

СИНЕРГИЯ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ДИСТАНЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ

А. П. Чайковский^{1*}, А. И. Бриль¹, А. С. Федоренко¹, В. А. Пешеренков¹, С. В. Денисов¹, В. П. Дик¹, Ф. П. Осипенко¹, Н. С. Метельская¹, Ю. С. Балин², Г. П. Коханенко², И. Э. Пеннер², С. В. Самойлова², М. Г. Клемашева², С. В. Насонов², Г. С. Жамсуева³, А. С. Заяханов³, В. В. Цыдыпов³, А. Батболд⁴, Д. Аззая⁴, Э. Энхбат⁵, Д. Оюунчимэг⁴, Нгуен Суан Ань⁶, Фам Суан Тхань⁶, Нгуен Ван Хиеп⁶, Ан Дуй Туан⁷, Б. Чен⁸

УДК 535.36;535.214.4

¹ Институт физики НАН Беларуси,

220072, Минск, просп. Независимости, 68-2, Беларусь; e-mail: chaikov@dragon.bas-net.by

² Институт оптики атмосферы Сибирского отделения Российской АН, Томск, Россия

³ Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской АН, Улан-Удэ, Россия

⁴ Информационно-исследовательский институт метеорологии, гидрологии и окружающей среды Монголии, Улан-Батор, Монголия

⁵ Высшая школа экологических наук, Университет Хоккайдо, Япония

⁶ Институт геофизики Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Вьетнам

⁷ Институт прикладной физики и научного приборостроения,

Вьетнамская академия наук и технологий, Ханой, Вьетнам

⁸ Кыргызско-русский славянский университет, Бишкек, Кыргызская Республика

(Поступила 9 июля 2019)

Обсуждается методология комплексного наземного и спутникового мониторинга атмосферного аэрозоля. Описан алгоритм обработки данных согласованных лидарных и радиометрических измерений (LRS). Алгоритм апробирован для изучения высотных профилей параметров аэрозоля в окрестностях станций AERONET с привлечением данных наземных солнечных радиометров и спутникового лидара CALIOP. Для проверки результатов спутникового зондирования использованы скоординированные измерения радиометрами сети AERONET и наземными многоволновыми лидарами на станциях дистанционного зондирования Института физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь), Института оптики атмосферы СО РАН (Томск, Россия) и КРСУ (Теплоключенка, Кыргызстан).

Ключевые слова: наземное и спутниковое дистанционное зондирование, лидар, радиометр, аэрозоль.

The methodology of integrated ground-based and satellite monitoring of atmospheric aerosols is discussed, and an algorithm for processing data from coordinated lidar and radiometric measurements (LRS)

SYNERGY OF GROUND-BASED AND SATELLITE OPTICAL REMOTE MEASUREMENTS FOR STUDY OF ATMOSPHERIC AEROSOLS

A. P. Chaikovsky^{1*}, A. I. Bril¹, A. S. Fedarenka¹, V. A. Peshcharankou¹, S. V. Denisov¹, V. P. Dick¹, F. P. Asipenka¹, N. S. Miatselskaya¹, Yu. S. Balin², G. P. Kokhanenko², I. E. Penner², S. V. Samoilova², M. G. Klemasheva², S. V. Nasonov², G. S. Zhamsueva³, A. S. Zayakhanov³, V. V. Tsydyпов³, A. Batbold⁴, D. Azzaya⁴, E. Enkhbat⁵, D. Oyunchimeg⁴, Nguyen Xuan Anh⁶, Pham Xuan Thanh⁶, Nguyen Van Hiep⁶, Au Duy Tuan⁷, B. Chen⁸ (¹ B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, 68-2 Nezavisimosti Prosp., 220072, Minsk, Belarus, e-mail: chaikov@dragon.bas-net.by; ² V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia; ³ Institute of Physical Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia; ⁴ Information and Research Institute of Meteorology, Hydrology and Environment (IRIMHE), Mongolia; ⁵ Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University, Japan; ⁶ Institute of Geophysics, Vietnam Academy of Science and Technology, Hà Noi, Vietnam; ⁷ Institute of Applied Physics and Scientific Instrument, Vietnam Academy of Science and Technology, Hà Noi, Vietnam; ⁸ Kyrgyz-Russian Slavic University, Bishkek, Kyrgyz Republic)

is described. The algorithm was tested to study the altitude profiles of the aerosol parameters in the vicinity of the AERONET stations using data from ground-based solar radiometers and the CALIOP satellite lidar. To verify the results of satellite sensing, coordinated measurements with AERONET network radiometers and ground-based multi-wavelength lidars at the remote sensing stations of the Institute of Physics, NASB (Minsk, Belarus), Institute of Atmospheric Optics, SB RAS (Tomsk, Russia) and KRSU (Teplokluchenska, Kyrgyzstan) were used.

Keywords: ground-based and satellite remote sensing, lidar, radiometer, aerosol.

Введение. Перспективным направлением дистанционного зондирования атмосферного аэрозоля является координированное использование взаимодополняющих измерений. Например, в методе лидарного и радиометрического зондирования (LRS) синергетический эффект объединения двух систем наблюдения достигается путем координации процедур измерения и разработки алгоритмов обработки данных комплексных измерений [1, 2]. Первоначально LRS-метод был адаптирован для совместной обработки наблюдений глобальной радиометрической сети AERONET [3] и европейской аэрозольной лидарной сети EARLINET [4]. LRS-программное обеспечение (код LIRIC [5]) активно используется научными группами сети EARLINET [6, 7].

Важно, что метод LRS позволяет восстанавливать полный набор оптических параметров аэрозоля, требуемых для решения уравнения переноса излучения в вертикально-неоднородном аэрозольном слое (в том числе функцию распределения частиц по размерам, характеристики сферичности частиц, комплексный показатель преломления, вертикальные профили концентрации различных фракций аэрозоля). Эти данные могут использоваться для расчета радиационного баланса атмосферы, для верификации транспортных моделей аэрозоля и для решения других практических задач физики атмосферы.

Практическое применение исходной (“наземной”) версии LRS-метода ограничено малым количеством комплексных лидарных и радиометрических станций. В настоящее время насчитывается около 40 станций, оснащенных многоволновыми лидарами и солнечными радиометрами, которые позволяют применять технологию LRS. При этом такие станции сосредоточены в основном в Западной Европе. В то же время более 400 действующих солнечных радиометров AERONET регулярно проводят наблюдения в различных регионах Земли. Поэтому область применения LRS может быть существенно расширена путем ее адаптации для комплексной обработки наземных радиометрических измерений и данных многоволновых лидаров спутникового базирования (например, лидара CALIOP на борту спутника CALIPSO [8, 9]), полученных вблизи станций AERONET.

Особый интерес такая модификация LRS-метода представляет для ряда восточно-европейских и азиатских регионов с обширными территориями и ограниченной инфраструктурой наземных измерений. Работы по тестированию модифицированного LRS-метода проводились совместно научными центрами Беларуси, России, Монголии, Вьетнама и Кыргызстана с целью его дальнейшего использования для мониторинга аэрозольного загрязнения атмосферы над регионами Евразийского экономического союза (ЕАЭС). Для этих целей анализировались различные комбинации наземных и спутниковых измерений, схематично показанные на рис. 1.

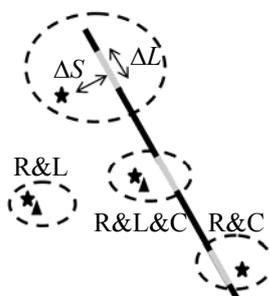


Рис. 1. Схема различных типов измерений: R&L — совмещенные наземные лидарные и радиометрические измерения; R&C — скоординированные измерения наземным радиометром и лидаром CALIOP; R&L&C — комплексные измерения наземным радиометром, наземным лидаром и лидаром CALIOP; черная линия — траектория CALIOP; серый сегмент — часть траектории протяженностью ΔL , используемая для оценки параметров аэрозоля; ΔS — расстояние между радиометрической станцией и сегментом траектории; ★ — радиометр станции AERONET; ▲ — многоволновая наземная лидарная станция

При интерпретации таких измерений характеристики атмосферного аэрозоля рассматриваются как многомерное случайное поле, зависящее от времени и координат в трехмерном пространстве. Обработка данных измерений типа R&L предполагает усреднение результатов локальных измерений во временном интервале $\Delta T \approx 0.5$ —1 ч. При обработке измерений типа R&C усреднение выполняется по выборке лидарных измерений на отрезке траектории $\Delta L \approx 100$ —200 км, которые выполнялись за промежуток времени < 1 мин. В общем случае результаты R&L- и R&C-измерений различны. Совпадения следует ожидать, если случайное поле характеристик аэрозоля удовлетворяет определенным условиям, обеспечивающим эквивалентность усреднения по пространственным координатам и времени, в частности, такими условиями являются горизонтальная однородность и стационарность случайного поля.

Адаптация кода LIRIC для обработки измерений спутникового лидара CALIOP. В качестве входных данных в исходной версии кода LIRIC используются стандартные измерения наземными лидарами EARLINET, а именно, сигналы обратного рассеяния с поперечной поляризацией на трех длинах волн (355, 532 и 1064 нм) и сигнал с параллельной поляризацией на $\lambda = 532$ нм. Спутниковый лидар CALIOP проводит измерения полного сигнала обратного рассеяния на $\lambda = 532$ и 1064 нм и поперечно поляризованной компоненты сигнала обратного рассеяния на $\lambda = 532$ нм. В [5] показано, что исключение лидарного сигнала на $\lambda = 355$ нм из набора входных данных для программного обеспечения LIRIC лишь незначительно влияет на полученные профили концентрации аэрозольных мод. Таким образом, ожидается, что данных CALIOP будет достаточно для определения параметров аэрозоля с помощью LRS-алгоритмов.

Восстановление параметров аэрозоля по комбинированным лидарным и радиометрическим измерениям относится к классу “некорректных” обратных задач, которые, в частности, характеризуются не единственными и нестабильными решениями, имеющими место даже при небольших погрешностях измерения или моделирования [10, 11]. Подобно классическим методам решения “некорректной” задачи инверсии [12] инверсионный код LIRIC для обработки LRS-измерений реализует три ключевых этапа: 1) параметризация исследуемого объекта (разработка модели аэрозольного слоя); 2) формулировка “прямой” задачи, т. е. вывод уравнений, которые связывают наблюдаемые сигналы с определенными параметрами модели аэрозоля; 3) решение обратной задачи, или восстановление целевых параметров модели аэрозоля, которые минимизируют расхождения между измеренными и рассчитанными входными сигналами. При адаптации кода LIRIC для обработки координированных измерений наземного радиометра и спутникового лидара CALIOP части кода, реализующие этапы 1 и 3, не изменяются. Для параметризации аэрозоля по-прежнему используется подход AERONET [13], в рамках которого атмосферный аэрозоль моделируется смесью сферических частиц и случайно ориентированных сфероидов. Распределение соотношения длин осей сфероидов фиксированное и одинаковое для всех размеров частиц, как и комплексный показатель преломления.

Ключевыми соотношениями прямой задачи являются многоволновые лидарные уравнения, включающие в себя информацию о вертикальных профилях параметров аэрозоля:

$$\mathbf{L}^* = \mathbf{L}(\lambda, c_k(h), \mathbf{a}_k, \mathbf{b}_k) + \Delta_L, \quad (1)$$

где \mathbf{L}^* — вектор “эффективного” сигнала лидара; $\mathbf{L}(\lambda, c_k(h), \mathbf{a}_k, \mathbf{b}_k)$ — векторная функция; $c_k(h)$ — искомая объемная концентрация k -й аэрозольной моды на высоте h ; $\mathbf{a}_k, \mathbf{b}_k$ — фиксированные параметры оптической модели аэрозоля, выбранной на основе радиометрических данных; λ — длина волны зондирования; Δ_L — вектор погрешностей измерения. Оптическая модель $(\mathbf{a}_k, \mathbf{b}_k)$ определяется комплексным показателем преломления, функцией распределения частиц по размерам, соотношением сфер и сфероидов в смеси частиц.

В исходной (“наземной”) версии алгоритма/кода LIRIC [5] компоненты $L_j^*(h)$ эффективного сигнала, измеряемого приемным каналом $j, j \in 1, \dots, J$, определяются уравнением:

$$L_j^*(\lambda_j, h) = \frac{S_j^*(\lambda_j, h)}{\hat{S}_j^*(\lambda, h_{\text{ref}})} \exp(-2\delta_{h_i, h_{\text{ref}}} \tau_r(\lambda_j, h, h_{\text{ref}})), \quad (2)$$

где $S_j^*(\lambda_j, h) = P_j^*(\lambda_j, h)h^2$, $P_j^*(\lambda_j, h)$ — измеренный лидарный сигнал; $\hat{S}_j^*(\lambda_j, h_{\text{ref}})$ — величина $S_j^*(\lambda_j, h)$ на реперной высоте h_{ref} , которая обычно выбирается на границе области зондирования;

$\tau_r(\lambda_j, h, h_{\text{ref}}) = \int_h^{h_{\text{ref}}} \sigma_r(\lambda_j, h) dh$, $h \leq h_{\text{ref}}$ — молекулярная оптическая толщина, относящаяся к диапазону (h, h_{ref}) , σ_r — коэффициент молекулярного ослабления, λ_j — длина волны, h — высота; $\delta(h, h_{\text{ref}})$ — вспомогательная функция:

$$\delta_{h_i, h_{\text{ref}}} = \begin{cases} 1, & \text{если } h_i \leq h_{\text{ref}} \\ -1, & \text{если } h_i > h_{\text{ref}}. \end{cases} \quad (3)$$

Компоненты векторной функции **L** в уравнении (1) могут быть записаны как

$$L_j(\lambda_j, h) = \frac{\beta_j(\lambda_j, h) \exp(2\delta_{h_i, h_{\text{ref}}} \tau_a(\lambda_j, h, h_{\text{ref}}))}{\beta_{r,j}(h_{\text{ref}}) R_j(\lambda_j, h_{\text{ref}})}, \quad (4)$$

где

$$R_j(\lambda_j, h) = \frac{\beta_{a,j}(\lambda_j, h) + \beta_{r,j}(\lambda_j, h)}{\beta_{r,j}(\lambda_j, h)},$$

$$\beta_j(\lambda_j, h) = \beta_{a,j}(\lambda_j, h) + \beta_{r,j}(\lambda_j, h),$$

$\beta_j(\lambda_j, h)$ — коэффициент полного обратного рассеяния; $\beta_{a,j}(\lambda_j, h)$ и $\beta_{r,j}(\lambda_j, h)$ — коэффициенты аэрозольного и молекулярного обратного рассеяния; $\tau_a(\lambda_j, h, h_{\text{ref}}) = \int_h^{h_{\text{ref}}} \sigma_a(\lambda_j, h) dh$, $h \leq h_{\text{ref}}$ — оптическая толщина аэрозоля для диапазона (h, h_{ref}) ; $\sigma_{a,j}(\lambda_j, h)$ — коэффициент аэрозольного ослабления.

Коэффициенты аэрозольного ослабления и обратного рассеяния линейно связаны с искомыми концентрациями аэрозольных фракций. В [14] показано, что различие геометрических схем наземного и спутникового лидарного зондирования учитывается путем модификации уравнений для эффективного сигнала (2) и векторной функции (4), которые для спутникового зондирования принимают вид

$$L_{V,j}^*(h_i) = \frac{S_{C,j}^*(h_i)}{S_{C,j}^*(h_{\text{ref}})} \exp(2\delta_{h_i, h_{\text{ref}}} \tau_{r,j}(h_i, h_{\text{ref}})), \quad (5)$$

$$L_{V,j}(h_i) = \frac{\beta_j(h_i) \exp(-2\delta_{h_i, h_{\text{ref}}} \tau_{a,j}(h_i, h_{\text{ref}}))}{\beta_{r,j}(h_{\text{ref}}) R_j(\lambda_j, h_{\text{ref}})}, \quad (6)$$

где $\frac{S_{C,j}^*(h_i)}{S_{C,j}^*(h_{\text{ref}})}$ — нормированный сигнал лидара CALIOP на длине волны λ_j после вычитания фона и

устранения артефактов [15]. Основное отличие уравнений (5) и (6) от “наземных” аналогов (2) и (4) — противоположные знаки в показателях экспонент. С учетом этих отличий создана специальная версия кода LIRIC-C для обработки данных CALIOP.

Предварительная подготовка данных спутникового лидарного зондирования для совместной обработки с данными радиометрических наземных измерений. При отборе данных спутникового лидарного зондирования время и пространственные координаты спутниковых измерений должны быть достаточно близки к соответствующим характеристикам радиометрических измерений в сети AERONET. Кроме того, выборка спутниковых данных должна быть достаточно большой (несколько сотен точек данных) для значительного снижения случайных шумов путем пространственно-временного усреднения профилей сигналов обратного рассеяния, измеренных лидаром CALIOP [8, 9].

Как правило, измерения считались совместимыми, если координаты измерения CALIOP находились в пределах круга радиусом 1° (сетка широта-долгота) с центром на станции AERONET, а разница во времени измерений не превышала 2—3 ч. Длина выделенного участка траектории CALIPSO может составлять до ~ 200 км, число спутниковых измерений до ~ 600 профилей сигналов обратного рассеяния.

На рис. 2 показан высотный профиль сигнала обратного рассеяния на $\lambda = 532$ нм, усредненный по выборке совместимых AERONET-CALIPSO измерений (588 точек) для станции AERONET в г. Хознпайсенберг (Германия). Выраженные пики сигнала для различных высот с большой веро-

ятностью обусловлены наличием облаков на трассах лидарного зондирования. Это указывает на необходимость фильтрации (дискриминации) сигналов, искаженных влиянием облаков.

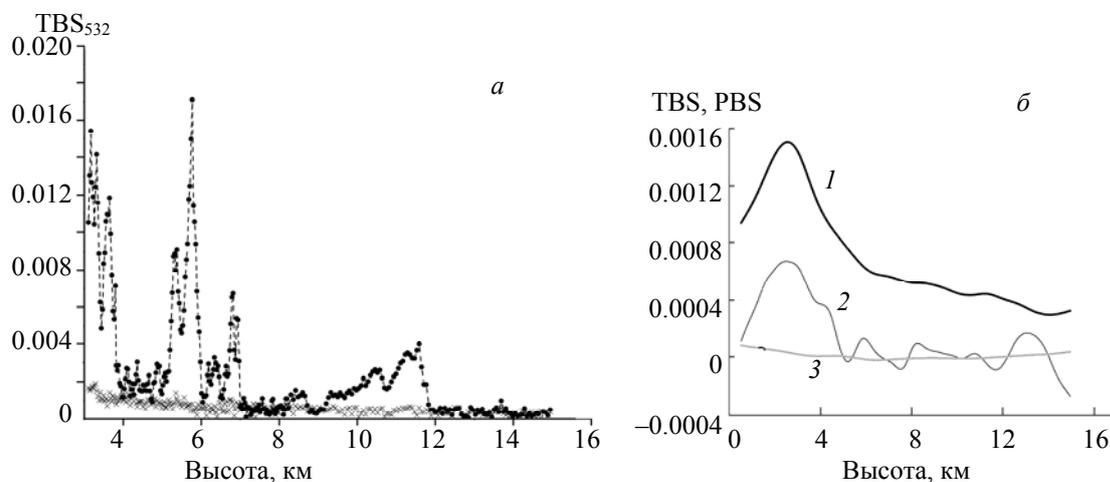


Рис. 2. Профили сигнала обратного рассеяния ($\lambda = 532$ нм) TBS_{532} после усреднения по выборкам совместимых AERONET-CALIPSO измерений для станции в г. Хоэнпайсенберг (Германия); \bullet — исходный профиль (588 измеренных профилей в выборке); \times — результирующий профиль (295 профилей) после фильтрации сигналов, искаженных влиянием облаков (а); б — полные сигналы обратного рассеяния (TBS) на $\lambda = 532$ (1) и 1064 нм (2), а также поляризованный сигнал (PBS) на $\lambda = 532$ нм (3)

Для обнаружения и дискриминации сигналов от облачных образований использован алгоритм, основанный на контроле пространственной однородности профилей коэффициентов обратного рассеяния на $\lambda = 532$ и 1064 нм. Реализация алгоритма включает в себя: а) расчет усредненных за время наблюдения профилей коэффициентов обратного рассеяния β_{180} на $\lambda = 532$ и 1064 нм, а также профилей дисперсий (σ^2) β_{180} , характеризующих изменчивость β_{180} за период наблюдения; б) расчет отклонений мгновенных значений коэффициентов обратного рассеяния β_{180} от соответствующего среднего значения и исключение из выборки лидарных измерений данных, для которых эти отклонения превышают некоторое пороговое значение $\Delta = K\sigma$, где эмпирический коэффициент K варьировался в диапазоне 3—10; в) повторение процедуры (б) в итерационном режиме для “отфильтрованной” выборки лидарных измерений до стабилизации размера (количества измерений) выборки.

Алгоритм фильтрации тестировался для ~60 выборок совместимых AERONET-CALIPSO измерений. Он достаточно эффективен для дискриминации сигналов от низких облаков (ниже 5 км). Эффективность алгоритма для выявления и фильтрации высотных (перистых) облаков (выше 8 км) заметно хуже. Для дополнительного контроля алгоритмов фильтрации использованы операционные данные проекта CALIPSO, относящие к дискриминации вклада облаков в лидарные сигналы (Lidar Level 2 Vertical Feature Mask Products, версии 3.40 и 4.10).

На рис. 2 показан результат применения разработанного алгоритма к выборке совместимых AERONET-CALIPSO измерений для станции в г. Хоэнпайсенберг (Германия). Использование алгоритма позволило успешно устранить сигналы, “загрязненные” вкладом облачных образований. При этом после фильтрации объем выборки совместимых измерений остается достаточно большим (295 измеренных профилей для каждой длины волны) для значительного снижения случайных шумов при пространственно-временном усреднении сигналов спутникового лидарного зондирования.

Как видно из рис. 2, а, даже после успешной фильтрации сигналов, искаженных влиянием облаков, остаточный уровень случайных шумов достаточно высок и требует проведения дополнительного сглаживания лидарных сигналов. Для этих целей использована стандартная подпрограмма DSSMH из библиотеки IMSL (<http://www.roguewave.com/products-services/imsl-numerical-libraries>). Эта подпрограмма реализует алгоритм [2], в котором исходная “зашумленная” функция f аппроксимируется на основе кубических сплайнов. Результат применения алгоритма сглаживания на основе кубических сплайнов показан на рис. 2, б для полного набора измеряемых лидарных сигналов на станции в г. Хоэнпайсенберг (Германия).

Измерения типа R&L&C позволяют сравнить профили концентраций различных мод аэрозоля, $c_k^g(h)$ и $c_k^s(h)$, полученные по данным наземного и спутникового лидаров. В настоящей работе разница профилей $c_k^g(h)$ и $c_k^s(h)$ характеризуется параметром G :

$$G(c_k^g, c_k^s) = \frac{\sum_i (c_k^g(h_i) - c_k^s(h_i))^2}{\sum_i (c_k^g(h_i))^2 + \sum_i (c_k^s(h_i))^2}, \text{ где } G(c_k^g, c_k^s) \in [0, 1].$$

Параметр $G(c_k^g, c_k^s)$ определяет среднюю разность между профилями $c_k^g(h)$ и $c_k^s(h)$, т. е. отличие в содержании аэрозольного вещества в слоях атмосферы, $G(c_k^g, c_k^s) = 0$ и 1 характеризуют два предельных случая — полное совпадение профилей $c_k^g(h)$ и $c_k^s(h)$ или локализацию аэрозоля в попарно не совпадающих атмосферных слоях.

Подобие форм профилей $c_k^g(h)$ и $c_k^s(h)$ удобно характеризовать коэффициентом корреляции Пирсона $K(c_k^g(h), c_k^s(h))$. Параметр $G(c_k^g, c_k^s)$ связан с коэффициентом $K(c_k^g(h), c_k^s(h))$ соотношением

$$G(c_k^g(h), c_k^s(h)) = 1 - 2 \frac{K(c_k^g(h), c_k^s(h)) \sqrt{S_k^g S_k^s} + C_k^g C_k^s}{S_k^g + S_k^s + (C_k^g)^2 + (C_k^s)^2},$$

где S_k^g и S_k^s — дисперсии величин $c_k^g(h)$ и $c_k^s(h)$; C_k^g и C_k^s — средние значения $c_k^g(h)$ и $c_k^s(h)$.

На рис. 3 представлены результаты совместной обработки радиометрических наблюдений и данных зондирования наземного и космического лидаров, полученные в окрестности радиометрической станции (измерения типа R&L&C, рис. 1). Сравниваются вертикальные профили концентраций мелкой и крупной фракций аэрозоля, полученные в районах комплексных станций дистанционного зондирования лидарной сети CIS-LiNet [17] и радиометрической сети AERONET в городах Минск (Беларусь), Томск (Россия) и Теплоключенка (Кыргызстан). Параметры $G(c_k^g, c_k^s)$ и $K(c_k^g(h), c_k^s(h))$, рассчитанные по результатам R&L&C-измерений (рис. 1), приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Значения $G(c_k^g, c_k^s)$ и $K(c_k^g(h), c_k^s(h))$ для пар профилей аэрозольных концентраций, восстановленных по данным наземных и спутниковых лидарных измерений

Станция	Географические координаты	Дата измерений	G		K	
			мелкая	крупная	мелкая	крупная
Минск	53.920N, 27.601E	19/05/2017	0.29	0.07	0.46	0.92
IAOCA-KRSU (Теплоключенка)	42.464N, 78.529E	15/05/2017	0.48	0.16	0.24	0.53
		17/05/2017	0.64	0.07	0.55	0.57
Томск	56.475N, 85.048E	18/05/2017	0.20	0.44	0.34	0.45

К различиям профилей концентраций аэрозоля, восстановленных по данным наземных и спутниковых измерений, приводят нарушения статистических свойств случайных полей аэрозоля, указанных ранее, а также временные и пространственные несовпадения измерительных систем. Меняющийся рельеф поверхности в районе радиометрической станции является существенным фактором различий между результатами наземных и спутниковых лидарных измерений, особенно в горных районах, таких как окрестности Теплоключенки.

Методика совместных космических лидарных и наземных радиометрических измерений (измерения типа R&C, рис. 1) и алгоритмы обработки данных тестировались в комплексных наземных и спутниковых экспериментах, проведенных в условиях загрязнения атмосферы дымами пожаров и пылью.

На рис. 4, а показаны профили концентраций мелкой и крупной фракций аэрозоля, измеренных в районах станций AERONET Bac_Lieu (Вьетнам) и Dalanzadgad (Монголия), восстановленные путем обработки данных измерений солнечными радиометрами и космическим лидаром CALIOP (измере-

ния типа R&C, рис. 1). Приведенные границы неопределенности оценки концентрации аэрозоля получены из анализа результатов обработки “возмущенного” массива входных данных, элементы которого образованы из измеряемых данных с добавлением шумов лидарных сигналов и неопределенности оценки параметров аэрозоля из радиометрических измерений. Преобладание мелкой аэрозольной фракции в пограничном слое атмосферы на станции *Vac_Lieu* обусловлено распространением дымов от очагов пожаров в регионе.

Профили концентраций аэрозольных фракций на рис. 4, б получены в районе станции AERONET *Dalanzadgad* в аридном регионе в Монголии. В данном случае в нижнем слое атмосферы преобладают крупные частицы, источником которых является земная поверхность, а механизмом переноса в атмосферу — ветровой подъем.

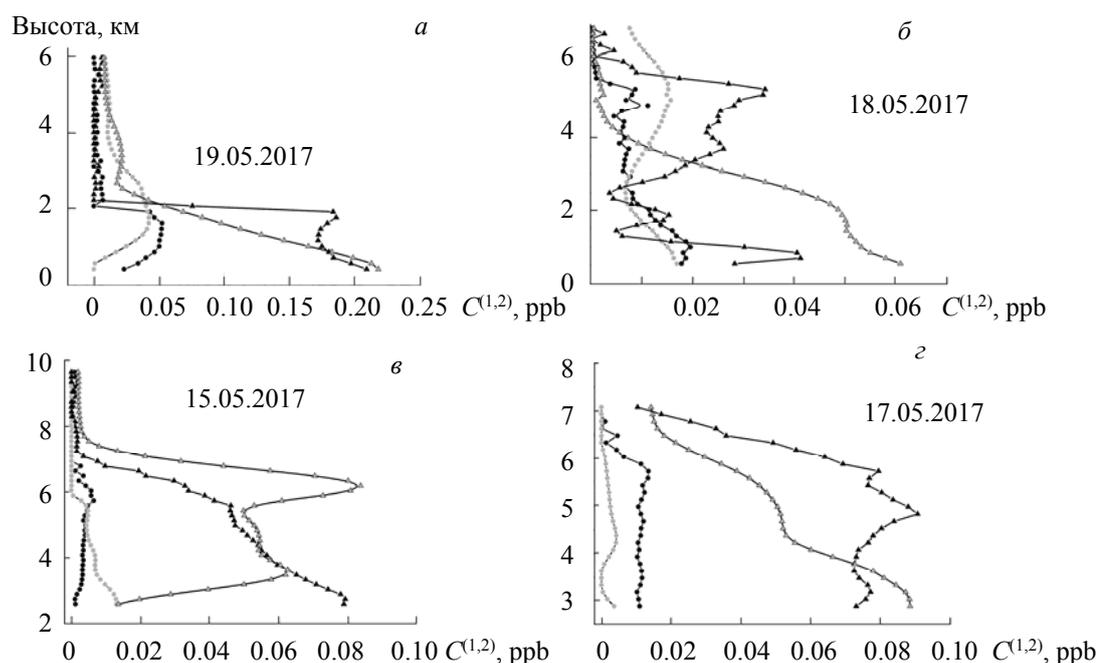


Рис. 3. Сопоставление профилей концентраций мелкой (\circ, \bullet) и крупной (Δ, \blacktriangle) фракций аэрозоля на станциях в Минске (*a*), Томске (*б*) и Теплоключенке (*в, з*), восстановленных путем совместной обработки данных наземного солнечного радиометра, лидара (\blacktriangle, \bullet) и космического лидара CALIOP (Δ, \circ)

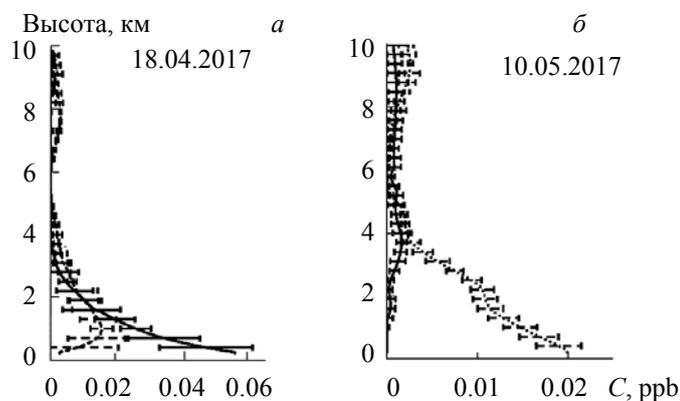


Рис. 4. Профили концентраций мелкой (сплошная линия) и крупной (пунктир) фракций аэрозоля на станциях AERONET *Vac_Lieu* (*a*) и *Dalanzadgad* (*б*), восстановленных путем совместной обработки данных наземного солнечного радиометра и космического лидара CALIOP; горизонтальными отрезками показаны границы неопределенности оценки концентраций

Заключение. Разработан метод комплексного наземного и спутникового зондирования атмосферного аэрозоля посредством наземных радиометрических станций и лидарных систем наземного и спутникового базирования. Методика и алгоритм обработки результатов комплексных измерений с использованием данных космического лидара CALIOP и наземных лидарных и радиометрических систем тестировались в серии натурных измерений в Беларуси, России, Кыргызстане, Монголии и Вьетнаме.

Первое применение нового варианта LRS-метода с включением в систему наблюдений космического лидара осуществлено в исследованиях процессов трансграничного переноса аэрозоля в Восточно-Европейском регионе в рамках мероприятия Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь. Разрабатывается унифицированный программный пакет LIRIC-C, который предназначен для обработки данных наземных и спутниковых лидаров в комплексе с радиометрической информацией. Новый программный пакет, его описание и обновления будут находиться в свободном доступе, как и пакет LIRIC.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор Ф18ЕА-011), Вьетнамской академией наук и технологий (код проекта QTRU05.01/18-20), Монгольского фонда науки и техники (код проекта ЕА-2018/29), Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-55-81001).

- [1] **A. Chaikovsky, O. Dubovik, B. Holben, A. Bril.** Proc. SPIE, **4678** (2002) 257—268
- [2] **A. Chaikovsky, A. Bril, O. Dubovik, B. Holben, A. Thompson, P. Goloub, N. O'Neill, P. Sobolewski, J. Bösenberg, A. Ansmann, U. Wandinger, I. Mattis.** Opt. Pur. Aplicada, **37** (2004) 3241—3246
- [3] The AERONET — Aerosol Robotic Network; <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
- [4] A European Aerosol Research Lidar Network, EARLINET; <https://www.earlinet.org>
- [5] **A. Chaikovsky, O. Dubovik, B. Holben, A. Bril, P. Goloub, D. Tanré, G. Pappalardo, U. Wandinger, L. Chaikovskaya, S. Denisov, J. Grudo, A. Lopatin, Y. Karol, T. Lapyonok, V. Amiridis, A. Ansmann, A. Apituley, L. Allados-Arboledas, I. Biniatoglou, A. Boselli, G. D'Amico, V. Freudenthaler, D. Giles, M. J. Granados-Muñoz, P. Kokkalis, D. Nicolae, S. Oshchepkov, A. Papayannis, M. R. Perrone, A. Pietruczuk, F. Rocadenbosch, M. Sicard, I. Slutsker, C. Talianu, F. De Tomasi, A. Tsekeri, J. Wagner, X. Wang.** Atmos. Meas. Tech., **9** (2016) 1181—1205
- [6] **J. Wagner, A. Ansmann, U. Wandinger, P. Seifert, A. Schwarz, M. Tesche, A. Chaikovsky, O. Dubovik.** Atmos. Meas. Tech., **6** (2013) 1707—1724
- [7] **M. J. Granados-Muñoz, J. L. Guerrero-Rascado, J. A. Bravo-Aranda, F. Navas-Guzmán, A. Valenzuela, H. Lyamani, A. Chaikovsky, U. Wandinger, A. Ansmann, O. Dubovik, J. Grudo, L. Alados-Arboledas.** J. Geoph. Res.: Atmospheres, **119** (2014) 4836—4858
- [8] The Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO); <https://wwwcalipso.larc.nasa.gov/>
- [9] **A. H. Omar, D. M. Winker, C. Kittaka, M. A. Vaughan, Z. Liu, Y. Hu, C. R. Trepte, R. R. Rogers, R. A. Ferrare, K.-P. Lee, R. Kuehn, C. A. Hostetler.** J. Atmos. Ocean. Tech., **26** (2009) 1994—2014
- [10] **А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин.** Методы решения некорректных задач, 2-е изд., Москва, Наука (1979)
- [11] **C. D. Rodgers.** Inverse Methods for Atmospheric Sounding. Theory and Practice, Word Scientific (2000).
- [12] **A. Tarantola.** Inverse Problem Theory: Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation, Amsterdam, Elsevier (1987)
- [13] **O. Dubovik, M. King.** J. Geophys. Res., **105** (2000) 20673—20696
- [14] **A. Chaikovsky, L. Chaikovskaya, N. Denishchik-Nelubina, A. Fedarenka, S. Oshchepkov.** EDJ Web of Conferences, **176** (2018) 08007
- [15] CALIOP Algorithm Theoretical Basis Document; Calibration and Level 1 Data Products. PC-SCI-201, Release 1.0, 7 April 2006 (2006) 1—66
- [16] **C. de Boor.** A Practical Guide to Splines, Springer-Verlag, New York (1978) 235—243
- [17] **А. П. Чайковский, А. П. Иванов, Ю. С. Балин, А. В. Ельников, Г. Ф. Тулинов, И. И. Плюсин, О. А. Букин, Б. Б. Чен.** Опт. атм. и океана, **18** (2005) 1066—1072