

УДК 544.772-047.36+504.5

ОПЕРАТИВНЫЙ МОНИТОРИНГ РЕСПИРАБЕЛЬНЫХ ФРАКЦИЙ АЭРОЗОЛЯ В АТМОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНОГО И СПУТНИКОВОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ



С.А. Лысенко

Заведующий Центром климатических исследований НАН Беларуси, кандидат физико-математических наук, доцент.



М.В. Давыдов

Заведующий кафедрой теоретических основ электротехники БГУИР, кандидат технических наук, доцент.



Э.С. Кашицкий

Ведущий научный сотрудник лаборатории физиологии питания и спорта Института физиологии НАН Беларуси, кандидат медицинских наук., доцент



О.Л. Богданович

Директор частного предприятия “Универсальные технологии здоровья”

Институт природопользования НАН Беларуси, Республика Беларусь

Институт физиологии НАН Беларуси, Республика Беларусь

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

E-mail: lysenkorfe@gmail.com

Аннотация. Предложены новые алгоритмы восстановления концентраций респираторных фракций аэрозоля в атмосфере из сигналов многочастотного лидара и спутникового радиометра, обеспечивающие оперативную обработку данных при минимальном использовании априорной информации. Проведена их верификация с использованием независимых расчетных и экспериментальных данных.

Ключевые слова: эрозоль, респираторные частицы, лидар, многоспектральные спутниковые снимки, обратная задача.

Загрязнение воздуха взвешенными частицами (аэрозолем) является одним из неблагоприятных факторов окружающей среды, влияющих на качество жизни и здоровье людей. Результаты многочисленных эпидемиологических исследований однозначно указывают на взаимосвязь загрязнения воздуха с уровнем сердечнососудистых и респираторных заболеваний у населения. Согласно последним оценкам Всемирной организации здравоохранения, от загрязнений воздуха в мире ежегодно умирает около 3 миллионов человек.

Серьезную опасность для здоровья людей представляют мелкодисперсные твердые частицы, способные проникать в легкие человека. В Беларуси данные о твердых частицах в атмосферном воздухе собираются 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.

Эффективным средством наземного мониторинга аэрозоля является многочастотный лидар, потенциально обладающий возможностью получения вертикальных профилей оптических и микрофизических параметров аэрозоля оперативно и с высоким пространственным разрешением (единицы метров). Однако при решении обратной задачи по восстановлению параметров аэрозоля из лидарных сигналов проявляется ее математическая некорректность [1], ко-

торую сложно преодолеть лишь с использованием доступной лидару измерительной информации. В последнее время для доопределения этой обратной задачи наиболее часто используются данные солнечных фотометров, измеряющих интенсивность прямого солнечного излучения на нижней границе атмосферы и угловую структуру рассеянного атмосферой излучения в зависимости от его длины волны. Интеграция данных, получаемых с помощью лидара и солнечного фотометра, существенно улучшает постановку обратной задачи и расширяет объем получаемой информации об аэрозоле [2]. Однако при этом предполагается горизонтальная однородность атмосферы и постоянство концентраций аэрозольных компонент в пределах теневой зоны лидара. В городских условиях при наличии большого количества источников аэрозоля оба этих предположения могут нарушаться, что нивелирует положительные эффекты от использования данных солнечного фотометра. Кроме того, такие комплексные измерения могут выполняться только в светлое время суток и при полном отсутствии облачности на небе.

Методы зондирования атмосферы из космоса удобны для получения общего содержания аэрозоля в атмосфере над обширными территориями и для исследования крупномасштабного переноса аэрозольных загрязнений [3]. Однако восстановление карт загрязненности атмосферы аэрозолями по аэрокосмическим изображениям 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 новые методы решения обратных задач дистанционного зондирования аэрозоля, обеспечивающие оперативную обработку данных при минимальном использовании априорной информации.

Алгоритм обработки данных многочастотного лидарного зондирования аэрозоля. Связь лидарных эхосигналов с оптическими параметрами атмосферы в приближении однократного рассеяния описывается уравнением лазерной локации:

$$P(\lambda, r) = A(\lambda)P_0(\lambda)r^{-2} [\beta_{\pi, a}(\lambda, r) + \beta_{\pi, m}(\lambda, r)] \exp \left\{ -2 \int_0^r [\varepsilon_a(\lambda, r') + \varepsilon_m(\lambda, r')] dr' \right\}, \quad (1)$$

где: P – мощность принимаемого сигнала, P_0 – мощность посылаемого в атмосферу излучения; r – расстояние между лидаром и рассеивающим объемом; $A(\lambda)$ – аппаратная функция лидара; ε_a и $\beta_{\pi, a}$ – показатели аэрозольного ослабления и обратного рассеяния; ε_m и $\beta_{\pi, m}$ – показатели молекулярного ослабления и обратного рассеяния.

Показатели оптических взаимодействий света с частицами зависят от их размеров, формы и комплексного показателя преломления (КПП). Для ансамбля полидисперсных сферических частиц их можно рассчитать на основе интегральных соотношений:

$$\varepsilon_a(\lambda) = \frac{3}{4} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} x^{-1} Q_{\text{ext}}(m(\lambda), \rho) \frac{dV(x)}{d \ln x} d \ln x, \quad (2)$$

$$\beta_{\pi, a}(\lambda) = \frac{3}{4} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} x^{-1} Q_{\pi}(m(\lambda), \rho) \frac{dV(x)}{d \ln x} d \ln x, \quad (3)$$

где: x_{\min} и x_{\max} – границы спектра размеров частиц; Q_{ext} и Q_{π} – факторы эффективности ослабления и обратного рассеяния света одиночной частицей, зависящие от КПП (m) и дифракци-

онного параметра ($2\pi x/\lambda$) частицы; $dV(x)/d \ln x$ – распределение объемов частиц полидисперсного ансамбля.

Распределение частиц аэрозоля по размерам хорошо описывается двух-модальной лог-нормальной функцией:

$$\frac{dV(x)}{d \ln x} = \sum_{v=1}^2 \frac{C_v}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \exp \left[-\frac{(\ln x - \ln x_v)^2}{2\sigma_v^2} \right], \quad (4)$$

где: C_v , x_v и σ_v – объемная концентрация, средний радиус и стандартное отклонение радиусов частиц моды v . КПП частиц обеих мод полагается одинаковым и независимым от λ .

При пространственной дискретизации трассы зондирования уравнение (1) распадается на $N_\lambda N_r$ уравнений с $(2N_r + 1)N_\lambda$ неизвестными – $A(\lambda_i)$, $\varepsilon_a(\lambda_i, r_j)$ и $\beta_{\pi, a}(\lambda_i, r_j)$, где λ_i – рабочие длины волн лидара ($i = 1, \dots, N_\lambda$), r_j – координаты точек трассы ($j = 1, \dots, N_r$). Очевидно, что решение такой системы уравнений невозможно без упрощающих допущений, сокращающих число неизвестных. Предположим, что параметры микрофизической модели аэрозоля x_v , σ_v и m не меняются вдоль трассы зондирования, тогда с учетом уравнений (2)–(4) регистрируемый сигнал можно представить в следующем дискретном виде [4]:

$$L(\lambda_i, r_j) = \ln \left[P(\lambda_i, r_j) r_j^2 \right] = \ln K_i + \ln \left[\beta_{\pi, m}(\lambda_i, r_j) + \sum_{v=1}^2 C_v(r_j) \Omega_{\pi, v}(\lambda_i, x_v, \sigma_v, m) \right] - \\ - 2 \sum_{l=1}^j \omega_l \varepsilon_m(\lambda_i, r_l) - 2 \sum_{v=1}^2 \Omega_{\text{ext}, v}(\lambda_i, x_v, \sigma_v, m) \sum_{l=1}^j \omega_l C_v(r_l), \quad (5)$$

где: K_i – неизвестная переменная, равная произведению аппаратных констант лидара и оптического пропускания его теневой зоны, $\Omega_{\text{ext}, v}$ и $\Omega_{\pi, v}$ – полидисперсные сечения ослабления и обратного рассеяния частиц моды v , ω_l – коэффициенты квадратурной формулы численного интегрирования. Сечения $\Omega_{\text{ext}, v}$ и $\Omega_{\pi, v}$ для полидисперсной системы частиц, описываемой функцией (4), рассчитываются по формуле:

$$\Omega_{\text{ext}(\pi), v}(\lambda_i, x_v, \sigma_v, m) = \frac{3}{4\sqrt{2\pi}\sigma_v} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} x^{-1} Q_{\text{ext}(\pi)} \left[m, \frac{2\pi x}{\lambda_i} \right] \exp \left[-\frac{(\ln x - \ln x_v)^2}{2\sigma_v^2} \right] d \ln x \quad (6)$$

Обратная задача решается путем итерационного подбора модельных параметров и констант K_i , обеспечивающих наилучшее соответствие расчетных сигналов экспериментальным данным. Численный алгоритм основан на минимизации целевой функции:

$$J(\mathbf{p}) = (\mathbf{L}_{\text{exp}} - \mathbf{f}(\mathbf{p}))^T \mathbf{S}_L^{-1} (\mathbf{L}_{\text{exp}} - \mathbf{f}(\mathbf{p})) + \gamma (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0)^T \mathbf{S}_p^{-1} (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0), \quad (7)$$

где: $\mathbf{p} = (\ln K_1, \dots, \ln K_{N_\lambda}, C_1(r_1), \dots, C_1(r_{N_r}), C_2(r_1), \dots, C_2(r_{N_r}), x_1, \sigma_1, x_2, \sigma_2, m)^T$ – вектор искомых параметров, \mathbf{p}_0 – их начальное приближение, \mathbf{L}_{exp} – вектор, составленный из спектрально-пространственных отсчетов экспериментальных сигналов, $\mathbf{f}(\mathbf{p})$ – прямая модель задачи, основанная на формулах (5) и (6), \mathbf{S}_L – ковариационная матрица погрешностей измерения сигнала $L(\lambda_i, r_j)$, \mathbf{S}_p – ковариационная матрица вектора \mathbf{p} , γ – параметр регуляризации.

Оптимальное значение $\mathbf{p} = \mathbf{p}_{\text{opt}}$, удовлетворяющее условию $dJ(\mathbf{p})/d\mathbf{p} = 0$, находится итерационным методом Ньютона:

$$\mathbf{p}_{n+1} = \mathbf{p}_0 + \left(\mathbf{F}_n^T \mathbf{S}_L^{-1} \mathbf{F}_n + \gamma_n \mathbf{S}_p^{-1} \right)^{-1} \mathbf{F}_n^T \mathbf{S}_L^{-1} \left(\mathbf{L}_{\text{exp}} - \mathbf{F}(\mathbf{p}_n) + \mathbf{F}_n (\mathbf{p}_n - \mathbf{p}_0) \right), \quad (8)$$

где: \mathbf{p}_n – n -е приближение к решению обратной задачи, $\mathbf{F}_n = (d\mathbf{f}/d\mathbf{p})_{\mathbf{p}=\mathbf{p}_n}$ – матрица из частных производных от функций (5) по модельным параметрам. Параметр регуляризации γ_n на каждой итерации выбирается в зависимости от невязки $\rho_n = \|\mathbf{L}_{\text{exp}} - \mathbf{f}(\mathbf{p}_n)\|$. Изначально полагается $\gamma_0 = 1$. Далее, если $\rho_{n+1} > \rho_n$, то $\gamma_{n+1} = 1.2\gamma_n$, иначе $\gamma_{n+1} = 0.8\gamma_n$. Итерации завершаются, когда невязка выходит на некоторое стационарное значение.

Алгоритм восстановления карт загрязненности атмосферы мелкодисперсным аэрозолем по многоспектральным спутниковым снимкам. В качестве исходной информации для мониторинга атмосферного аэрозоля со спутника используются спектральные коэффициенты яркости (СКЯ):

$$R(\lambda, \mu_0, \mu, \varphi) = \frac{\pi I(\lambda, \mu_0, \mu, \varphi)}{\mu_0 F_0(\lambda)}, \quad (9)$$

где: μ_0 – косинус зенитного угла Солнца, μ – косинус зенитного угла наблюдения, φ – разность азимутальных углов Солнца и наблюдения, F_0 – внеатмосферный поток солнечного излучения, I – интенсивность излучения, уходящего с верхней границы атмосферы.

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

$$\text{PM}_X = \gamma_a \int_0^{z_\infty} dz \int_0^{X/2} v(a)n(a, z) da, \quad (10)$$

где: a – радиусы частиц, $X = 1,0$ и $2,5$ мкм – верхние границы диаметров частиц, отделяющие респираторные фракции $\text{PM}_{1,0}$ и $\text{PM}_{2,5}$ от общей массы аэрозоля, γ_a – средняя плотность вещества частиц (здесь и далее принимается равной 1.0 г/см^3), z_∞ – 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 системы атмосфера-поверхность, регистрируемое в спектральном канале с центром на длине волны λ_0 , $n = 1, \dots, N_\lambda - 1$, N_λ – общее число спектральных 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:

$$\mathbf{r} = \langle \mathbf{r} \rangle + \sum_{k=1}^K \xi_k \mathbf{g}_k, \quad (11)$$

где: $\langle \mathbf{r} \rangle$ – средний вектор измерений, получаемый в рамках модели; ξ_k – коэффициенты разложения, которые с учетом ортогональности векторов \mathbf{g}_n , находятся по формуле

$$\xi_k = \mathbf{g}_k^T (\mathbf{r} - \langle \mathbf{r} \rangle). \quad (12)$$

Количество членов в разложении (12), позволяющих аппроксимировать \mathbf{r} в пределах относительной погрешности $\delta\rho$, определяется порядковым номером K наименьшего из собственных чисел α_k ковариационной матрицы \mathbf{r} , для которого выполняется условие:

$$\alpha_K \left(\sum_{k=1}^{N_K-1} \alpha_k \right)^{-1} > \delta\rho^2. \quad (13)$$

Для аппроксимации связи параметров аэрозоля с коэффициентами ξ_k и геометрическими параметрами спутниковой сцены используем полиномиальные функции [5]:

$$\ln Z = a + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^3 b_{km} (\xi_k)^m + \sum_{m=1}^3 c_m (\mu_0)^m + \sum_{m=1}^3 d_m (\mu)^m + \sum_{m=1}^3 f_m (\cos \theta)^m, \quad (14)$$

где: $Z = \text{PM}_{1,0}$ 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; θ – угол между направлениями солнечного потока и визирования.

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 ($\arccos(\mu_0) = 0 - 65^\circ$, $\arccos(\mu) = 0 - 45^\circ$, $\varphi = 0 - 180^\circ$) и состояниях исследуемой среды, характеризующейся микрофизическими характеристиками аэрозоля (использовались данные AERONET по микроструктуре аэрозоля и результаты расчета его оптических характеристик по формулам Ми), приземным давлением ($p_0 = 800-1030$ гПа), высотными профилями температуры и влажности воздуха (использовались аэрологические данные), а также спектральным альбедо подстилающей поверхности (использовалась база данных спектральных альбедо природных поверхностей ASTER). Уравнение переноса излучения решалось методом дискретных ординат (DISORT).

Предложенный алгоритм программно реализован для спутникового прибора OLCI (Ocean and Land Colour Instrument), работающего с 2016 года на европейских спутниках серии Sentinel-3. Для определения микрофизических параметров аэрозоля использовались снимки OLCI в каналах 1–10 с центральными длинами волн от 412.5 нм до 681.25 нм.

На рисунке приведен пример использования разработанных алгоритмов для получения карт аэрозольных загрязнений атмосферы по данным многоспектральной спутниковой съемки прибором OLCI.

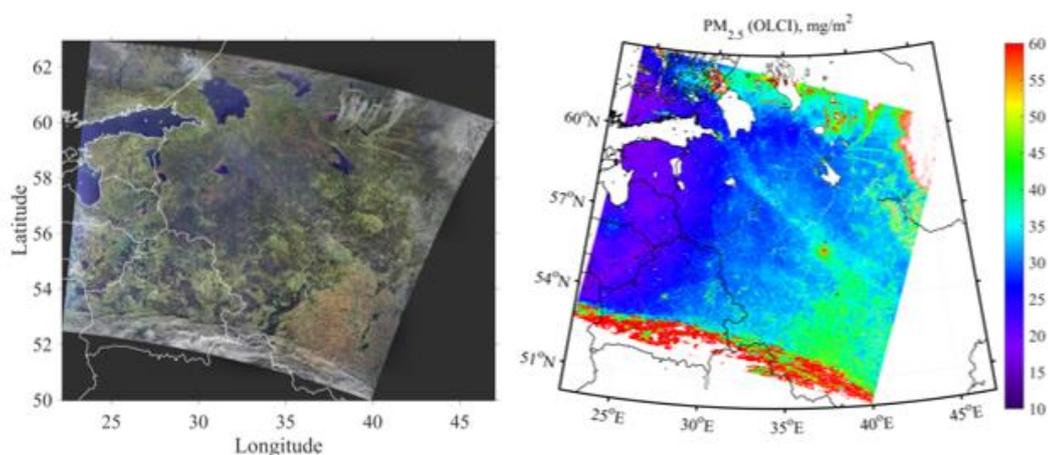


Рисунок 1. Пример восстановления пространственного распределения $PM_{2.5}$ разработанным алгоритмом: *a* – псевдоцветное изображение, составленное из снимков OLCI в каналах 442.5 нм (синий), 560 нм (зеленый) и 665 нм (красный); *b* – карта $PM_{2.5}$

Верификация разработанных алгоритмов. Учитывая большие сложности проведения прямых измерений микрофизических параметров аэрозоля на вертикальных трассах в атмосфере, в качестве опорных данных использовались результаты комплексного эксперимента по лидарному и радиометрическому зондированию аэрозоля. Такие измерения дополняют друг друга в информационном содержании и в дневное время суток при отсутствии облаков на небосводе позволяют получать достаточно надежные оценки оптических и микрофизических параметров аэрозоля.

Исходные данные были подготовлены и любезно предоставлены Центром оптического дистанционного зондирования НАН Беларуси. Исходные эхо-сигналы атмосферы измерены 04.04.2016 в Минске лидаром Института физики НАН Беларуси. Параллельно с этим проводились измерения яркости атмосферы в главной плоскости и в солнечном альмукантарате радиометром CIMEL (CE-318). Опорные распределения объемных концентраций мелкодисперсной $C_1(r)$ и грубодисперсной $C_2(r)$ компонент аэрозоля получены в результате комплексной обработки данных лидара и радиометра алгоритмом LIRIC [2].

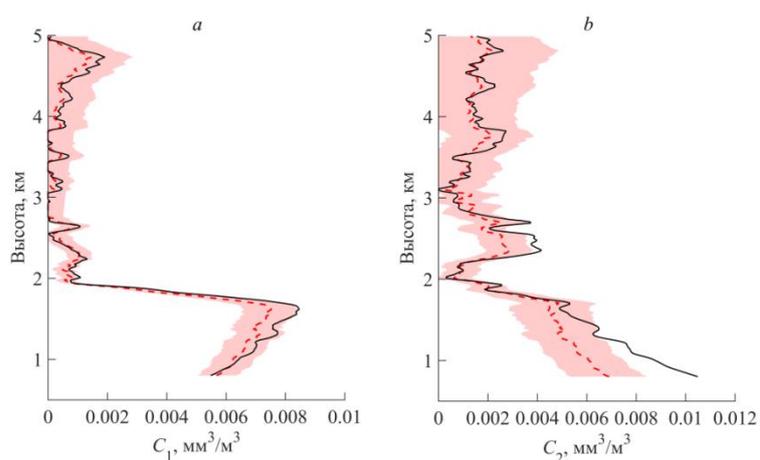


Рисунок 2. Результаты восстановления профилей концентраций мелкодисперсной C_1 (*a*) и грубодисперсной C_2 (*b*) компонент аэрозоля из лидарных сигналов с использованием алгоритма LIRIC (сплошная линия) и алгоритма авторов (штриховая линия). Закрашенные области соответствуют апостериорным дисперсиям восстановленных профилей

Профили объемных концентраций мелкодисперсной и грубодисперсной мод аэрозоля, восстановленные разработанным алгоритмом только из лидарных сигналов и алгоритмом LIRIC [2] с привлечением радиометрических данных, сопоставлены на рис. 2. Видно, что разработанный алгоритм позволяет получать адекватные оценки объемной концентрации мелкодисперсных частиц аэрозоля в атмосфере, причем эта задача решается без необходимости калибровки лидара и установления опорных значений оптических параметров аэрозоля на трассе зондирования. Профиль концентрации грубодисперсной моды аэрозоля, восстанавливаемый из лидарных сигналов разработанным алгоритмом, также неплохо отражает особенности ее вертикального распределения в атмосфере.

Для верификации разработанного алгоритма восстановления карт PM по спутниковым данным анализировались спутниковые снимки MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) за 2010–2011 гг., а также подспутниковые измерения и расчеты на станциях солнечных фотометров AERONET. Интегральные содержания PM_{2.5} в атмосфере, полученные по данным спутниковых и наземных измерений, сопоставлены на рис. 3

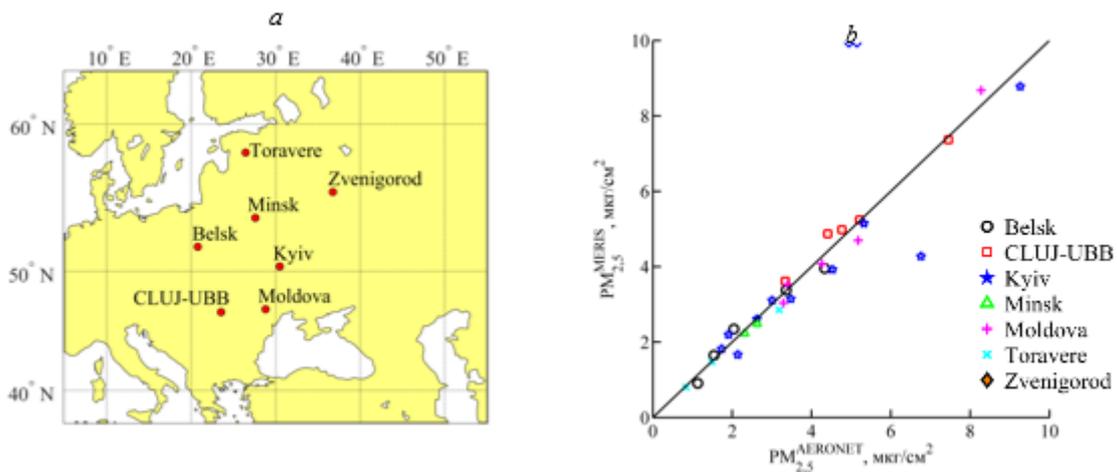


Рисунок 3. Результаты верификации алгоритма восстановления PM_{2.5} по спутниковым снимкам MERIS с привлечением данных AERONET: *a* – карта расположения выбранных станций AERONET; *b* – сопоставление спутниковых и наземных оценок PM_{2.5}

Список литературы

- [1]. В. Е. Зуев, И. Э. Нац. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. – Новосибирск: Наука, 1982. – 240 с.
- [2]. A. Chaikovsky et. al. // Atmos. Meas. Tech. Discuss. 2015. V. 8, N 12. P. 12759–12822.
- [3]. A.A. Kokhanovsky, G. de Leeuw. Satellite aerosol remote sensing over land. – Springer, Praxis, 2009. – 388 p.
- [4]. С.А. Лысенко, М.М. Кугейко, В.В. Хомич // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 5. С. 404–413.
- [5]. С.А. Лысенко // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 9. С. 763–774.

OPERATIONAL MONITORING OF RESPIRABLE AEROSOL FRACTIONS IN THE ATMOSPHERE BY THE GROUND AND SATELLITE REMOTE SENSING DATA

S.A. LYSENKO, PhD

Head of the Center for Climate Research of the National Academy of Sciences of Belarus

M. V. DAVYDOV, PhD

Head of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering BSUIR, Associate Professor

E. S. KASHITSKY, PhD

Leading researcher at the Laboratory of Nutrition and Sports Physiology of the Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus

O.L. BOGDANOVICH

Director of Private Enterprise "Universal Health Technologies"

*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus
Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
E-mail: lysenkorfe@gmail.com*

Abstract. The new algorithms for retrieving of respirable aerosols concentrations in the atmosphere from multifrequency lidar and satellite radiometer signals is presented, which provide fast data processing with least a priori information usage. Their verification is performed with data of independent measurements and calculations.

Key words: aerosol, respirable particles, lidar, multispectral satellite images, inverse problem.