настроен лазер, и имеет вид [6]:

$$\Delta E = \Delta E_0 - \Delta E_\omega, \quad (1)$$

где

$$\Delta E_0 = E(\lambda_0, R) - E(\lambda_0, R + \Delta R) \quad (2)$$

есть уменьшение сигнала на длине волны  $\lambda_0$ , принятого с расстояния  $R$  и  $(R + \Delta R)$ ;

$$\Delta E_\omega = E(\lambda_\omega, R) - E(\lambda_\omega, R + \Delta R) \quad (3)$$

является эффективным представлением дифференциального уменьшения сигнала на длине волны  $\lambda_\omega$  из-за ослабления, не связанного с поглощением и рассеянием на исследуемых молекулах.

При этом  $\lambda_0$  — длина волны лазерного импульса, выбранной близкой к значению максимума линии поглощения исследуемой

молекулы,  $\lambda_\omega$  – длина волны лазерного импульса, перенастроенного на крыло линии поглощения. Схематическое изображение лазерных обратных сигналов при использовании метода дифференциального поглощения и рассеяния показано на (рис 1).

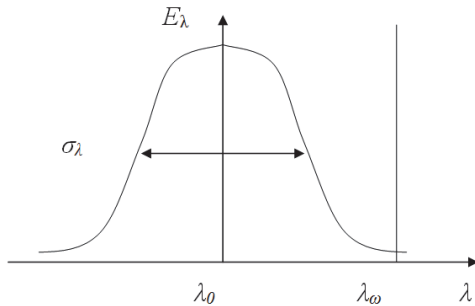


Рис. 1. Зависимость энергии рассеянного сигнала от длины волны излучения

В соответствии с алгоритмом метода ДПР, регистрация суммарного уменьшения сигнала позволяет измерить текущее значение концентрации газовой компоненты в зондируемом объеме пространства. В этом случае текущее значение концентрации газа описывается известным выражением [6, 7]:

$$N_{\text{зм}}(R) = \frac{1}{2\sigma(\lambda_0)\Delta R} \times \left[ \ln \frac{E(\lambda_0, R)E(\lambda_\omega, R + \Delta R)}{E(\lambda_0, R + \Delta R)E(\lambda_\omega, R)} \right] + \ln \left[ \frac{\beta(\lambda_0, R + \Delta R)\beta(\lambda_\omega, R)}{\beta(\lambda_0, R)\beta(\lambda_\omega, R + \Delta R)} \right] - 2[K(\lambda_0, R) - K(\lambda_\omega, R)]\Delta R \quad (4)$$

где  $\Delta R$  – длина взаимодействия лазерного излучения с областью загрязнения;  $\sigma(\lambda)$  – сечение поглощения молекул исследуемого газа.

Данная модель расчета текущего значения концентрации исследуемого газа не учитывает специфические особенности условий локации на протяженных трассах на достоверность получаемой информации. В первую очередь это касается правильного выбора протяженности  $\Delta R$  анализируемого объема пространства, поскольку он характеризует длину области взаимодействия лазерного излучения с поглощающей средой. В натуральных экспериментах этот параметр обычно задается априорно, однако в условиях зондирования удаленных на значительное расстояние локальных объемов пространства по наклонным трассам его значение будет зависеть от угла подсвета  $\theta$ . В этом случае:

$$\Delta R = \frac{L}{\cos\theta} \quad (5)$$

где  $L$  – поперечный размер области.

Вторым важным фактором является учет зависимости формы контура линий поглощения исследуемых молекул и величины сечения поглощения от параметров среды. Известно, что контур линии поглощения молекулы является функцией от давления  $P$  и температуры  $T$  среды и описывается известным выражением [7]:

$$\gamma(P, T) = \gamma(P_0, T_0) \left( \frac{P}{P_0} \right) \left( \frac{T_0}{T} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

где  $\gamma(P, T)$  – полуширина контура линии поглощения;  $\gamma(P_0, T_0)$  – полуширина контура линии поглощения при  $P_0 = 1$  атм и  $T_0 = 300$  К.

Когда уширение давлением доминирует, контур линии поглощения является лоренцевским и сечение поглощения описывается формулой [5],

$$\sigma(P, T, \nu) = \frac{\sigma_0}{\pi} \frac{\gamma(P, T)}{(\nu - \nu_0) + \gamma^2(P, T)}, \quad (7)$$

где  $\sigma_0 = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma(\nu) d\nu$  – интегральная интенсивность поглощательного перехода;  $\sigma(\nu)$  – спектральное сечение поглощения молекулой;  $\nu_0$  – частота, соответствующая центру линии поглощения молекулы.

Выражение (7) учитывает также несовпадение длины волны зондирующего излучения с центром линии поглощения, что является существенным фактором при выборе источника излучения лидара и оценке достоверности измеряемых данных.

При реализации метода ДПР уровни сигналов  $E(\lambda_0, R)$  и  $E(\lambda_\omega, R)$  на двух разных длинах волн, принятых с расстояния  $R$ , фактически не зависят от процесса поглощения излучения в пределах следа. Поэтому, при незначительном отличии длин волн  $\lambda_0$  и  $\lambda_\omega$ , что обычно имеет место в ДПР-лидарах, отношение  $E(\lambda_0, R) / E(\lambda_\omega, R)$  будет приближаться к 1, если отсутствует поглощение на трассе [6]. В случае, когда значения фоновой концентрации поглощающих компонент достаточно большие (например, для  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ), то следует учитывать поглощение на всей протяженной трассе. Тогда указанное отношение можно заменить множителем

$$\frac{E(\lambda_0, R)}{E(\lambda_\omega, R)} = \exp \left( -2 \int_0^R N_{\text{фон}}(R) \sigma(\lambda) dR \right) \quad (8)$$

где  $N_{\text{фон}}(R)$  – фоновая концентрация исследуемого газа на расстоянии  $R$ .

Таким образом, подставляя соотношения (5), (6), (7), (8) в (4), получим окончательное выражение, описывающее процедуру измерения текущей концентрации выбранного газа в исследуемой области:

$$N_{изм} = \cos\theta \times \left\{ \frac{(v - v_0)^2 + \left[ \gamma(P_0, T_0) \left( \frac{P}{P_0} \right) \left( \frac{T_0}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2}{2L\sigma_0\gamma(P_0, T_0) \left( \frac{P}{P_0} \right) \left( \frac{T_0}{T} \right)^{\frac{1}{2}}} \times \left[ \ln \frac{E(\lambda_\omega, R + \Delta R)}{E(\lambda_\omega, R)} \cdot e^{-2 \int_0^R N_{ФОН}(R)\tau(\lambda)dR} + \ln \frac{\beta(\lambda_\omega, R + \Delta R) \cdot \beta(\lambda_\omega, R)}{\beta(\lambda_\omega, R) \cdot \beta(\lambda_\omega, R + \Delta R)} - [K(\lambda_\omega, R + \Delta R) - K(\lambda_\omega, R)] \right] \right\} \quad (9)$$

Для такой методики измерений время детектирования сигнала с учетом стробирования по дальности описывается формулой,

$$\tau_d = \frac{2 \cdot L}{C \cdot \cos\theta}, \quad (10)$$

где  $C$  – скорость света.

Зависимости измеренных значений концентрации исследуемых веществ от отношения принятых сигналов для разных значений сечения поглощения  $\sigma$  и поперечного размера исследуемой  $L$  области представлены на графиках рис. 2.

Анализ графиков показывает, что изменения объемов и параметров области зондирования и условий его локации приводят к существенным вариациям значений измеряемой концентрации исследуемого газа. Это обуславливает необходимость точного определения модельных профилей исходных величин, наиболее адекватно отражающих условия зондирования газов, и оптимального выбора методики лидарных измерений, позволяющей снизить систематические ошибки.

Для организации процесса обнаружения загрязняющих веществ алгоритм функционирования лидарной системы должен также обеспечить вычисление порогового значения концентрации исследуемого газа. Для метода ДПР этот принцип выражается в механизме расчета предельного (минимального) значения концентрации выбранной газовой компоненты, которое может быть зарегистрировано данной лидарной системой с заданными характеристиками обнаружения ( $D$  и  $F$ ). При этих условиях для обнаружения дифференциального уменьшения энергии сигнала, рассеянного в обратном направлении с длиной волны  $\lambda_0$ , требуется соблюдение неравенства [6]:

$$E(\lambda_0, R) - E(\lambda_0, R + \Delta R) > \frac{E(\lambda_0, R + \Delta R)}{q}, \quad (11)$$

где  $q$  – отношение сигнал/шум на выходе детектора.

Запишем лидарное уравнение для обратного рассеяния сигнала на длине волны  $\lambda_0$ , принятого с расстояния  $R$ :

$$E(\lambda_0, R) \equiv E_0 \xi(\lambda_0) \frac{A \cdot Y(R)}{R^2} \times \beta(\lambda_0, R) \frac{C \cdot \tau_d}{2} \cdot e^{-2 \int_0^R \bar{K}(R) dR}. \quad (12)$$

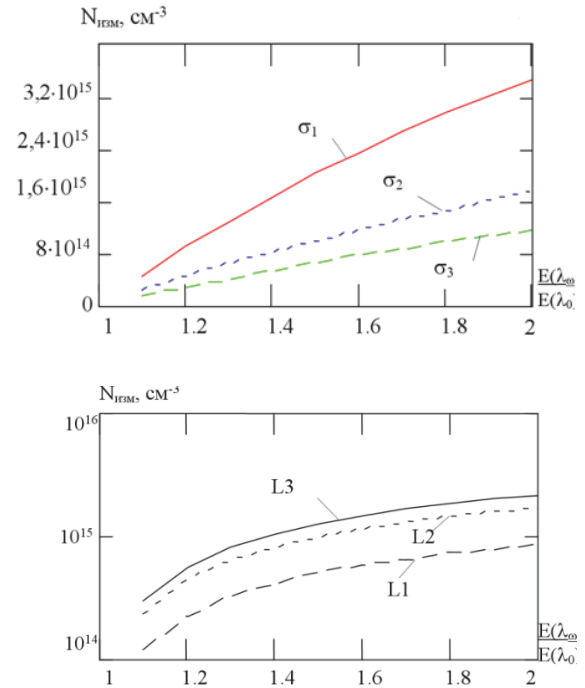


Рис. 2. Зависимости измеренных значений концентрации исследуемых веществ от отношения принятых сигналов

Выражение для обратного сигнала на длине волны  $\lambda_0$ , принятого с расстояния  $(R + \Delta R)$ , будет иметь вид:

$$E(\lambda_0, R + \Delta R) = E_0 \xi(\lambda_0) \frac{AY(R)}{(R + \Delta R)^2} \times \beta(\lambda_0, R + \Delta R) \frac{C\tau_d}{2} \times \exp \left( -2 \int_0^{R+\Delta R} [\bar{K}(R) + N(R)\delta(\lambda)] dR \right). \quad (13)$$

Тогда, подставив выражения (12) и (13) в неравенство (11), можно получить критерий для порогового объемного числа молекул, которое можно определить, с заданными характеристиками обнаружения, используя метод ДПР [6,7]:

$$N(R)_{ПОР} = \frac{1}{2\sigma^A(\lambda_0)\Delta R} \ln \left[ \left\{ 1 + \frac{1}{q} \right\} \left( \frac{R}{R + \Delta R} \right)^2 \right] \quad (14)$$

При выводе этого выражения было принято, что  $\Delta R$  достаточно малая величина, чтобы считать коэффициент поглощения постоянным во всем интервале  $\Delta R$ . Этого допущения достаточно, чтобы утверждать, что в интересующей точке пространства действительно неравенство  $N(R)\sigma^A(\lambda_0) \gg \bar{K}(\lambda_0, R)$ .

Очевидно, что чем меньше отношение сигнал/шум, тем больше пороговое объемное число молекул, определяемое уравнением (14). При этом:

$$q = f(D, F). \quad (15)$$

С учетом газодинамических характеристик исследуемой области ( $T$ ,  $P$ ), и зенитного угла наблюдения ( $\theta$ ), выражение (14) примет окончательный вид:

$$N_{nop} = \cos\theta \times \frac{(v - v_0)^2 + \left[ \gamma(P_0, T_0) \left( \frac{P}{P_0} \right) \left( \frac{T}{T_0} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2}{2\sigma_0 \gamma(P_0, T_0) \left( \frac{P}{P_0} \right) \left( \frac{T}{T_0} \right)^{\frac{1}{2}} L} \times \ln \left[ \left\{ 1 + \frac{1}{q} \right\} \left( \frac{R}{R + \Delta R} \right)^2 \right]. \quad (16)$$

Критерий обнаружения цели будет описываться выражением:

$$N_{изм}(\sigma, \Delta R) > N_{nop}(D, F, \sigma, \Delta R). \quad (17)$$

Тогда, в соответствии с критерием,  $\lambda = \lambda_0$ ,  $R \gg \Delta R$ , модель обнаружения газа по результатам измерения концентрации исследуемой компоненты будет описываться формулой, полученной в результате подстановки в (7) выражений (9) и (16):

$$\Delta N = \frac{\cos\theta}{2\sigma(\lambda_0, \gamma, P, T)L} \times \ln \left[ \frac{E(\lambda_0, R + \Delta R)}{E(\lambda_0, R)} \right] \times \exp \left( -2 \int_0^R N_{фон}(R) \sigma(\lambda) dR - \ln \left( 1 + \frac{1}{q(D, F, \bar{n}_{пом})} \right) \right), \quad (18)$$

где  $\sigma(\lambda_0)$  – описывается выражением (7).

Данная модель описывает процесс сравнения измеренной концентрации молекул газовой компоненты с ее пороговым значением, которое зависит от характеристик обнаружения  $D$  и  $F$ , параметров приемника и условий локации и определяет превышение измеренной концентрации над пороговой. Она показывает что если  $\Delta N$  – положительное число, то принимается решение о

превышении концентрации исследуемого вещества фонового значения.

Анализ полученных результатов показал, что для заданных характеристик обнаружения ( $D$ ,  $F$ ), известных параметрах лидарной системы и условий локации процесс измерения концентрации выбранной компоненты газа будет осуществляться при определенном соотношении уровней принятых сигналов на длинах волн  $\lambda_0$  и  $\lambda_w$ . При этом уровни сигналов должны быть не менее пороговой чувствительности приемного устройства лидара, а дифференциальное изменение их соотношения должно быть заметным по сравнению с шумами системы.

## Литература

1. Аналітичний огляд стану техногенної та природної безпеки в Україні за 2015 рік [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.dsns.gov.ua/files/prognoz/report/2015/Glava\\_1.pdf](http://www.dsns.gov.ua/files/prognoz/report/2015/Glava_1.pdf).
2. Цыплакова Е.Г. Лазерный экологический дистанционный контроль атмосферы: учебное пособие / Е.Г. Цыплакова, А.И. Потапов, В.Е. Поляков. – СПб.: Нестор-История, 2013. – 360 с.
3. Васильківський І.В. Аналіз рівняння лазерного зондування атмосфери за допомогою лідара / І. В. Васильківський, В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вип. 6 (27). – 2009. – С.27 - 32.
4. Лысенко С.А. Многочастотное лидарное зондирование загрязненности атмосферы твердыми частицами с разделением на респираторные фракции / С.А. Лысенко, М.М. Кугейко, В.В. Хомив // Оптика атмосферы и океана. – Т. 29. – № 1. – 2016. – С.70 - 79.
5. Банах В.А. Аэрозольный лидар для исследования усиления обратного атмосферного рассеяния / В.А. Банах, И.А. Разенков, И.Н. Смалихо // Оптика атмосферы и океана. – Т. 28. – № 1. – 2015. – С. 5 -11.
6. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование / Р. Межерис. – М.: Мир, 1987. – 550 с.
7. Балин Ю.С. Система оперативного контроля загрязнения воздушного бассейна «Город» / Ю.С. Балин, Б.Д. Белан // Оптика атмосферы и океана. – Т. 7. – № 2. – 1994. – 163 с.

## Анотація

### Застосування методу диференціального поглинання і розсіяння для оцінки забрудненості підстильної поверхні сільськогосподарських угідь

В.А. Романюк, С.В. Нестеренко, І.А. Черепньов

Вирішення проблеми охорони навколишнього середовища та раціонального використання природних ресурсів багато в чому залежить від розробки і впровадження методів оперативного контролю повітря і води. У зв'язку з цим великий інтерес викликають питання, пов'язані з різним

аспектам дистанційного моніторингу. Ці дослідження в першу чергу спрямовані на виявлення вогнищ забруднення атмосфери і океану, оцінку біологічної продуктивності моря, стану підстильної поверхні і рослинного покриву.

У статті проведено аналіз щодо можливості застосування лідарного двочастотного методу зондування землі для моніторингу забруднення підстильної поверхні сільськогосподарських земель. Побудова аналітичної моделі процесу виявлення забруднюючих речовин базується на методі диференціального поглинання і розсіяння (ДПР), як найбільш чутливого методі вимірювання малих концентрацій газів. При цьому враховуються всі специфічні для умов локації на протяжній трасі і параметрів досліджуваної області, фактори, які зумовлюють точність лідарних вимірів.

Розроблено аналітичну модель процесу виявлення шкідливих повітряних домішок. Дана модель описує процес порівняння вимірної концентрації молекул газової компоненти з її граничним (фоновим) значенням. Дослідження можливості реалізації методу диференціального поглинання і розсіяння показало, що процес виявлення шкідливих газових домішок описується аналітичною моделлю, яка враховує умови дистанційного зондування по похилих трасах, залежність ефективності вимірювань від складу досліджуваної області, ослаблення зондуючого випромінювання за рахунок поглинання фонові компонентою газу на всій довжині траси.

**Ключові слова:** дистанційне зондування, двочастотний метод, перетин поглинання.

## Abstract

### Application of Differential Absorption and Scattering Method for Evaluating Pollution of Underlying Surface of Agricultural Lands

V.A. Romanyuk, S.V. Nesterenko, I.A. Cherepnev

The solution to the problem of environmental protection and rational use of natural resources depends largely on the development and implementation of methods for air and water operational control. Thus, it is very interesting to consider the issues relating to various aspects of remote monitoring. These studies are primarily aimed at identifying focuses of atmosphere and ocean pollution, evaluating biological productivity of sea, the state of the underlying surface and vegetation.

The analysis of the possibility of using the earth lidar sensing dual-frequency method to monitor the contamination of the agricultural land underlying surface is conducted. Construction of analytical model of polluting substances detection process is based on the differential absorption and scattering (DAS) method, which is the most sensitive method for measuring small concentrations of gases. This method takes into account the factors that determine the accuracy of the lidar measurements and characterize both location conditions on an extensional track and studied area parameters.

An analytical model of detection process of harmful air pollutants is developed. The model describes the process of comparing measured concentration of gas component molecules to its threshold (background) value. Study the feasibility to use the differential absorption and scattering method demonstrates that the harmful gas impurities detection process can be described by an analytical model taking into account the remote sensing of the inclined tracks conditions and a dependence of measurement effectiveness on the composition of the studied area and the attenuation of the sensing radiation by absorbing background gas components on the entire length of the track.

**Keywords:** remote sensing, dual-frequency method, absorption cross section.

Представлено від редакції: В.І. Мельник / Presented on editorial: V.I. Melnyk

Рецензент: М.М. Кірієнко / Reviewer: M.M. Kirijenko

Подано до редакції / Received: 15.02.2017