

## CONCEPTUAL APPROACH TO ASSESS THE EFFECTIVENESS OF SPATIAL ORIENTATION

U.A. LUKASHEVICH

### Abstract

In the course of the study it was formed a scientifically based concept of an objective assessment of human spatial orientation during performing of complex locomotion. This approach is to perform remote monitoring of cyclic locomotion of step motion «walking on the spot» in terms of the surrounding space. During the test is carried out the spectral evaluation of the acceleration values of the lower extremities in the band from 1 to 10 Hz. It was found that the frequency spectrum reflects the processes of qualitative implementation of spatial orientation. This indicator can be used to objectively assess bio-kinematic stabilize the body in space. The developed technology is innovative and can be used as a rapid method for diagnostic motor and coordinative disorders of various origins.

*Keywords:* adaptive kinezitherapy, spatial orientation, effectiveness of complex actions, remote monitoring of cyclic locomotion.

### Список литературы

1. Анохин П.К. Избранные труды. Кибернетика функциональных систем. М., 1998.
2. Гибсон Дж. Экологический подход к зрительному восприятию. М., 1988.
3. Гурфинкель В.С., Левик Ю.С. // Вестн. РАН. 1995. Т. 65, № 1. С. 29–32.
4. Дружинин В.Н. Структура и логика психологического исследования. М., 1994.
5. Лукашевич В.А., Хроменков А.В., Давыдов Д.А. // Неврология и нейрохирургия Восточная Европа. 2012. № 2. С. 124–126.
6. Макаров Г.А. Спортивная медицина. М., 2003.
7. Мерлин В.С. Очерк интегрального исследования индивидуальности. М., 1986.
8. Лукашевич В.А. // Неврология и нейрохирургия в Беларуси. 2012. № 1. С. 32–39.
9. Лукашевич В.А., Сиваков А.П. // Инновационные технологии в медицине. 2015. № 1 (04). С. 79–90.
10. Лукашевич В.А., Сиваков А.П. // Инновационные технологии в медицине. 2015. № 2–3 (5–6). С. 79–90.
11. Лукашевич В.А., Тарасевич М.И. // Сб. науч. ст. междунар. науч.-практ. конф. «Современные аспекты прикладной кинезиологии в спортивной медицине». Пинск, 15–16 апреля 2016 года). С. 36–39.

УДК 551.501.8; 551.510.42

## ДИСТАНЦИОННОЕ ОПТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ВОЗДУХА

С.А. ЛЫСЕНКО, В.В. ХОМИЧ

*Белорусский государственный университет  
пр. Независимости, Минск, 4220030, Беларусь*

*Поступила в редакцию 24.10.2016*

Рассматриваются задачи оперативного получения карт загрязнений атмосферы мелкодисперсными фракциями аэрозоля по данным наземного лидарного зондирования и многоспектральной спутниковой съемки. Предложены новые методы калибровки многочастотного лидара и решения обратных задач по переносу излучения в атмосфере и аэрозольному светорассеянию. Показана возможность использования разработанных методов для оперативного слежения за переносом аэрозольных загрязнений в атмосфере во время природных пожаров.

*Ключевые слова:* аэрозоль, респирательные частицы, оптическое зондирование, многочастотный лидар, калибровка, спутниковые измерения.

### Введение

Согласно последним оценкам ВОЗ, от загрязнений воздуха в мире ежегодно умирает около 3 миллионов человек, при этом 9 из 10 смертей приходится на страны с низким и средним уровнем доходов. В докладе ВОЗ от 16.03.2016 г. говорится, что Беларусь занимает третье место в мире по относительной смертности от болезней, связанных с загрязнением воздуха (100 человек на 100000 населения), чему, в частности, способствуют несовершенство городского транспорта и городского планирования.

Серьезную опасность для здоровья людей представляют мелкодисперсные частицы, способные проникать в легкие человека, вызывая рак, сердечнососудистые и респираторные заболевания. В связи с этим, при оценке состояния атмосферного воздуха учитываются такие показатели, как  $PM_{2.5}$  и  $PM_{10}$ , характеризующие массы частиц диаметрами до 2,5 и 10 мкм соответственно в единичном объеме воздуха. В Беларуси данные о  $PM_{2.5}$  и  $PM_{10}$  собираются в непрерывном режиме на пунктах наблюдения Национальной системы мониторинга окружающей среды. Очевидным недостатком такого мониторинга является пространственная дискретность собираемых данных, затрудняющая анализ процессов переноса аэрозольных загрязнений в атмосфере и выявление источников их возникновения.

Для исследования пространственно-временной изменчивости аэрозоля в воздушном бассейне населенного пункта наиболее удобными являются лазерно-локационные методы, основанные на измерении и анализе временной структуры света импульсного лазера, обратно рассеянного разными участками атмосферы. Данные методы потенциально позволяют снимать круговую панораму распределения аэрозоля с пространственным разрешением в единицы метров. Однако для этого требуются независимые измерения оптических и микрофизических параметров аэрозоля на зондируемой трассе [1, 2], что сложно реализуемо на практике.

Методы пассивного зондирования атмосферы из космоса удобны для получения общего содержания аэрозоля в атмосфере на обширных территориях и для исследования крупномасштабного переноса аэрозольных загрязнений [3]. Однако восстановление карт загрязненности атмосферы отдельными фракциями аэрозоля из спутниковых многоспектральных изображений требует огромных вычислительных ресурсов, направленных на решение обратных задач по переносу излучения в атмосфере и аэрозольному светорассеянию для каждого пикселя изображения, что, очевидно, неприемлемо для целей непрерывного экологического мониторинга.

Ниже описаны методы решения обратных задач дистанционного оптического зондирования загрязнений атмосферы аэрозольными фракциями, обеспечивающие оперативную обработку данных при минимальном использовании априорной информации.

### Интерпретация данных многочастотного лидарного зондирования атмосферы

Связь лидарных эхосигналов  $P(\lambda_i, r)$  с оптическими параметрами атмосферы в приближении однократного рассеяния описывается уравнением лазерной локации:

$$P(\lambda_i, r) = A(\lambda_i) r^{-2} [\beta_{\pi,a}(\lambda_i, r)] \exp \left\{ -2 \int_0^r [\varepsilon_a(\lambda_i, x) + \varepsilon_m(\lambda_i, x)] dx \right\}, \quad (1)$$

где  $r$  – пространственная координата;  $A$  – аппаратная постоянная, на рабочих длинах волн лидара  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, N_\lambda$ );  $\varepsilon_a$  и  $\beta_{\pi,a}$  – коэффициенты аэрозольного ослабления и обратного рассеяния;  $\varepsilon_m$  и  $\beta_{\pi,m}$  – аналогичные коэффициенты для молекул воздуха.

Для решения системы лидарных уравнений (1), во-первых, предполагается постоянство аэрозольной индикатрисы обратного рассеяния  $g_{\pi,a}(\lambda_i) = \beta_{\pi,a}(\lambda_i) / \varepsilon_a(\lambda_i)$  на трассе зондирования. Во-вторых, используется разложение спектра аэрозольного ослабления по собственным векторам его ковариационной матрицы:

$\ln \varepsilon_a(\lambda_i, r) = \overline{\ln \varepsilon_a(\lambda_i)} + \sum_{k=1}^K h_k(r) \psi_k(\lambda_i)$ , где  $\overline{\ln \varepsilon_a}$  – среднестатистическое значение логарифма аэрозольного коэффициента ослабления;  $\psi_k$  – собственные векторы ковариационной матрицы  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  из  $N_\lambda$  компонент;  $K$  – размерность базиса из векторов  $\psi_k$ ;  $h_k(r)$  – параметры, зависящие от конкретной реализации  $\varepsilon_a(\lambda_i, r)$  в точке  $r$  трассы зондирования;  $k=1, \dots, K$ . Статистические характеристики спектра аэрозольного ослабления  $\overline{\ln \varepsilon_a(\lambda_i)}$  и  $\psi_k(\lambda_i)$  можно получить на основе численных расчетов  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  при большом количестве случайных реализаций микрофизических параметров аэрозоля [4].

С учетом сделанных допущений систему лидарных уравнений (1) при их спектральной и пространственной дискретизации представим в следующем виде:

$$L_{ij} = \ln \left[ P(\lambda_i, r_j) r_j^2 \right] = \ln A(\lambda_i) + \ln \left[ \beta_{\pi, m}(\lambda_i, r_j) + g_{\pi, a}(\lambda_i) \exp \left( \overline{\ln \varepsilon_a(\lambda_i)} + \sum_{k=1}^K h_k(r_j) \psi_k(\lambda_i) \right) \right] - 2 \sum_{l=1}^i \omega_l \left[ \varepsilon_m(\lambda_i, r_l) + \exp \left( \overline{\ln \varepsilon_a(\lambda_i)} + \sum_{k=1}^K h_k(r_l) \psi_k(\lambda_i) \right) \right], \quad (2)$$

где  $\omega_l$  – коэффициенты квадратурной формулы численного интегрирования. Система уравнений (2) содержит  $N_r K + 2N_\lambda$  неизвестных величин:  $N_\lambda$  калибровочных констант  $A(\lambda_i)$ ,  $N_\lambda$  индикатрис обратного рассеяния  $g_{\pi, a}(\lambda_i)$  и  $KN_r$  параметров  $h_k(r_i)$ . Поскольку параметры  $h_k$ , будучи проекциями спектра  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  на ортогональный базис, являются линейно независимыми величинами и  $K < N_\lambda \ll N_r$ , то рассматриваемая обратная задача значительно лучше обусловлена, чем задача восстановления профилей  $\varepsilon_a(\lambda_i, r)$  из лидарных сигналов (1). Для нахождения единственного решения системы уравнений (2) ее необходимо доопределить граничными условиями в виде опорных значений  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  на некотором участке трассы зондирования. С учетом используемой параметризации спектра  $\varepsilon_a(\lambda)$  и пространственной дискретизации трассы зондирования будем искать решение системы уравнений (2), подчиняющееся следующим граничным условиям:

$$\tau_{a, i} = \sum_{i=j_1}^{j_2} \omega_1 \left[ \exp \left( \overline{\ln \varepsilon_a(\lambda_i)} + \sum_{k=1}^K h_k(r_l) \psi_k(\lambda_i) \right) \right], \quad (3)$$

где  $\tau_{a, i}$  – значения аэрозольной оптической толщины участка трассы зондирования  $[r_{j_1}, r_{j_2}]$  на длинах волн лидара.

Стандартный алгоритм решения переопределенных систем нелинейных уравнений включает их линеаризацию, приведение системы к нормальному виду (с квадратной матрицей) и последующее уточнение решения по итерационной формуле:

$$\mathbf{x}^{(n+1)} = \mathbf{x}^{(n)} + \left[ \mathbf{K}^T(\mathbf{x}^{(n)}) \mathbf{K}(\mathbf{x}^{(n)}) \right]^{-1} \mathbf{K}^T(\mathbf{x}^{(n)}) \mathbf{F}(\mathbf{x}^{(n)}),$$

где  $\mathbf{x} = (h_1(r_1), \dots, h_1(r_{N_r}), \dots, h_K(r_1), \dots, h_K(r_{N_r}), g_{\pi, a}(\lambda_1), \dots, g_{\pi, a}(\lambda_{N_\lambda}), \ln A(\lambda_1), \dots, \ln A(\lambda_{N_\lambda}))^T$  – вектор неизвестных;  $\mathbf{F}$  – вектор невязки между левыми и правыми частями уравнений (2) и (3);  $\mathbf{K}$  – матрица из частных производных от  $L_{ij}$  и  $\tau_{a, i}$  по аргументам  $h_k(r_i)$ ,  $g_{\pi, a}(\lambda_i)$  и

In  $A(\lambda_i)$ ,  $n$  – номер итерации. Система линейных уравнений с сильно разреженной матрицей  $\mathbf{K}^T\mathbf{K}$  большой размерности решается на каждой итерации методом бисопряженных градиентов. Итерационный процесс завершается, когда невязка выходит на стационарное значение. Для определения калибровочных значений  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  используется предположение о наличии на трассе однородного участка либо двух неоднородных участков со схожим пространственным профилем  $\varepsilon_a(\lambda_i, r)$ . В работах [4, 5] предложены алгоритмы поиска таких участков по спектрально-временной структуре лидарного сигнала.

Массовые концентрации аэрозольных фракций  $PM_{2.5}$  и  $PM_{10}$  находят на основе устойчивых множественных регрессий между данными концентрациями и независимыми параметрами спектра  $\varepsilon_a(\lambda_i)$ , восстановленными из лидарных сигналов. Уравнение соответствующих регрессий получены в рамках модели городского аэрозоля, принятой Всемирной метеорологической организацией, и подтверждены сравнениями с данными независимых экспериментальных и теоретических исследований [4, 6].

### Восстановление карт загрязненности атмосферы аэрозолем по спутниковым данным

В качестве исходной информации при восстановлении микрофизических параметров аэрозоля по данным спутниковых радиометров используются спектральные коэффициенты яркости

(СКЯ) на верхней границе атмосферы [3]:  $R(\lambda, \mu_0, \mu, \varphi) = \frac{\pi I(\lambda, \mu_0, \varphi)}{\mu_0 F_0(\lambda)}$ , где  $\mu_0$  – косинус

зенитного угла Солнца,  $\mu$  – косинус зенитного угла наблюдения площадки земной поверхности,  $\varphi$  – азимутальный угол наблюдения, отсчитываемый от азимута Солнца,  $F_0$  – внеатмосферный поток солнечного излучения,  $I$  – интенсивность уходящего излучения.

Искомые микрофизические параметры аэрозоля – интегральные массовые концентрации мелкодисперсных частиц в столбе атмосферы единичного поперечного сечения:

$$PM_x = \gamma_a \int_0^{z_\infty} dz \int_0^{X/2} v(a) n(a, z) da,$$

где  $a$  – радиусы частиц,  $X = 1,0$  и  $2,5$  мкм,  $\gamma_a$  – средняя плотность вещества частиц (здесь и далее принимается равной  $1,0$  г/см<sup>3</sup>),  $z_\infty$  – условная высота верхней границы атмосферы,  $v(a)$  – объем частицы,  $n(a, z)$  – распределение частиц по размерам на высоте атмосферы  $z$ .

Представим СКЯ в виде вектора измерений  $\mathbf{r} = (\rho_n)$ , где  $\rho_n = R_n/R_0$ ,  $R_n = R(\lambda_n, \mu_0, \mu, \varphi)$ ,  $R_0$  – нормировочное значение коэффициента яркости, регистрируемое в канале с центром на  $\lambda_0$ ,  $n = 1, \dots, N_\lambda - 1$ ,  $N_\lambda$  – общее число каналов спутникового сенсора, предназначенных для зондирования аэрозоля. Использование относительных СКЯ для восстановления оптических и микрофизических характеристик аэрозоля устраняет необходимость периодической калибровки прибора в процессе его эксплуатации на борту спутника. Разложим вектор измерений  $\mathbf{r}$  по собственному базису его ковариационной матрицы, ограничившись первыми  $K$  собственными векторами  $\mathbf{g}_k$ , соответствующими наибольшим собственным числам:

$$\mathbf{r} = \langle \mathbf{r} \rangle + \sum_{k=1}^K \xi_k \mathbf{g}_k, \tag{4}$$

где  $\langle \mathbf{r} \rangle$  – средний вектор измерения для выбранной модели атмосферы,  $\xi_k$  – коэффициенты разложения, которые с учетом ортогональности векторов  $\mathbf{g}_k$ , находятся по формуле  $\xi_k = \mathbf{g}_k^T (\mathbf{r} - \langle \mathbf{r} \rangle)$ .

Количество членов в разложении (4), позволяющих аппроксимировать  $\mathbf{r}$  в пределах относительной погрешности  $\delta_r$ , определяется порядковым номером  $K$  наименьшего из собственных чисел  $\alpha_k$  ковариационной матрицы  $\mathbf{r}$ , для которого выполняется условие:

$$\alpha_k \left( \sum_{k=1}^{N_k-1} \alpha_k \right)^{-1} > \delta \rho^2.$$

Для аппроксимации связи микрофизических параметров аэрозоля с коэффициентами  $\xi_k$  и геометрическими параметрами спутниковой сцены используются полиномиальные функции:

$$\ln Z = a + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^3 b_{km} (\xi_k)^m + \sum_{m=1}^3 c_m (\mu_0)^m + \sum_{m=1}^3 d_m (\mu)^m + \sum_{m=1}^3 f_m (\cos \theta)^m, \text{ где } Z = \text{PM}_{1,0} \text{ или } \text{PM}_{2,5};$$

$a, b_{km}, c_m, d_m, f_m$  – регрессионные коэффициенты, определяемые на основе предварительного моделирования СКЯ в приемных каналах конкретной спутниковой аппаратуры;  $\theta$  – угол между направлением солнечного излучения и направлением наблюдения, рассчитываемый по формуле [3]:  $\cos \theta = -\mu_0 \mu + \sqrt{1 - \mu_0^2} \sqrt{1 - \mu^2} \cos \varphi$ .

Обучающий ансамбль СКЯ получен путем моделирования процесса переноса солнечного излучения в системе атмосфера-поверхность с учетом его рассеяния и поглощения аэрозольными частицами и молекулами воздуха, а также отражения от подстилающей поверхности. Моделирование выполнялось при различных геометрических параметрах спутниковой сцены и состояниях исследуемой среды, характеризуемой микрофизическими характеристиками аэрозоля, приземным давлением, высотными профилями температуры и влажности воздуха, а также спектральным альбедо поверхности. Для решения уравнения переноса излучения в среде использовался пакет программ DISORT.

Предложенный алгоритм реализован и апробирован для спутниковой аппаратуры MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer). Для валидации алгоритма анализировались цифровые снимки, сделанные MERIS за 2010 и 2011 гг., а также подспутниковые измерения и расчеты на станциях AERONET (Aerosol Robotic Network). Оптические толщины аэрозоля, полученные по данным спутниковых ( $\tau_a^{MERIS}$ ) и наземных ( $\tau_a^{AERONET}$ ) измерений, сопоставлены на рис. 1. Среднеквадратическое отклонение точек от линии регрессии  $\tau_a^{MERIS} = \tau_a^{AERONET}$  составляет  $\sim 0,023$ . Среднеквадратические отклонения массовых концентраций мелкодисперсных частиц в столбе атмосферы, определенных по снимкам MERIS и по данным AERONET, составляют  $\sim 0,5 \text{ мкг/см}^2$ .

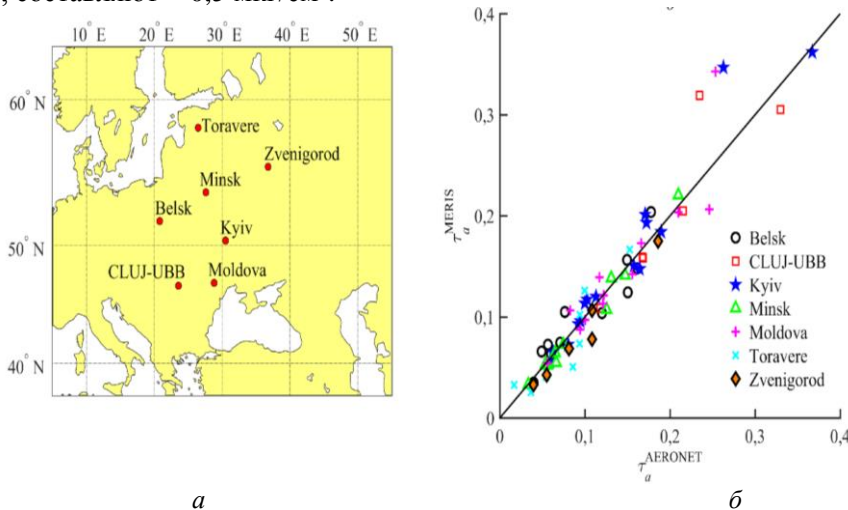


Рис. 1. Результаты валидации алгоритма восстановления оптической толщины аэрозоля на  $\lambda = 675 \text{ нм}$  по многоспектральным спутниковым снимкам аппаратурой MERIS с привлечением данных AERONET:  $a$  – карта расположения выбранных станций AERONET;  $b$  – сопоставление аэрозольных оптических толщин, полученных по данным AERONET и MERIS

Возможность использования разработанного алгоритма для наблюдения со спутника за переносом в атмосфере мелкодисперсных частиц продемонстрирована на рис. 2. Анализируемые космические снимки сделаны аппаратурой MERIS 25.04.2006 г. (рис. 2,  $a$ ) и

24.09.2006 г. (рис. 2, б). Первая дата соответствует неблагоприятной экологической обстановке на территории Беларуси, сложившейся в результате сильных лесных и торфяных пожаров в регионах России и Украины. Второй снимок был сделан осенью того же года, когда в регионах Беларуси и сопредельных государств отсутствовали мощные источники аэрозолей. Отчетливо видны многократные превышения содержаний  $PM_{1,0}$  в рассматриваемом регионе во время весенних пожаров по сравнению с фоновым уровнем загрязнения воздуха, а также масштабы распространения продуктов горения.

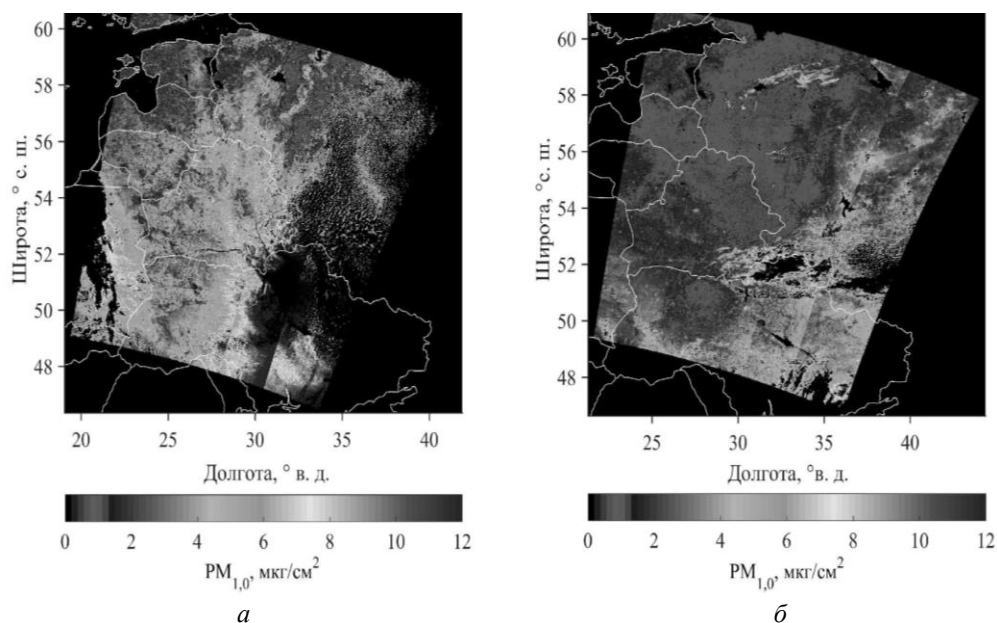


Рис. 2. Результаты восстановления карт загрязненности атмосферы мелкодисперсными аэрозольными частицами из снимков MERIS за 25.04.2006 г. (а) и 24.09.2006 г. (б)

## OPTICAL REMOTE SENSING OF AEROSOL AIR POLLUTION

S.A. LISENKO, V.V. KHOMICH

### Abstract

Challenges of retrieval of atmospheric fine particulate matter maps from data of the ground lidar and multispectral satellite imagery are presented. Strategies to multifrequency lidar calibration and to solution of radiative transfer and aerosol light scattering inverse problems are suggested. The application of the developed strategies to the real-time monitoring of the atmospheric particulate matter pollution transport during wildfires is provided.

*Keywords:* aerosol, respirable particles, optical sensing, multi-frequency lidar, calibration, satellite measurement.

### Список литературы

1. Zavyalov V.V. // J. Appl. Remote Sens. 2009. Vol. 3, № 1. P. 033522.
2. Chaikovskiy A. Proc. SPIE. 2006. Vol. 6160. P. 61601Y-1.
3. Kokhanovsky A.A., de Leeuw G. Satellite aerosol remote sensing over land. Springer, Praxis, 2009.
4. Лысенко С.А., Кугейко М.М., Хомич В.В. // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 3. С. 199–209.
5. Лысенко С.А., Кугейко М.М., Хомич В.В. // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 1. С. 70–79.
6. Лысенко С.А., Кугейко М.М. // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 5. С. 435–442.