

УДК 551.576

DOI: 10.18799/29495407/2025/3/97

Шифр специальности ВАК: 1.2.2, 1.6.18, 2.3.1

Численная модель для оценки вклада различных компонент кристаллического облака в ослабление оптического излучения. Часть 1. Схема качественной оценки

О.В. Шефер^{1, 2✉}, В.А. Сенников³, А.А. Алейник¹

¹ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск*

² *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, г. Томск.*

³ *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, г. Томск*

✉ shefer@tpu.ru

Аннотация. Предложено аналитическое выражение для коэффициента ослабления оптического излучения с учетом различных микрофизических параметров дисперсной среды. Формула представляет собой произведение фактора ослабления на модифицированную геометрическую величину. Модифицированная характеристика получена на основе корреляционных соотношений для средней площади тени ансамбля частиц. Иллюстрируется схема для качественной оценки вклада различных составляющих газовой-дисперсной среды в общее ослабление излучения многокомпонентным кристаллическим облаком.

Ключевые слова: ослабление, оптическое излучение, ледяное облако, схема оценки

Для цитирования: Шефер О.В., Сенников В.А., Алейник А.А. Численная модель для оценки вклада различных компонент кристаллического облака в ослабление оптического излучения. Часть 1. Схема качественной оценки // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2025. – Т. 3. – № 3. – С. 18–26. DOI: 10.18799/29495407/2025/3/97

UDC 551.576

DOI: 10.18799/29495407/2025/3/97

Numerical model for estimating contribution of different components of crystalline cloud to extinction of optical radiation. Part 1. Scheme of qualitative estimation

O.V. Shefer^{1, 2✉}, V.A. Sennikov³, A.A. Aleinik¹

¹ *National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation*

² *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

³ *V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Science,
Tomsk, Russian Federation*

✉ shefer@tpu.ru

Abstract. An analytical expression for extinction coefficient of optical radiation is proposed, taking into account various microphysical parameters of dispersed medium. The formula is product of the extinction factor and modified geometric value. The modified characteristic is obtained based on correlation relations for average area of shadow of ensemble of particles. The paper illustrates the scheme for qualitative assessing the contribution of various components of a gas-dispersed medium to the common extinction of radiation by a multicomponent crystalline cloud.

Keywords: extinction, optical radiation, ice cloud, estimation scheme

For citation: Shefer O.V., Sennikov V.A., Aleinik A.A. Numerical model for estimating contribution of different components of crystalline cloud to extinction of optical radiation. Part 1. Scheme of qualitative estimation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2025, vol. 3, no. 3, pp. 18–26. DOI: 10.18799/29495407/2025/3/97

Введение

Исследованию ослабления электромагнитного излучения ледяными облаками во всем мире уделяется большое внимание [1–3]. Эта оптическая характеристика является значимой в изучении радиационного баланса атмосферы, распространения излучения, погодообразующих процессах, в построении моделей локального и глобального климата, а также при исследовании аэродисперсных сред оптическими методами [4, 5].

В состав кристаллических облаков входит большое разнообразие частиц различных по форме, размерам и ориентации в пространстве. К настоящему времени для хаотически ориентированных частиц большой объем результатов научного исследования по ослаблению излучения представлен в научной литературе [6, 7]. В работах демонстрируется, как фактор ослабления может отличаться от своего асимптотического значения, равного 2. Частицы, соизмеримые с длиной волны падающего излучения, и крупные преимущественно ориентированные пластинчатые кристаллы принимают значения фактора экстинкции из наибольшего промежутка от 0 до 4 [8, 4].

В природных условиях в состав ледяных облаков могут входить различные виды частиц [1, 2, 9]. При этом на характеристики ослабления может влиять преимущественно одна из составляющих среды. А также возможно, что сразу несколько компонент облака обеспечивают соизмеримый вклад в экстинкцию. Результаты численного эксперимента, касающиеся этой проблемы, практически отсутствуют в научной литературе.

В состав тестируемой аэродисперсной среды в той или иной мере входит газовая компонента. Природа газа, его концентрация (давление), температура могут существенным образом влиять на величину ослабления среды, в составе которой он содержится [10]. Одной из основных характеристик газового компонента, полученной с использованием оптических методов зондирования атмосферы, является молекулярное поглощение. Данные спектральной зависимости этой величины могут быть взяты из различных источников. Среди широко известных баз данных по спектральным линиям поглощения (ПСЛ) различными газами можно выделить HITRAN и HITEMP [11–13]. При рассмотрении газовой-дисперсной среды на определенных спектральных диапазонах влияние на ослабление

одной из компонент считают фоновым. Но это не всегда оправдано и может привести к ошибочному представлению. К настоящему времени вопрос о совместном влиянии молекулярного поглощения и аэрозольного ослабления на общее пропускание излучения аэродисперсной средой слабо освещен в научной литературе.

В данной работе предлагается схема для качественной сравнительной оценки вклада различных составляющих кристаллического облака в ослабление оптического излучения. Здесь понятие «оптический диапазон», включающий спектр от видимого до среднего ИК-диапазона, рассматривается в широком смысле этого слова.

Формализм расчета

Известно, что ослабление лучистой энергии можно определить на основе закона сохранения энергии: «ослабление=рассеяние+поглощение» [14]. Для расчета ослабления дисперсной компонентой значимыми являются обе составляющие (рассеяние и поглощение). Для расчета ослабления газом учитывается, как правило, только поглощение. При этом молекулярное рассеяние пренебрежимо мало.

Общий коэффициент ослабления для газовой-дисперсной среды определяется [1] как

$$\alpha_{\text{ext}} = \sum_{i=1}^m \alpha_{\text{ext}}^i, \quad (1)$$

где α_{ext}^i – коэффициент ослабления газовым компонентом какой-либо природы или совокупностью частиц определенного вида. Каждый вид имеет отличительные свойства по физико-химическим параметрам, по форме или по характеру ориентации. Здесь m есть количество видов различных компонент.

При анализе экстинкции невозмущенной термическими процессами атмосферы основными характеристиками газовой составляющей являются молекулярное поглощение (K_{mol}) и давление газа (P).

$$K_{\text{abs}} = P \cdot K_{\text{mol}}, \quad (2)$$

где K_{abs} – коэффициент поглощения. Как было отмечено выше, коэффициент ослабления (α_{ext}) газовой средой определяется коэффициентом поглощения (т. е. $\alpha_{\text{ext}} \approx K_{\text{abs}}$ (1), (2)). Ниже для удобства восприятия различий коэффициентов ослабления излучения будем использовать обозначения K_{abs} (для газа) и α_{ext} (для частиц).

Для расчета коэффициента ослабления (α_{ext}) и фактора ослабления (Q_{ext}) дисперсным компонентом воспользуемся следующими соотношениями:

$$\alpha_{\text{ext}} = \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} S_{\text{ext}} \cdot N(a) da, \quad (3.1)$$

$$\bar{S}_{\text{sq}} = \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} S_{\text{sq}} \cdot N(a) da, \quad (3.2)$$

$$Q_{\text{ext}} = \alpha_{\text{ext}} / \bar{S}_{\text{sq}}, \quad (3.3)$$

где $\bar{S}_{\text{sq}}$ – усредненная площадь тени для ансамбля частиц; S_{sq} – площадь тени частицы; S_{ext} – сечение ослабления; a – определяющий размер частицы (в частности, для сферы или пластинки это радиус); $a_{\min}$ – минимальный и $a_{\max}$ – максимальный размеры частиц рассматриваемого объема.

Согласно многочисленным натурным исследованиям ледяных облаков модифицированное гамма-распределение

$$N(a) = C \frac{\mu^{\mu+1}}{G(\mu+1)} \cdot \frac{1}{a_m} \cdot \left(\frac{a}{a_m} \right)^{\mu} \exp\left(-\frac{\mu a}{a_m} \right) \quad (4)$$

вполне удовлетворительно описывает распределение размеров совокупности облачных кристаллов [1]. Соотношение (4) включает в себя следующие параметры: C – концентрация частиц; a_m – размер частицы (например, радиус пластинки), соответствующий максимуму функции $N(a)$. Для модифицированного гамма-распределения (4) средний размер $\bar{a}$ частиц рассчитывается как $\bar{a} = a_m(1+1/\mu)$. μ – безразмерный параметр, характеризующий крутизну склонов $N(a)$ максимума (характеристика разброса частиц по размерам).

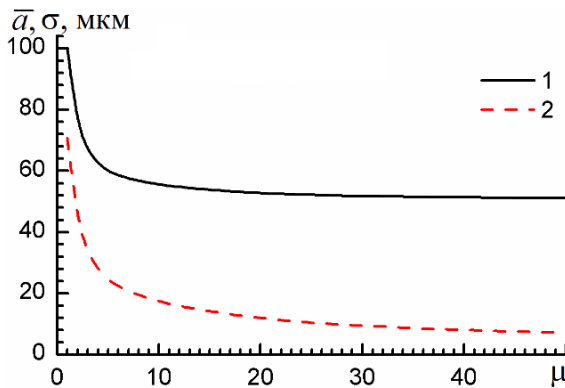


Рис. 1. Статистические характеристики для модифицированного гамма-распределения при $a_m=50$ мкм: 1 – $\bar{a}(\mu)$, 2 – $\sigma(\mu)$

Fig. 1. Statistical characteristics for the modified gamma distribution at $a_m=50$ μm: 1 – $\bar{a}(\mu)$, 2 – $\sigma(\mu)$

Для модального размера $a_m=50$ мкм и разных значений μ на рис. 1 представлены статистические характеристики (среднее значение $\bar{a}$ и среднеквадратическое отклонение σ). Наибольшие различия значений $\bar{a}$ (и $\sigma(a)$) наблюдаем при $\mu=1$ и $\mu=2$, т. е. для случаев, когда модальное значение $N(a)$ слабо выражено.

В природе очень редко встречаются случаи, когда $\mu > 30$. Из рис. 1 видно, что для $\mu \approx 20$ величина $\sigma(a)$ ($\sigma(a) \approx 11,5$ мкм) не многим отличается от среднеквадратического отклонения ($\sigma(a) \approx 7,1$ мкм) при $\mu=50$.

Обсуждение результатов исследования

Для представления энергетической характеристики ослабления, как правило, рассматривают коэффициент ослабления (α_{ext}). Для удобства оценки α_{ext} (3.1) на основе данных фактора ослабления (3.3) и средней площади тени частиц (3.2) представим $\alpha_{\text{ext}} = Q_{\text{ext}} \cdot S_m$, где S_m – модификация средней площади тени частиц. Здесь $S_m = l^{-1} \cdot \bar{S}_{\text{sq}*}$, $\bar{S}_{\text{sq}*}$ – средняя площадь тени частиц (3.2), но без учета концентрации в единице объема. Концентрацию представим как $C = \kappa \cdot l^{-1}$, κ – безразмерная величина ($C = \kappa \cdot l^{-1}$, $C = C'$ при $\kappa=1$, $1/\text{литр} = l^{-1}$ – размерность концентрации).

Заметим, что в научной литературе традиционно размерность коэффициента ослабления для кристаллических облаков представляют в км^{-1} , размеры частиц – в мкм и концентрацию частиц – в л^{-1} [1, 4, 9, 15]. По этой причине именно в этих единицах измерения демонстрируются соответствующие входные для расчета параметры и результаты расчета. Обратим внимание на размерность коэффициента ослабления, представленного в виде сомножителей $\alpha_{\text{ext}} = Q_{\text{ext}} \cdot S_m \cdot \kappa$ (или $\alpha_{\text{ext}} = Q_{\text{ext}} \cdot \bar{S}_{\text{sq}*} \cdot C' \cdot \kappa$). Размерность α_{ext} – обратная мера длины (здесь км^{-1}), размерность $\bar{S}_{\text{sq}*}$ – мера площади (здесь мкм^2), размерность C – обратный объем (здесь л^{-1}), Q_{ext} – безразмерная величина. Очевидно, при расчете α_{ext} следует согласовать соответствующие размерности входных параметров.

На рис. 2 демонстрируется зависимость $S_m(\bar{a})$ с учетом концентрации кристаллов $C=1 \text{ л}^{-1}$ (т. е. $C=C'$). Размерность горизонтальной шкалы $\bar{a}$ – в мкм, размерность вертикальной шкалы S_m – в км^{-1} (из расчета: площадь / литр). Кривые 1–5 на рис. 2 представляют зависимость $S_m(\bar{a})$, рассчитанную с учетом функции распределения частиц по размерам. Кривые 4 и 5 слабо различаются. Из рисунка видно, что чем больше дисперсия размеров частиц ($\mu \rightarrow 1$), тем выше значения S_m . Для расчета коэффициента ослабления нужно умножить значение

фактора ослабления на соответствующую величину S_m (принимая во внимание значения $\bar{a}$ и μ). Кроме того, нужно учесть концентрацию частиц, величина которой имеет размерность $[л^{-1}]$, тогда на выходе размерность коэффициента ослабления будет в $км^{-1}$. Например, $\bar{a}=50$ мкм, $\mu=2$, $S_m=0,1$ $км^{-1}$ (рис. 2). Если $Q_{ext}=2$, $C=k$ $л^{-1}=5$ $л^{-1}$ (при $k=5$), тогда $\alpha_{ext}=S_m \cdot Q_{ext} \cdot k=0,1$ $км^{-1} \cdot 2 \cdot 5=1$ $км^{-1}$.

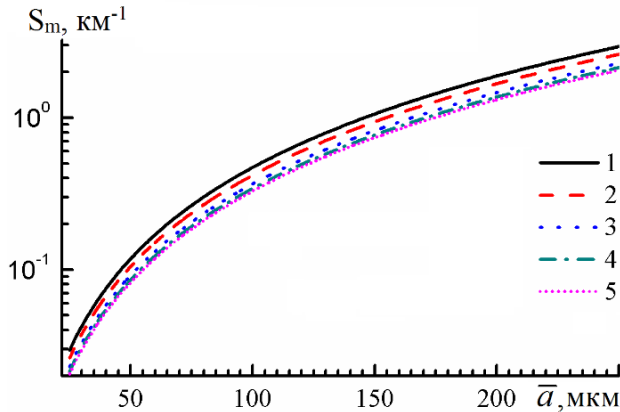


Рис. 2. Модифицированная средняя площадь тени рассеивателя в зависимости от $\bar{a}$ среднего размера частиц: 1 – $\mu=1$; 2 – $\mu=2$; 3 – $\mu=5$; 4 – $\mu=10$; 5 – $\mu=20$

Fig. 2. Modified average area of the scatterer shadow depending on the average particle size: 1 – $\mu=1$; 2 – $\mu=2$; 3 – $\mu=5$; 4 – $\mu=10$; 5 – $\mu=20$

Напомним, что фактор ослабления для отдельной пластинки может меняться в пределах от 0 до 4. Для системы преимущественно ориентированных пластинок, после усреднения по размерам, фактор ослабления, как правило, принимает значения не ниже 0,1 и не выше 3,9. Тогда легко провести качественную оценку интервала возможных значений коэффициента ослабления. Нижняя граница составляет: $\alpha_{ext}=0,1 \cdot S_m \cdot k$ (при $Q_{ext}=0,1$), верхняя граница: $\alpha_{ext}=3,9 \cdot S_m \cdot k$ (при $Q_{ext}=3,9$).

Итак, предлагается следующая схема оценивания микрофизических параметров атмосферных частиц. Коэффициент ослабления излучения ($\alpha_{ext}(\lambda)$) представляется в виде сомножителей фактора ослабления (Q_{ext}), средней площади тени частиц (без учета концентрации, т. е.

$$\bar{S}_{sq*} = \int_{a_{min}}^{a_{max}} S_{sq} \cdot f(a) da$$

единице объема (C). Кроме того, для удобства оценивания коэффициента ослабления (измеренного в $км^{-1}$), когда рассматривается размер частиц в мкм и концентрации в $л^{-1}$, приемлемо ввести концентрацию как $C=C' \cdot k$. Здесь k – безразмерный параметр,

соответствующий любому значению концентрации с размерностью $[л^{-1}]$. Напомним, что $\alpha_{ext}(\lambda)$ линейно зависит от C . Приведение величины $\bar{S}_{sq*}$ к величине S_m состоит в учете размерностей всех величин входных параметров, чтобы размерность S_m была в $км^{-1}$ (как у $\alpha_{ext}(\lambda)$). Тогда, оценивая значения S_m (при необходимости умножая на k), легко провести сравнительный качественный анализ (без учета фактора ослабления) величин ослабления излучения дисперсными компонентами, различными по микрофизическим свойствам. Если абсолютная разница соответствующих величин S_m составляет менее одного порядка, то для дальнейшего анализа следует учитывать тонкую структуру фактора ослабления.

Следует отметить, что модифицированная величина S_m главным образом зависит от средних размеров кристаллов и слабо зависит от дисперсии размеров (или параметра μ). Величина $C \cdot \bar{S}_{sq*} = k \cdot S_m$ легко определяется на промежутке длин волн, где из $\alpha_{ext}(\lambda)=const$, учитывая, что $Q_{ext}=2$. Но если известна концентрация частиц в единице объема, то элементарно определить S_m . Величины $\bar{a}$ и μ (также фактор формы частиц для кристаллов $r=a/d$, где d – толщина частиц) могут быть определены по особенностям спектрального хода $Q_{ext}(\lambda)$. После оценки $\bar{a}$ и μ величины k и S_m могут быть скорректированы (при неизвестной концентрации).

На основе результатов расчета S_m , обеспечиваемых интегральным представлением средней площади тени рассеивателя (рис. 2, формула (3.2)), получим соответствующие аналитические выражения при разных значениях μ . В этом случае линии регрессии вида $y=k_m \cdot x^t$ являются наиболее приемлемыми для представления зависимости $S_m(\bar{a})$. Установлено, что при $t \approx 2$ отклонение составляет не более 10^{-5} , а k принимает значения из интервала от $4,7 \cdot 10^{-5}$ до $3,4 \cdot 10^{-5}$ с изменением μ от 1 до 20. В этом случае регрессионные линии $S_m(\bar{a})$ представляют соответствующие численно полученные зависимости $S_m(\bar{a})$ с достоверностью $R^2 \approx 1$ (с отклонением значений коэффициента детерминации R^2 не более 10^{-8}).

На рис. 3 иллюстрируется линия тренда $k_m(\mu)=4,624 \cdot 10^{-5} \cdot \mu^{-0,1373}$ при $R^2 \approx 0,99$, полученная для коэффициента $k_m(\mu)$ ($k_m=k_m(S_m)$). Тогда на основе корреляционных представлений аналитическое выражение для средней площади тени рассеивателя запишем как

$$S_m(\bar{a}, \mu)=4,624 \cdot 10^{-5} \cdot \mu^{-0,1373} \cdot \bar{a}^2. \quad (5)$$

На рис. 4 демонстрируется относительная ошибка ($\Delta=abs(S_m-S_m)/S_m$), рассчитанная при условии, что приближенной величиной является

корреляционная зависимость $S_M(\bar{a}, \mu)$ (5), а в качестве точной величины рассматривается модифицированная площадь тени рассеивателя $S_m(\bar{a}, \mu)$, рассчитанная на основе интегрального представления (3.2). Из рисунка видно, что относительная ошибка $\Delta(\bar{a})$ составляет менее 2 % при разных значениях μ .

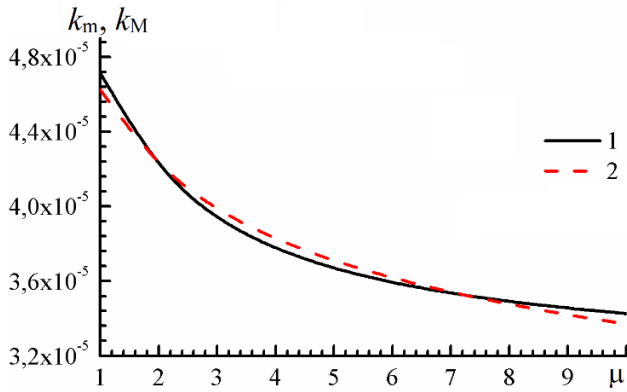


Рис. 3. Коэффициенты для модифицированной площади тени рассеивателя и соответствующей регрессионной зависимости k_m и k_M , полученные при разных значениях μ и на основе: 1 – $S_m(\bar{a}, \mu)$, 2 – $S_M(\bar{a}, \mu)$

Fig. 3. Coefficients for the modified area of the scatterer shadow and the corresponding regression dependence k_m and k_M , obtained for different values of μ and based on: 1 – $S_m(\bar{a}, \mu)$, 2 – $S_M(\bar{a}, \mu)$

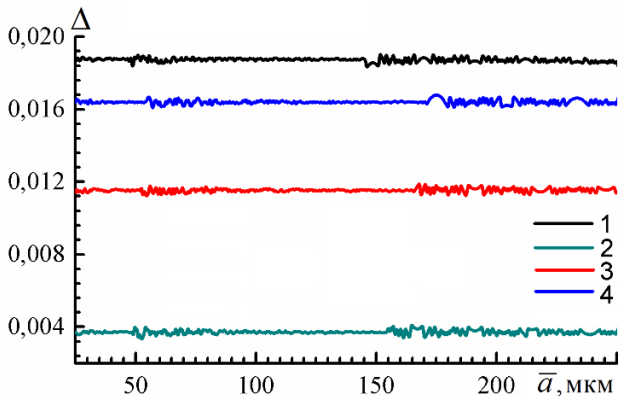


Рис. 4. Относительная ошибка $\Delta = \text{abs}(S_m - S_M)/S_m$ для разных μ : 1 – $\mu=1$; 2 – $\mu=2$; 3 – $\mu=5$; 4 – $\mu=10$

Fig. 4. Relative error $\Delta = \text{abs}(S_m - S_M)/S_m$ for different μ : 1 – $\mu=1$; 2 – $\mu=2$; 3 – $\mu=5$; 4 – $\mu=10$

Выражение (5) обеспечивает элементарный расчет значения $S_M(\bar{a}, \mu)$ с высокой точностью. Оно позволяет оперативно и качественно оценивать вклад в ослабление различных составляющих дисперсной среды с учетом средних размеров частиц и характеристики μ (или дисперсии). Принимая во

внимание (5), выражение для коэффициента ослабления представляется как $\alpha_{\text{ext}} = Q_{\text{ext}} \cdot S_M(\bar{a}, \mu)$.

Из рис. 2 видно, что на значения $S_M(\bar{a}, \mu)$ (т. к. $S_m \approx S_M$) преимущественно влияет размер частицы. Как отмечалось выше, характеристика разброса частиц по размерам в меньшей мере оказывает воздействие на величину S_M . Следует отметить, что в научной литературе при анализе ослабления лучистой энергии кристаллическим облаком практически не рассматривают влияние параметра μ . Проведем оценку учета разброса частиц по размерам при определении характеристики ослабления $S_M(\bar{a}, \mu)$ (или $S_m(\bar{a}, \mu)$).

На рис. 5 показаны значения относительной ошибки, рассчитанной как $\Delta = \text{abs}(S_{\text{точн}} - S_{\text{прибл}})/S_{\text{точн}}$. Линии 1–4 демонстрируют Δ при точном значении $S_M(\bar{a}, \mu)$ для $\mu=10$, и при этом рассматриваются случаи (приближенные), когда $\mu=\{1, 2, 5, 9\}$. Линии 5–8 демонстрируют обратную ситуацию, когда приближенным является $S_M(\bar{a}, \mu)$ $\mu=10$, а точными являются случаи $\mu=\{1, 2, 5, 9\}$. При фиксированных значениях μ и любых вариантах $\bar{a}$, рассмотренных на рис. 4, величина $\Delta(\bar{a}) \approx \text{const}$ (изменяется не более чем на $0,5 \cdot 10^{-4}$). Из рисунка видно, что неучет параметра μ может привести к возникновению относительной ошибки почти на 40 %.

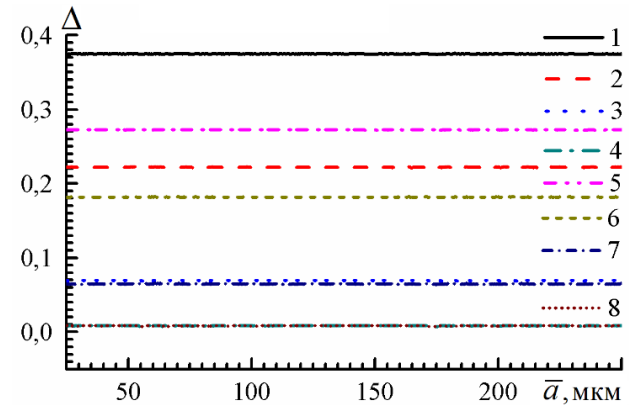


Рис. 5. Относительная ошибка $\Delta = \text{abs}(S_{\text{точн}} - S_{\text{прибл}})/S_{\text{точн}}$ для разных μ : 1 – $S_{\text{точн}}=S_M$ при $\mu=10$, $S_{\text{прибл}}=S_M$ при $\mu=1$; 2 – $S_{\text{точн}}=S_M$ при $\mu=10$, $S_{\text{прибл}}=S_M$ при $\mu=2$; 3 – $S_{\text{точн}}=S_M$ при $\mu=10$, $S_{\text{прибл}}=S_M$ при $\mu=5$; 4 – $S_{\text{точн}}=S_M$ при $\mu=10$, $S_{\text{прибл}}=S_M$ при $\mu=9$; 5 – $S_{\text{точн}}=S_M$ при $\mu=1$, $S_{\text{прибл}}=S_M$ при $\mu=10$; 6 – $S_{\text{точн}}=S_M$ при $\mu=2$, $S_{\text{прибл}}=S_M$ при $\mu=10$; 7 – $S_{\text{точн}}=S_M$ при $\mu=5$, $S_{\text{прибл}}=S_M$ при $\mu=10$; 8 – $S_{\text{точн}}=S_M$ при $\mu=9$, $S_{\text{прибл}}=S_M$ при $\mu=10$

Fig. 5. Relative error $\Delta = \text{abs}(S_{\text{precise}} - S_{\text{approx}})/S_{\text{precise}}$ for different μ : 1 – $S_{\text{precise}}=S_M$ at $\mu=10$, $S_{\text{approx}}=S_M$ at $\mu=1$; 2 – $S_{\text{precise}}=S_M$ at $\mu=10$, $S_{\text{approx}}=S_M$ at $\mu=2$; 3 – $S_{\text{precise}}=S_M$ at $\mu=10$, $S_{\text{approx}}=S_M$ at $\mu=5$; 4 – $S_{\text{precise}}=S_M$ at $\mu=10$, $S_{\text{approx}}=S_M$ at $\mu=9$; 5 – $S_{\text{precise}}=S_M$ at $\mu=1$, $S_{\text{approx}}=S_M$ at $\mu=10$; 6 – $S_{\text{precise}}=S_M$ at $\mu=2$, $S_{\text{approx}}=S_M$ at $\mu=10$; 7 – $S_{\text{precise}}=S_M$ at $\mu=5$, $S_{\text{approx}}=S_M$ at $\mu=10$; 8 – $S_{\text{precise}}=S_M$ at $\mu=9$, $S_{\text{approx}}=S_M$ at $\mu=10$

В реальных условиях атмосферы ледяное облако может содержать не только частицы, но и газовый компонент. Высокая чувствительность при определении параметров среды, содержащей газ, достигается методами абсорбционной спектроскопии в среднем и ближнем ИК-диапазонах, где расположены активные колебательно-вращательные полосы поглощения. Выясним, при каких параметрах дисперсная составляющая является значимой в ослаблении оптического излучения газовой аэрозольной средой. Для определенности в качестве газовой компоненты аэродисперсной среды рассмотрим метан. В настоящее время наблюдается высокая концентрация этого газа в атмосфере Земли [16, 17]. Это объясняется интенсивным выделением CH_4 из природных и антропогенных источников.

Известно, что наличие газа можно обнаружить по оценке поглощения на определенных спектральных интервалах, где проявляется его селективность. Так, в интервале длин волн от 0,5 до 15 мкм наблюдаются 7 максимумов $K_{\text{mol}}(\lambda)$, в области которых располагаются основные колебательно-вращательные полосы поглощения CH_4 . Величина наибольшего максимума $K_{\text{mol}}(\lambda) \approx 21 \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ (при $\lambda \approx 3,31 \text{ мкм}$ или $\nu = 10000/\lambda$, $\nu \approx 3020 \text{ см}^{-1}$) рассчитана при спектральном разрешении 1 см^{-1} [18]. Для расчета коэффициента поглощения (K_{abs}) учтем давление (концентрацию P) газа ($K_{\text{abs}} = K_{\text{mol}} \cdot P$). Пусть величина P принимает значения порядка 10^{-5} атм (что соответствует повышенному содержанию метана в атмосфере). Приведем значения ослабления газовой (напомним, что для газа $\alpha_{\text{ext}} \approx K_{\text{abs}}$) и дисперсной составляющими к единой размерности – км^{-1} . Тогда $K_{\text{abs}} = 21 \text{ км}^{-1}$ при $\lambda \approx 3,31 \text{ мкм}$ и $P = 10^{-5} \text{ атм}$. Далее для качественной сравнительной оценки следует соотнести значения коэффициента поглощения для газа (с учетом значения давления P) и коэффициента ослабления дисперсной составляющей с точностью до величины фактора ослабления (помня при этом, что Q_{ext} принимает значения из промежутка от 0,1 до 3,9). Так, в частности, при рассматриваемых параметрах для метана и частиц со средними размерами пластинок $\bar{a} = 150 \text{ мкм}$, фактором формы $a/d = 20$ и концентрации $C = 1 \text{ л}^{-1}$ значения K_{abs} и α_{ext} являются соизмеримыми в области наибольшего максимума $K_{\text{mol}}(\lambda)$ (рис. 6). Следует отметить, что спектральная зависимость $\alpha_{\text{ext}}(\lambda)$ получена в рамках метода физической оптики [4]. Проведем сравнение вкладов в ослабление лучистой энергии газовой компонентой и дисперсной составляющей.

На рис. 6 показаны результаты расчета коэффициентов ослабления излучения в области λ от 3,1 до 4 мкм), где наблюдается самое яркое проявления метана. Кривая 1, обеспечиваемая влиянием только

газовой компонентой, представляет зависимость $K_{\text{abs}}(\lambda)$ (или $\alpha_{\text{ext}}(\lambda)$). Кривая 2 демонстрирует $\alpha_{\text{ext}}(\lambda)$ для пластинок, кривая 3 иллюстрирует совместное влияние двух составляющих (метана и пластинок) на ослабление ($\alpha_{\text{com}}(\lambda) = \alpha_{\text{ext}}(\lambda) + K_{\text{abs}}(\lambda)$). На фоне спектрального хода $K_{\text{abs}}(\lambda)$ в диапазоне λ от 3,1 до 4 мкм ослабление ледяными кристаллами $\alpha_{\text{ext}}(\lambda)$ можно рассматривать как постоянную величину (хотя здесь размах изменения значений фактора ослабления от 2 до 1,6). Скорость изменения $K_{\text{abs}}(\lambda)$ на порядки выше, чем у $\alpha_{\text{ext}}(\lambda)$. Из-за огромных перепадов значений $K_{\text{abs}}(\lambda)$ на промежутке $\lambda = 3,1\text{--}4 \text{ мкм}$ мы наблюдаем различный характер влияния $\alpha_{\text{ext}}(\lambda)$ и $K_{\text{abs}}(\lambda)$ на $\alpha_{\text{com}}(\lambda)$. При увеличении концентрации дисперсной составляющей в разы в области $\text{max}(K_{\text{abs}}(\lambda))$ всплеска $\alpha_{\text{com}}(\lambda)$ не будет наблюдаться, будет проявляться только небольшая рябь. В этом случае мы увидим спектральную зависимость подобную виду $\alpha_{\text{com}}(\lambda)$ на промежутке $\lambda = 3,5\text{--}3,7 \text{ мкм}$. Такие закономерности характерны для любой области, где проявляется селективность газовой составляющей, но при учете соответствующих значений концентрации. Ориентируясь на рис. 6, не трудно представить, как будет влиять та или иная составляющая на общее ослабление газовой-дисперсной средой с различными значениями концентраций компонент среды.

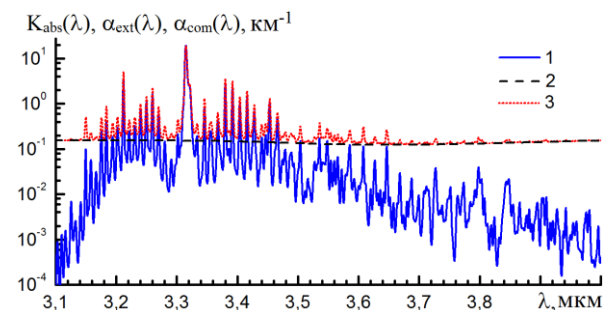


Рис. 6. Оптические характеристики среды на интервале λ от 3,1 до 4 мкм: 1 – $K_{\text{abs}}(\lambda)$ для метана при $P = 10^{-5} \text{ атм}$; 2 – $\alpha_{\text{ext}}(\lambda)$ для ансамбля ледяных пластинок при $\mu = 10$, $\bar{a} = 150 \text{ мкм}$, $a/d = 20$, $C = 1 \text{ л}^{-1}$; 3 – $\alpha_{\text{com}}(\lambda) = K_{\text{abs}}(\lambda) + \alpha_{\text{ext}}(\lambda)$ с параметрами, указанными для кривых 1 и 2

Fig. 6. Optical characteristics of the medium in the interval λ from 3,1 to 4 μm : 1 – $K_{\text{abs}}(\lambda)$ for methane at $P = 10^{-5} \text{ атм}$; 2 – $\alpha_{\text{ext}}(\lambda)$ for an ensemble of ice plates at $\mu = 10$, $\bar{a} = 150 \text{ }\mu\text{m}$, $a/d = 20$, $C = 1 \text{ л}^{-1}$; 3 – $\alpha_{\text{com}}(\lambda) = K_{\text{abs}}(\lambda) + \alpha_{\text{ext}}(\lambda)$ with the parameters specified for curves 1 and 2

На примере смеси метана с крупными пластинками, имеющими средние радиусы более 150 мкм и концентрацию примерно 100 л^{-1} (а такие данные являются вполне приемлемыми для ансамбля об-

лачных кристаллов), кристаллы обеспечивают основной вклад в формирование ослабления даже в областях селективности газа.

Заключение

В работе выражение для коэффициента ослабления представлено в виде произведения фактора ослабления и модифицированной средней площади тени рассеивателя. На основе корреляционного анализа для модифицированной характеристики получено простое аналитическое выражение, позволяющее с высокой точностью оценить влияние на нее параметров распределения частиц по размерам. Представленное выражение позволяет проводить качественную (с точностью до значения фактора ослабления) сравнительную оценку вклада различных компонент среды в общее ослабление оптического излучения кристаллическим облаком. Основной вклад дисперсной составляющей вносят средние размеры площади тени частиц и их кон-

центрация. Значения фактора ослабления и дисперсия размеров частиц могут изменить значения коэффициента ослабления в разы.

Качественную оценку влияния газовой и дисперсной составляющих на ослабление оптического излучения можно получить по результатам давления P и зависимости молекулярного поглощения $K_{\text{mol}}(\lambda)$, полученной с низким разрешением, а также опираясь на данные о средней площади рассеивателей и их концентрации.

Предложенная схема обеспечивает выделение доминирующего влияния того или иного вида рассеивателей на ослабление излучения. Такой подход значительно упрощает процесс количественной оценки экстинкции для многокомпонентной газовой-дисперсной среды, а также обеспечивает данными, демонстрирующими, при каких микрофизических параметрах дисперсной составляющей селективность газовой компоненты как доминанты не будет проявляться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г. Оптические свойства кристаллических облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 200 с.
2. Scattering, absorption, and emission of light by small particles / eds. M.I. Mishchenko, L.D. Travis, A.A. Lacis. – Cambridge: Cambridge U. Press, 2002. – 486 p.
3. IPCC. The physical science basis: contribution of working group 1 to the fifth assessment report of the IPCC. – Cambridge: Cambridge University Press, 2013. – 1552 p.
4. Platt C.M.R., Abshire N.L., McNice G.T. Some microphysical properties of an ice cloud from lidar observation of horizontally oriented crystals // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. – 1978. – Vol. 17. – Iss. 8. – P. 1220–1224. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1978\)017<1220:SMPOAI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1978)017<1220:SMPOAI>2.0.CO;2)
5. Noel V., Sassen K. Study of planar ice crystal orientations in ice clouds from sacking polarization lidar observations // *Journal of Applied Meteorology*. – 2005. – Vol. 44. – P. 653–664. DOI: <https://hal.science/hal-00147433v1>
6. Moosmüller H., Sorensen C.M. Small and large particle limits of single scattering albedo for homogeneous, spherical particles // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2018. – Vol. 204. – P. 250–255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.09.029>
7. Ice cloud single-scattering property models with the full phase matrix at wavelengths from 0.2 to 100 μm . / B. Baum, P. Yang, A. Heymsfield, A. Bansemer, B. Cole, A. Merrelli, S. Schmitt, C. Wang // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2014. – Vol. 146. – P. 123–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.02.029>
8. Dependence of extinction cross-section on incident polarization state and particle orientation. / P. Yang, M. Wendish, L. Bi, G. Kattawar, M. Mischenko, Y. Hu // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2011. – Vol. 112. – P. 2035–2039. DOI: [doi:10.1016/j.jqsrt.2011.04.012](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2011.04.012)
9. McFarlane S.A., Marchand R.T. Analysis of ice crystal habits derived from MISR and MODIS observations over the ARM Southern Great Plains site // *Journal of Geophysical Research*. – 2008. – Vol. 113. – D07209. DOI: [10.1029/2007JD009191](https://doi.org/10.1029/2007JD009191).
10. Spectral least squares quantification of several atmospheric gases from high resolution infrared solar spectra obtained at the South pole / A. Goldman, F.G. Fernald, F.J. Murcray, F.H. Murcray, D.G. Murcray // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 1983. – Vol. 29. – P.189–204. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-4073\(83\)90038-9](https://doi.org/10.1016/0022-4073(83)90038-9)
11. HITRANonline: an online interface and the flexible representation of spectroscopic data in the HITRAN database / C. Hill, I.E. Gordon, R.V. Kochanov, L. Barrett, J.S. Wilzewski, L.S. Rothman // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2016. – Vol. 177. – P. 4–14. URL: <https://scispace.com/pdf/hitrانonline-an-online-interface-and-the-flexible-5yh6qqjrqr.pdf> (дата обращения: 22.05.2025).
12. The HITRAN–2012 molecular spectroscopic database / L.S. Rothman, I.E. Gordon, Y. Babikov et al. // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2013. – Vol. 130. – P. 4–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.07.002>
13. HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database / L.S. Rothman, I.E. Gordon, R.J. Barber, H. Dothe, R.R. Gamache, A. Goldman, V.I. Perevalov, S.A. Tashkun, J. Tennyson // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2010. – Vol. 111. – P. 2139–2150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2010.05.001>.
14. Борен К., Хафман Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир, 1986. – 660 с.
15. Fu Q., Yang P., Sun W.B. An accurate parameterization of the infrared radiative properties of cirrus clouds for climate models // *Journal of Climate*. – 1998. – Vol. 11. – P. 2223–2237. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<2223:AAPOTI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<2223:AAPOTI>2.0.CO;2)
16. Bader W. et al. The recent increase of atmospheric methane from 10 years of ground-based NDACC FTIR observations since 2005 // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2017. – Vol. 17. – P. 2255–2277. DOI: [10.5194/acp-17-2255-2017](https://doi.org/10.5194/acp-17-2255-2017)

17. Satellite observation of atmospheric methane: intercomparison between AIRS and GOSAT TANSO-FTS retrievals / M. Zou, X. Xiong, N. Saitoh, J. Warner, Y. Zhang, L. Chen, F. Weng, M. Fan // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2016. – Vol. 9. – P. 3567–3576. DOI: 10.5194/amt-9-3567-2016
18. Voitsekhovskaya O.K., Kashirskii D.E., Shefer O.V. Analysis of spectroscopic information for detecting methane emissions on local paths using CO and He–Ne lasers // *Quantum Electronics*. – 2019. – Vol. 49. – № 9. – P. 881–886. DOI: <http://dx.doi.org/10.1070/QEL16958>

Информация об авторах

Ольга Владимировна Шефер, доктор физико-математических наук, доцент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; профессор кафедры программной инженерии Института прикладной математики и компьютерных наук Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. shefer@tpu.ru

Виктор Александрович Сенников, научный сотрудник лаборатории когерентной и адаптивной оптики института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1. wsen@iao.ru

Андрей Алексеевич Алейник, студент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. aaa205@tpu.ru

Поступила: 20.07.2025

Принята: 15.09.2025

Опубликована: 27.09.2025

REFERENCES

1. Volkovitsky O.A., Pavlova L.N., Petrushin A.G. *Optical properties of crystalline clouds*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1984. 200 p. (In Russ.)
2. Mishchenko M.I., Travis L.D., Lacis A.A., editors. *Scattering, absorption, and emission of light by small particles*. Cambridge, Cambridge U. Press, 2002. 486 p.
3. IPCC. *The physical science basis: contribution of working group I to the fifth assessment report of the IPCC*. Cambridge, Cambridge University Press, 2013. 1552 p.
4. Platt C.M.R., Abshire N.L., McNice G.T. Some microphysical properties of an ice cloud from lidar observation of horizontally oriented crystals. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1978, vol. 17, Iss. 8, pp. 1220–1224. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1978\)017<1220:SMPOAI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1978)017<1220:SMPOAI>2.0.CO;2)
5. Noel V., Sassen K. Study of planar ice crystal orientations in ice clouds from sacking polarization lidar observations. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, vol. 44, pp. 653–664. DOI: <https://hal.science/hal-00147433v1>
6. Moosmüller H., Sorensen C.M. Small and large particle limits of single scattering albedo for homogeneous, spherical particles. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, vol. 204, pp. 250–255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.09.029>
7. Baum B., Yang P., Heymsfield A., Bansemer A., Cole B., Merrelli A., Schmitt S., Wang C. Ice cloud single-scattering property models with the full phase matrix at wavelengths from 0.2 to 100 μm . *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, vol. 146, pp. 123–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.02.029>
8. Yang P., Wendish M., Bi L., Kattawar G., Mischenko M., Hu Y. Dependence of extinction cross-section on incident polarization state and particle orientation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, vol. 112, pp. 2035–2039. DOI: [doi:10.1016/j.jqsrt.2011.04.012](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2011.04.012)
9. McFarlane S.A., Marchand R.T. Analysis of ice crystal habits derived from MISR and MODIS observations over the ARM Southern Great Plains site. *Journal of Geophysical Research*, 2008, vol. 113, D07209. DOI: [10.1029/2007JD009191](https://doi.org/10.1029/2007JD009191)
10. Goldman A., Fernald F.G., Murcray F.J., Murcray F.H., Murcray D.G. Spectral least squares quantification of several atmospheric gases from high resolution infrared solar spectra obtained at the South pole. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1983, vol. 29, pp. 189–204. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-4073\(83\)90038-9](https://doi.org/10.1016/0022-4073(83)90038-9)
11. Hill C., Gordon I.E., Kochanov R.V., Barrett L., Wilzewski J.S., Rothman L.S. HITRANonline: An online interface and the flexible representation of spectroscopic data in the HITRAN database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2016, vol. 177, pp. 4–14. Available at: <https://scispace.com/pdf/hitrانonline-an-online-interface-and-the-flexible-5yh6qqjrqf.pdf> (accessed: 22 May 2025).
12. Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y. The HITRAN–2012 molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, vol. 130, pp. 4–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.07.002>
13. Rothman L.S., Gordon I.E., Barber R.J., Dothe H., Gamache R.R., Goldman A., Perevalov V.I., Tashkun S.A., Tennyson J. HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2010, vol. 111, pp. 2139–2150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2010.05.001>
14. Boren K., Huffman D. *Absorption and scattering of light by small particles*. Moscow, Mir Publ., 1986. 660 p. (In Russ.)
15. Fu Q., Yang P., Sun W.B. An accurate parameterization of the infrared radiative properties of cirrus clouds for climate models. *Journal of Climate*, 1998, vol. 11, pp. 2223–2237. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<2223:AAPOTI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<2223:AAPOTI>2.0.CO;2)

16. Bader W. The recent increase of atmospheric methane from 10 years of ground-based NDACC FTIR observations since 2005. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, vol. 17, pp. 2255–2277. DOI: 10.5194/acp-17-2255-2017
17. Zou M., Xiong X., Saitoh N., Warner J., Zhang Y., Chen L., Weng F., Fan M. Satellite observation of atmospheric methane: intercomparison between AIRS and GOSAT TANSO-FTS retrievals. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, vol. 9, pp. 3567–3576. DOI: 10.5194/amt-9-3567-2016
18. Voitsekhovskaya O.K., Kashirskii D.E., Shefer O.V. Analysis of spectroscopic information for detecting methane emissions on local paths using CO and He–Ne lasers. *Quantum Electronics*, 2019, vol. 49, no. 9, pp. 881–886. DOI: <http://dx.doi.org/10.1070/QEL16958>

Information about the authors

Olga V. Shefer, Dr. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Professor, National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. shefer@tpu.ru

Victor A. Sennikov, Researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 1, Academician Zuev square, Tomsk, 634055, Russian Federation. wsen@iao.ru

Andrey A. Aleinik, Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. aaa205@tpu.ru

Received: 20.07.2025

Revised: 15.09.2025

Accepted: 27.09.2025