

УДК 551.5

Т. Петтайя¹, Л. Ярви², В.М. Керминен³, Айджин Динг⁴, Джуинг Сан⁵, Ваний Ни⁶, Джуинг Куянсуу⁷,
А. Вирккула⁸, Сиафен Янг⁹, Конгбин Фу¹⁰, П.И. Константинов¹¹, С.С. Зилитинкевич¹², М. Кулмала¹³

ЗАГРЯЗНЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ НИЖНЕЙ ТРОПОСФЕРЫ: ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

В последние годы отмечены случаи сильного ухудшения качества воздуха в Китае. В то время как высокие эмиссии послужили первоначальным основанием для возрастания концентрации отравляющих веществ, основные причины для случаев крайне высоких концентраций остались невыясненными. Показано, что высокая концентрация частиц РМ усиливает устойчивость городского пограничного слоя, что в свою очередь уменьшает высоту пограничного слоя и последовательно значительно повышает концентрацию частиц РМ, что представляет собой положительную обратную связь с первоначальным увеличением концентрации.

Оценена устойчивость этой обратной связи путем теоретических расчетов и экспериментальных наблюдений, показано, что обратная связь остается умеренной для низких значений концентрации РМ, не превосходящих 200 мкг/м³, но она значительно возрастает для случаев высокой запыленности, которым сопутствует высокая РМ-эмиссия с поверхности или значительная РМ-продукция в пограничном слое. Объяснено, почему случаи загрязнения воздуха носят наиболее тяжелый характер в мегаполисах и в дни с постоянным характером погодных условий.

Ключевые слова: атмосферный аэрозоль, РМ2.5, городской пограничный слой.

Введение. Экономический рост в Китае в последние десятилетия – неоспоримый факт [Chandran, Tang, 2013]. Быстрая индустриализация, связанная с этим ростом вследствие потребности в ресурсах (энергия и материалы), повлекла за собой серьезные экологические проблемы [Chan, Yao, 2008; Mao et al., 2014]. В качестве примера можно привести заметное ухудшение качества воздуха, которое в среднем приводит к увеличению преждевременной смертности в год на 1,27 млн человек [Global..., 2016]. Более масштабные эпизоды, связанные с катастрофическим ухудшением качества воздуха, по данным ООН, повлекли за собой около 7 млн преждевременных смертей в 2012 г. [World..., 2014]. Неблагоприятное влияние на здоровье обусловлено огромным количеством взвешенных частиц в приземном слое воздуха, особенно в сочетании с газовыми примесями (например, озона) [Chen et al., 2013]. Концентрация аэрозольных частиц значительно выросла за последние десятилетия в Китае, а наиболее населенные регионы в последние годы подверглись частым эпизодам загрязнения воздуха [Qu

et al., 2010; Yang, et al., 2011; Yuming Guo et al., 2013; Wang et al., 2014; Gao et al., 2015]. В России подобные «аэрозольные» катастрофы наблюдались вследствие лесных и торфяных пожаров [Chubarova et al., 2011; Nezval et al., 2012; Gorchakova et al., 2012]

Отметим, что в последние 2–3 десятилетия уровень загрязнения в Китае систематически превышал аналогичные значения в прошлом [Lu et al., 2010; Lei, et al., 2011; Wang et al., 2012; Wang et al., 2013; Zhao et al., 2013]. Подобные явления пристально изучали и отечественные специалисты [Golitsyn et al., 2015].

Если сильная эмиссия аэрозолей определяет увеличение содержания в атмосфере отравляющих веществ, то основные причины наиболее высоких значений их концентрации не установлены. Главную роль в этой схеме играет пограничный слой, который наиболее тесно соприкасается (принимая на себя все воздействия) с поверхностью земли. В климатической системе этот слой представляет собой сильно турбулизированный буфер между земной поверхностью и свободной атмосферой. Высокие слои атмосферы,

¹ Университет Хельсинки, департамент физики, профессор; *e-mail:* tuukka.petaja@helsinki.fi

² Университет Хельсинки, департамент физики, профессор; *e-mail:* leena.jarvi@helsinki.fi

³ Университет Хельсинки, департамент физики, профессор; *e-mail:* veli-matti.kerminen@fmi.fi

⁴ Институт глобального климата и Высшая школа наук об атмосфере, Нанкинский университет, профессор; *e-mail:* dingaj@nju.edu.cn

⁵ Институт глобального климата и Высшая школа наук об атмосфере, Нанкинский университет, профессор; *e-mail:* dingaj@nju.edu.cn

⁶ Университет Хельсинки, департамент физики; Институт глобального климата и Высшей школы наук об атмосфере, Нанкинский, профессор; *e-mail:* niewei@nju.edu.cn

⁷ Университет Хельсинки, департамент физики, профессор; *e-mail:* jaana.leppalammi-kujansuu@helsinki.fi

⁸ Финский Метеорологический институт, Хельсинки, Институт глобального климата и Высшей школы наук об атмосфере, Нанкинский университет, профессор; *e-mail:* aki.virkkula@fmi.fi

⁹ Институт глобального климата и Высшая школа наук об атмосфере, Нанкинский университет, профессор; *e-mail:* yangx2@ornl.gov

¹⁰ Институт глобального климата и Высшая школа наук об атмосфере, Нанкинский университет, профессор; *e-mail:* cb@tea.ac.cn

¹¹ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии, ст. преп.; *e-mail:* kostadini@mail.ru

¹² Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, географический факультет; ИГ РАН, профессор; *e-mail:* sergej.zilitinkevich@fmi.fi

¹³ Университет Хельсинки, департамент физики, профессор; *e-mail:* markku.kulmala@helsinki.fi

напротив, практически не отличаются турбулентностью из-за их устойчивой стратифицированности.

Например, термическая изменчивость, связанная с суточным ходом освещенности деятельной поверхности, нелинейным образом влияет на турбулентность всего пограничного слоя, не исключая и его верхней границы. Подобным же образом газы, пыль и аэрозольные частицы, источником которых служит поверхность земли, на большей части поверхности блокируются пограничным слоем. Толщина планетарного пограничного слоя варьирует от нескольких десятков метров до нескольких километров, это важный параметр, определяющий случаи чрезвычайного загрязнения воздуха, экстремальные волны жары и холода и локальные последствия распространения аэрозольных частиц [Zilitinkevich, 2012].

Покажем, что антропогенное загрязнение аэрозолями создает выраженный «колпак» на верхней границе погранслоя, затрудняя турбулентное перемешивание от поверхности в высоту. В то время как механизм нарушения устойчивости атмосферного пограничного слоя аэрозольными частицами хорошо известен, общие представления об этом явлении в чрезвычайно загрязненных условиях (как это происходило в Китае) дискуссионны [Gao et al., 2015; Ding et al., 2013].

Путем теоретического анализа и изучения данных прямых измерений показано, что аэрозольное загрязнение усиливает устойчивость в пограничном слое. Это обуславливает положительную обратную связь, т.е. усиливается аэрозольное загрязнение (рис. 1). Эта связь оценена нами с использованием данных прямых измерений. Название этого феномена «новая китайская стена» отражает его появление исключительно в наиболее населенных регионах страны, хотя оно, безусловно, может возникать во всех мегаполисах с чрезвычайно загрязненной атмосферой.

Материалы и методы исследований. Данные получены с помощью опытной станции для наблюдения региональных процессов в Земной системе (The Station for Observing Regional Processes of the Earth System, SORPES), установленной в Нанкине (КНР) в рамках совместного проекта Нанкинского университета и Университета Хельсинки. Станция находится приблизительно в 20 км от центра г. Нанкин. Измерения начались в 2011 г., к настоящему времени включают в себя анализ качества и количества газовых примесей, аэрозолей и сопутствующих метеорологических параметров. Большинство датчиков установлено на крыше лабораторного здания, расположенного на вершине холма, относительная высота которого составляет приблизительно 40 м. Содержание частиц PM_{2.5} измеряли с помощью онлайн-масс-спектрометра «Thermo SHARP-5030», содержание аэрозолей – с помощью DHS в сухих условиях, при которых относительная влажность не превышает 35%. Содержание сажи (black carbon) устанавливали с помощью 7-канального эталомера «AE31-Magee Scientific». Для измерения

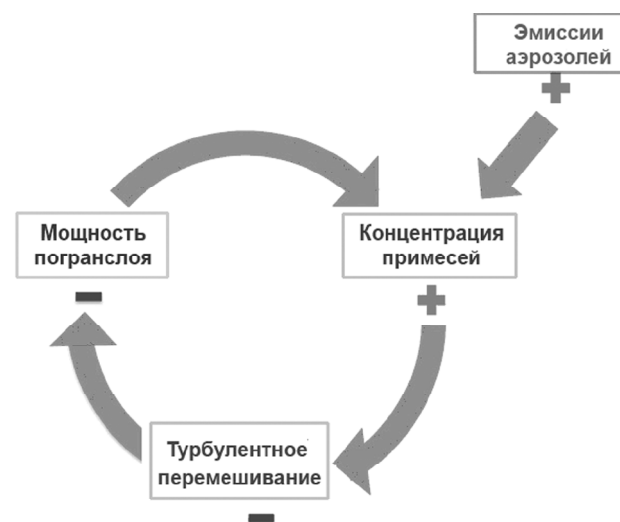


Рис. 1. Схема механизма обратной связи, инициированной увеличением концентрации аэрозолей в ПС, что приводит к уменьшению вертикальной протяженности ПС и последующему дополнительному увеличению аэрозольных концентраций

Fig. 1. A schematic figure of the feedback mechanism initiated by the increased aerosol concentration in the boundary layer leading to lower boundary layer height and hence elevated aerosol concentrations

метеорологических параметров применяется АМС «AG1000 Campbell Scientific Inc». Трехмерные флуктуации скорости ветра и виртуальная температура регистрируются с помощью регистратора CSAT3 «Campbell Scientific Inc.», водяной пар – с помощью регистратора EC150 той же фирмы. Все данные записываются с помощью логгера CR5000 «Campbell Scientific Inc.» со стандартной частотой 10 Гц.

Результаты исследований и их обсуждение.

Энергетический баланс земной поверхности в городских условиях можно описать следующим образом [Oke, 1982; Piringer et al., 2002]: поверхность нагревается посредством нисходящей коротковолновой солнечной радиации и длинноволновой радиации от атмосферы. В зависимости от альбедо земной поверхности часть солнечной радиации переотражается обратно в атмосферу. Кроме того, интенсивность излучения земной поверхности зависит от ее температуры. В итоге баланс энергии расходуется на турбулентные потоки тепла и влаги в атмосферу и сток энергии путем накопления тепла в деятельной поверхности. Интенсивность турбулентного перемешивания в свою очередь определяется двумя факторами – сдвигом ветра, механическим образом генерирующим турбулентность, и стратификацией пограничного слоя (ПС).

Городской пограничный слой обычно стратифицирован неустойчиво [Wood et al., 2010; Liu et al., 2012; Nordbo et al., 2013], он протяженный по вертикали и сильно турбулизован, что приводит к эффективному вертикальному разбавлению и последующему удалению загрязняющих веществ от земной поверхности. Мы утверждаем, что это справедливо только для умеренно загрязненного воздуха. Над китайскими городами типично развитие совершенно других ПС – относительно тонких и с эк-

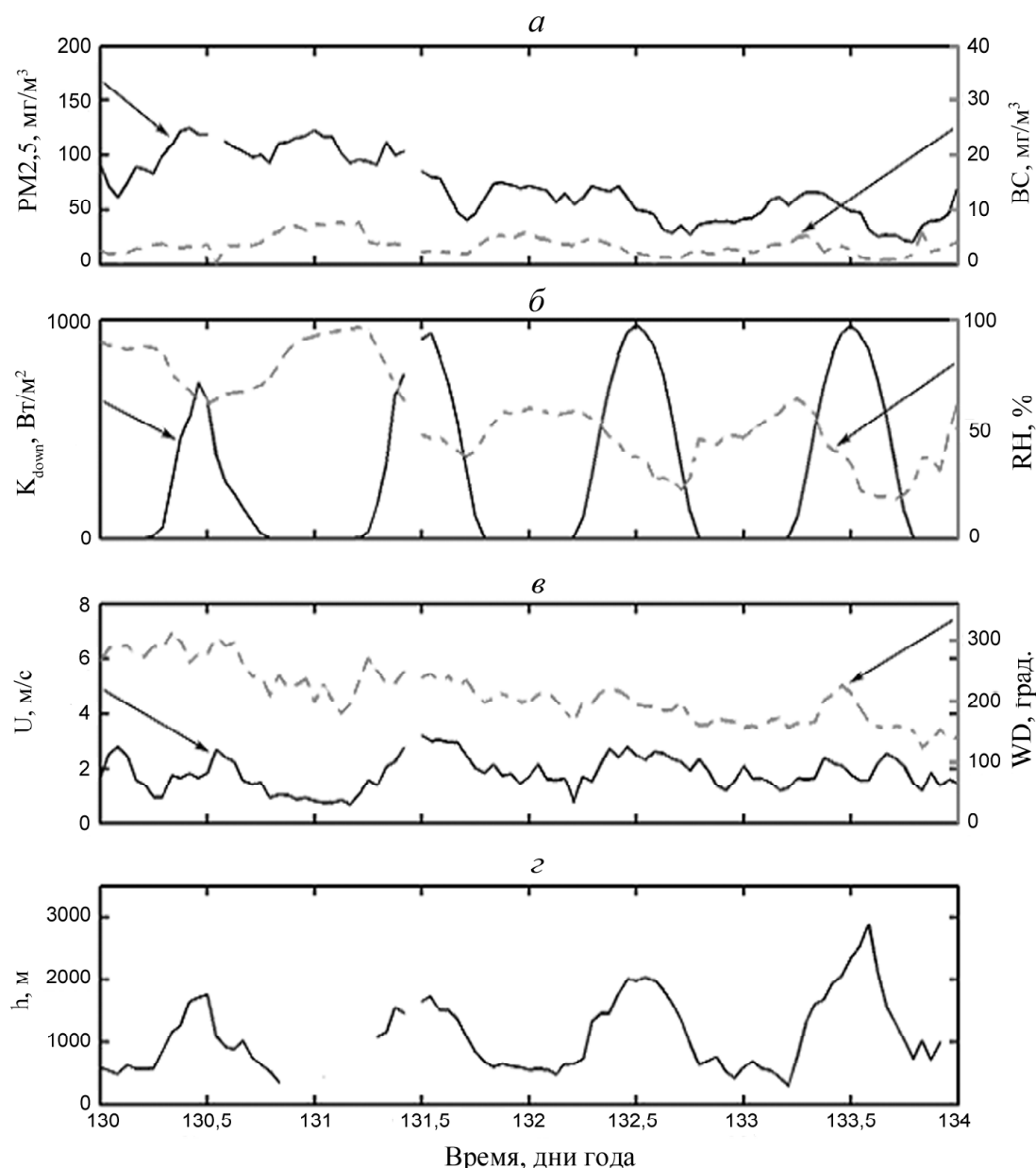


Рис. 2. Временной ход частиц аэрозоля $PM_{2.5}$ и сажи (BC) (а), нисходящей коротковолновой солнечной радиации (K_{down}) и относительной влажности воздуха (RH) (б), скорости (U) и направления ветра (WD) (в), вертикальной протяженности ПС (h) (г)

Fig. 2. Time series of (а), aerosol particles ($PM_{2.5}$) and black carbon (BC) (б), solar radiation (K_{down}) and relative humidity (RH) (в), wind speed (U) and direction (WD) and the boundary layer height (г)

стремальными значениями концентрации загрязняющих веществ [Wang et al., 2015; Chandran, Tang, 2013; Zhang et al., 2015], особенно в безоблачные дни. Этот парадокс мы объясняем неучтенной обратной связью между концентрацией аэрозолей и статической стабильностью ПС.

Предположим, что ПС становится чрезмерно загрязненным из-за эмиссий с поверхности и последующего формирования твердых примесей. Из-за этого оптическая толщина ПС и всего атмосферного столба увеличивается, что приводит к снижению количества солнечной радиации, доходящей до деятельной поверхности земли, и влияет на радиационный баланс. Радиация поглощается этим загрязненным ПС и переизлучается во всех возможных направлениях. Это поглощение меняет вертикальный

температурный профиль, т.е. высокие слои ПС становятся более нагретыми, что приводит к увеличению его устойчивости [Menon et al., 2002; Bond et al., 2013; Ding et al., 2013; Jacobson, 2001], уменьшая турбулентное перемешивание, в итоге это приводит к истончению ПС. Прямое следствие рассмотренного механизма уменьшения толщины ПС – увеличение концентрации аэрозолей из-за уменьшения содержащего их объема.

На рис. 2 проиллюстрирован описанный выше механизм на примере данных прямых измерений станцией SOPRES с 9 по 13 мая 2013 г. В этот период концентрация аэрозолей варьировала от 50 до 120 mg/m^3 , из которых примерно 10% приходилось на частицы сажи. Падающая коротковолновая радиация наблюдалась наименьшей именно в момент наибольшей

концентрации частиц, в то время как скорость ветра оставалась постоянной в течение рассматриваемого периода. Наименьшая вертикальная толщина пограничного слоя наблюдалась именно в день с наибольшей концентрацией загрязняющих веществ, что количественно подтверждает нашу гипотезу о существовании обратной связи между загрязненностью атмосферы и мощностью пограничного слоя. Эта корреляция не утверждает причинную зависимость, но она дает основания постулировать взаимосвязь между возрастанием аэрозольных концентраций, вертикальных турбулентных потоков и толщиной пограничного слоя, что базируется на теоретических представлениях.

Временной шаг наших наблюдений составлял 1 ч., в то время как характерное время перемешивания в ПС – около 20–30 мин. Таким образом, вероятно, что уменьшение вертикального турбулентного потока как функции концентрации аэрозолей представляет собой чистый эффект всей обратной связи (рис. 1). Рассматривая различные значения относительной влажности воздуха, можно отметить (рис. 3), что ее высокие значения соответствуют

случаям слабой зависимости высоты ПС от значений вертикального турбулентного потока и связаны с процессами поглощения влаги аэрозолями. В Нанкине периодам высокой влажности обычно сопутствуют небольшое турбулентное перемешивание и большая толщина ПС. Результаты аппроксимации (рис. 3) показывают, что толщина ПС уменьшается почти в 2 раза от первоначальной при повышении концентрации аэрозолей более 200 мг/м³.

С помощью аппроксимации, показанной на рис. 4, можно рассчитать интенсивность истончения ПС вследствие возрастающей концентрации аэрозолей в соответствующем слое атмосферы. Если принять за начальную концентрацию РМ последовательно ее значения 100, 200 или 250 мг/м³, то получим, что эффективность обсуждаемой обратной связи соответствует 1, 2 и 5% для $\Delta PM < 10$ мг/м³, 3, 5 и 12 % для $\Delta PM = 20$ мг/м³ и, наконец, 6, 13 и >50% для $\Delta PM = 40$ мг/м³. Эти значения вполне соответствуют модельным данным [Gao et al., 2015; Wang et al., 2015]. Для случаев экстремально сильного загрязнения ($PM > 250 \times 300$ мг/м³) получена крайне высокая степень ослабления приходящей к

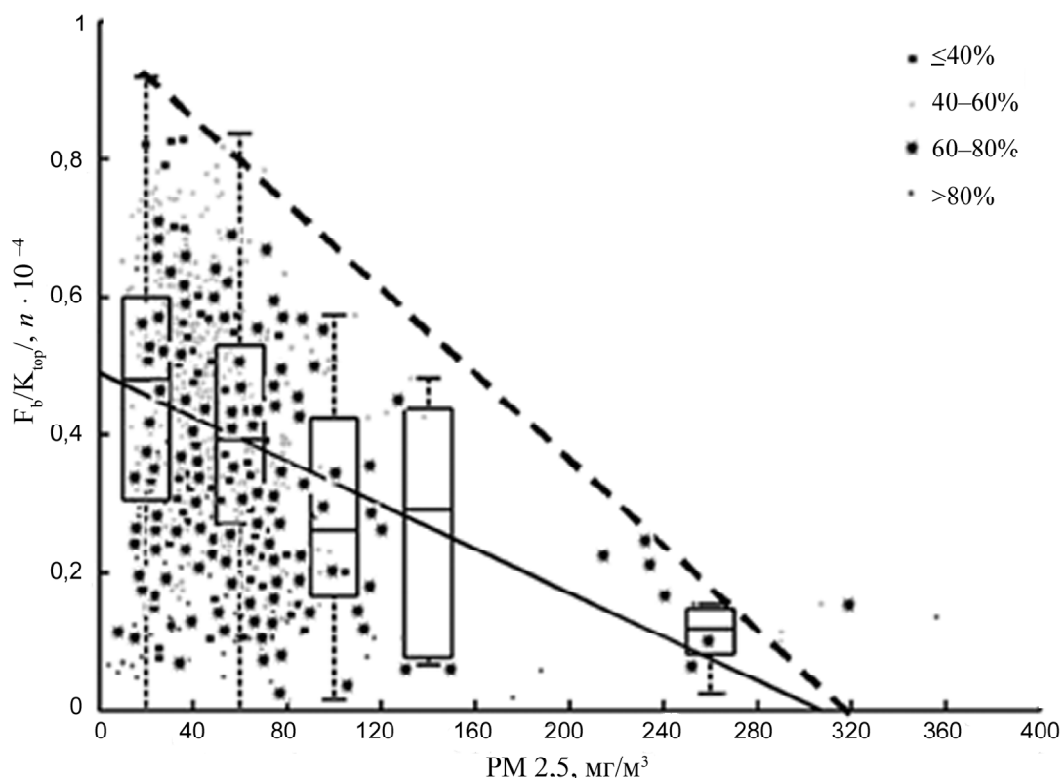


Рис. 3. Наблюдаемая зависимость отношения между турбулентным вертикальным потоком (F_b) и солнечной радиацией на верхней границе атмосферы (K_{top}) как функции наблюдаемой концентрации $PM_{2.5}$. Аппроксимация включает в себя все значения. Значения $PM_{2.5}$ сгруппированы в 5 групп, где медиана показана сплошной линией, поскольку внешние границы боксов представляют собой 25%- и 75%-ные квартили, а тонкие штриховые линии представляют собой межквартильную зону. Полуштриховая линия проведена через наивысшие точки квартилей. Учтены только дневные промежутки времени (от 10:00 до 14:00 местного времени) в дни без осадков. Значения относительной влажности во время измерений показаны значками справа

Fig. 3. Observed dependency of the ratio between the turbulent vertical flux (F_b) and the solar radiation at the top of the atmosphere (K_{top}) as a function of observed particulate matter ($PM_{2.5}$) concentration. The fitting includes all the data points. To guide the eye, the $PM_{2.5}$ data is binned in five batches where the median is shown as a line whereas the outer boundaries of the boxes represent 25 and 75 quartiles and the dashed lines present interquartile range (IQR). Dashed-line is the fit through the upper IQR points. Only daytime conditions between 10:00 and 14:00 local time from non-rainy periods are considered. Atmospheric RH during the measurements is indicated with the color of the data point. The dependency of the other radiation components are presented on $PM_{2.5}$ is presented in Supplementary Figure A1 and on BC concentration in Supplementary Figure A2

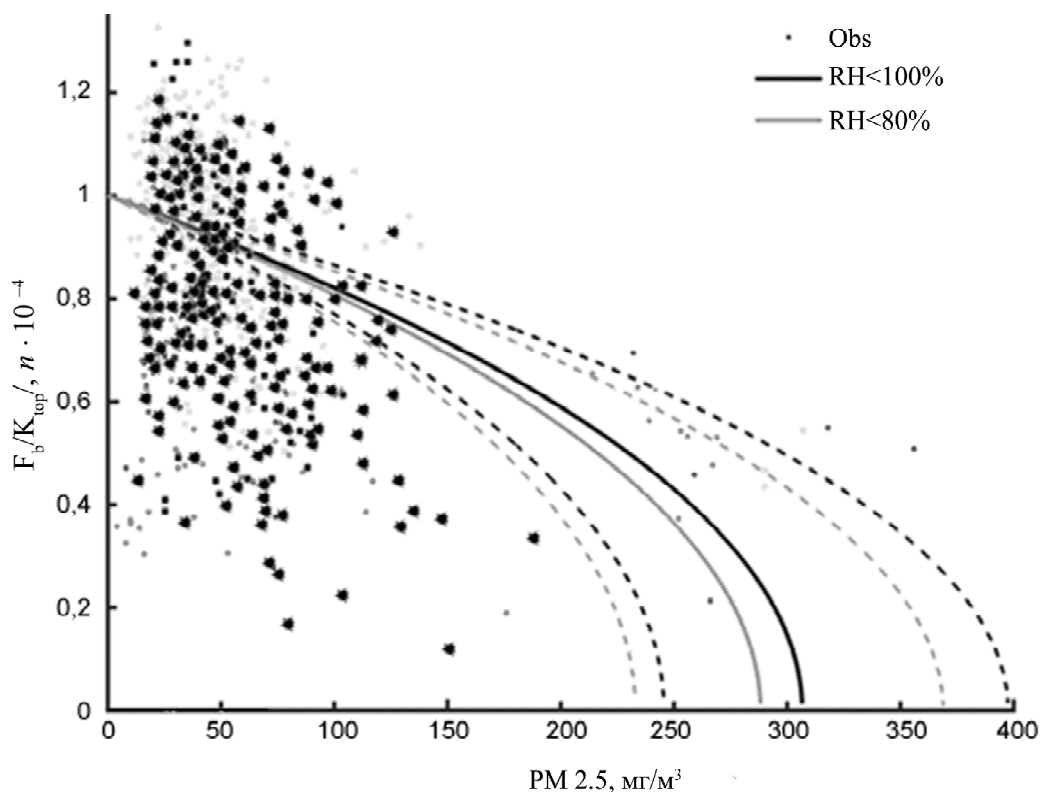


Рис. 4. Предполагаемое изменение отношение высоты «загрязненного» и «чистого» ПС, отдельно для всех имеющихся данных наблюдений и для сроков с относительной влажностью <80. Непрерывные линии – аппроксимация зависимости, штриховые линии показывают чувствительность результатов (на основе ошибок аппроксимации). Остальные обозначения см. на рис. 3

Fig. 4. The anticipated change in the ratio of polluted to non-polluted boundary layer heights separately for all the available data and for relative humidity below 80%. The points present observational data. The color of the data points describes relative humidity with same classification as in Figure 3. The solid lines present the fitted dependency and the dashed lines show the sensitivity of the results based on estimated fitting errors

земной поверхности солнечной радиации, поэтому для рассеяния примесей будет необходима лишь смена синоптической ситуации.

Выводы:

– исследования показали, что аэрозольные частицы формируют явление, названное нами «новая китайская стена», которое в значительной степени ответственно за наиболее опасные эпизоды загрязнения воздуха в плотнонаселенных регионах Китая. Сформирована принципиально новая концепция зависимости толщины пограничного слоя в городах от концентрации аэрозольных частиц в нем, согласно которой увеличение концентрации взвешенных частиц ведет к ослаблению вертикального перемешивания и, соответственно, к уменьшению толщины по-

граничного слоя. В наиболее экстремальных случаях это выглядит как достижение суперкритического уровня загрязнения, при котором неустойчивая стратификация атмосферы в нижнем слое становится устойчивой вследствие указанных выше процессов;

– кроме того, следует учитывать, что существующие региональные модели прогноза погоды плохо справляются с предсказанием погодных условий в периоды с экстремально высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха, поскольку описанный нами механизм напрямую не учитывается в таких моделях. Это в свою очередь определяет запрос на параметризацию подобных процессов в мезомасштабных моделях прогноза погоды и климата.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-17-30009 «Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий в условиях глобальных изменений климата» (2015–2017)).

T. Petaja¹, L. Jarvi², V.M. Kerminen³, A. Ding⁴, J. Sun⁵, W. Nie⁶, J. Kujansuu⁷, A. Virkkula⁸,
S. Yang⁹, C.B. Fu¹⁰, P.I. Konstantinov¹¹, S.S. Zilitinkevich¹², M. Kulmala¹³

POLLUTION AND THERMAL REGIME OF THE LOWER TROPOSPHERE: FEEDBACKS IN THE BOUNDARY LAYER

In this paper some periods of air pollution, observed in China during the recent years are analyzed. It is shown that high concentration of particulate matter (PM) minimizes the boundary layer height and leads to increasing pollutant concentrations. Critical number for concentration is 200 gm^{-3} – after it feedback between boundary layer height and concentrations became stronger.

Key words: aerosol pollution, PM2.5, urban boundary layer.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Scientific Foundation (project N 15-17-30009 «Geoinformation support of the sustainable development of territories under the global climate change (2015–2017)).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W. et al. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment // *J. Geophys. Res.* 2013. Vol. 118. P. 5380–5552.
- Chak K. Chana, Xiaohong Yao. Air pollution in mega cities in China // *Atmos. Environ.* 2008. Vol. 42. P. 1–42.
- Chen R. Kan, Chen B. et al. Association of particulate air pollution with daily mortality, the China air pollution and health effects study // *Amer. J. Epidemiol.* 2012. Vol. 175. P. 1173–1181.
- Chandran Govindaraju V.G.R., Tang C.F. The dynamic links between CO₂ emissions, economic growth and coal consumption in China and India // *Appl. Energy.* 2013. Vol. 104. P. 310–318.
- Chubarova N.E., Gorbarenko E.V., Nezval' E.I., Shilovtseva O.A. Aerosol and Radiation Characteristics of the Atmosphere during Forest and Peat Fires in 1972, 2002, and 2010 in the Region of Moscow // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics.* 2011. Vol. 47, N 6. P. 729–738.
- Ding A.J., Fu C.B., Yang X.Q. et al. Intense atmospheric pollution modifies weather: a case of mixed biomass burning with fossil fuel combustion pollution in the eastern China // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. Vol. 13. P. 105 45–10 554.
- Gao Y., Zhang M., Liu Z. et al. Modeling the feedback between aerosol and meteorological variables in the atmospheric boundary layer during a severe fog-haze event over the North China Plain // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. Vol. 15. P. 4279–4295.
- Global burden of diseases, injuries, and risk factors study. 2010 (Institute of Health Metrics & Evaluation (IHME), China. URL: <http://www.healthmetricsandevaluation.org/gbd/country-profiles> (2013) (Accessed: 25.10.2016).
- Golitsyn G.S., Grechko E.I., Wang Gengchen et al. Studying the pollution of Moscow and Beijing atmospheres with carbon monoxide and aerosol // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics.* 2015. Vol. 51, N 1. P. 8–19.
- Gorchakova I.A., Mokhov I.I., Rublev A.N. Radiation and temperature effects of the intensive injection of dust aerosol into the atmosphere // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics.* 2015. Vol. 51, N 2. P. 113–126.
- Jacobson M.Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols // *Nature.* 2001. Vol. 409. P. 695–697.
- Lei Y., Zhang Q., He K.B. et al. Primary anthropogenic aerosol emission trends for China, 1990–2005 // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. Vol. 11. P. 931–954.
- Liu H.Z., Feng J.W., Järvi L. et al. Four-year (2006–2009) eddy covariance measurements of CO₂ flux over an urban area in Beijing // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. Vol. 12. P. 7881–7892.
- Lu Z., Streets D.G., Zhang Q. et al. Sulfur dioxide emissions in China and sulphur trends in East Asia since 2000 // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. Vol. 10. P. 6311–6331.
- Mao X.Q., Zhou J., Corsetti G. How well have China's recent five-year plans been implemented for energy conservation and air pollution control? // *Environ. Sci. Technol.* 2014. Vol. 48 P. 10 036–10 044.
- ¹ University of Helsinki, Department of Physics, Professor; *e-mail:* tuukka.petaja@helsinki.fi
- ² University of Helsinki, Department of Physics, Professor; *e-mail:* leena.jarvi@helsinki.fi
- ³ University of Helsinki, Department of Physics, Professor; *e-mail:* veli-matti.kerminen@fmi.fi
- ⁴ Institute for Climate and Global Change Research & School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Professor; *e-mail:* dingaj@nju.edu.cn
- ⁵ Institute for Climate and Global Change Research & School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Professor; *e-mail:* dingaj@nju.edu.cn
- ⁶ University of Helsinki, Department of Physics; Institute for Climate and Global Change Research & School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Professor; *e-mail:* niewei@nju.edu.cn
- ⁷ University of Helsinki, Department of Physics, Professor; *e-mail:* jaana.leppalammi-kujansuu@helsinki.fi
- ⁸ Finnish Meteorological Institute, Helsinki; Institute for Climate and Global Change Research & School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Professor; *e-mail:* aki.virkkula@fmi.fi
- ⁹ Institute for Climate and Global Change Research & School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Professor; *e-mail:* yangx2@ornl.gov
- ¹⁰ Institute for Climate and Global Change Research & School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Professor; *e-mail:* cb@tea.ac.cn
- ¹¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology, Assistant Professor; *e-mail:* kostadini@mail.ru
- ¹² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography; Institute of Geography, RAS, Professor; *e-mail:* sergej.zilitinkevich@fmi.fi
- ¹³ University of Helsinki, Department of Physics, Professor; *e-mail:* markku.kulmala@helsinki.fi

- Menon S., Hansen J., Nazarenko L. et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India // *Science*. 2002. Vol. 297. P. 2250–2253.
- Nezval E. I., Chubarova N. E., Gröbner J. et al. Influence of atmospheric parameters on downward longwave radiation and Features of its regime in Moscow // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015. Vol. 51, N 1. P. 682–690.
- Nordbo A., Järvi L., Haapanala S. et al. Intra-city variation in urban morphology and turbulence structure in Helsinki, Finland // *Bound. Lay. Meteorol.* 2013. Vol. 146. P. 469–496.
- Qu W.J., Arimoto R., Zhang X.Y. et al. Spatial distribution and interannual variation of surface PM10 concentrations over eighty Chinese cities // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. Vol. 10. P. 5641–5662.
- Oke T.R. The energetic basis of the urban heat island // *Quart. J. Royal Meteor. Soc.* 1982. Vol. 108. P. 1–24.
- Piringer M., Grimmond C.S.B., Joffre S.M. et al. Investigating the surface energy balance in urban areas – recent advances and future needs // *Water, Air & Soil Pollut. Focus*. 2002. Vol. 2. P. 1–16.
- Wang M., Cao C., Li G. et al. Analysis of severe prolonged regional haze episode in the Yangtze River Delta, China // *Atmos. Environ.* 2015. Vol. 102. P. 112–121.
- Wang H., Xue M., Zhang X.Y. et al. Mesoscale modeling study of the interactions between aerosols and PBL meteorology during a haze episode in China Jing-Jin-Ji and its near surrounding region. P. 2. Aerosols' radiative feedback effects // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. Vol. 15. P. 3277–3287.
- Wood C.R., Lacser A., Barlow J.F. et al. Turbulent flow at 190 m height above London during 2006–2008: a climatology and the applicability of similarity theory // *Bound. Lay. Meteorol.* 2010. Vol. 137. P. 77–96.
- World Health Statistics: World Health Organization, Geneva, Switzerland, 2014.
- Yang F., Tan J., Zhao Q. et al. Characteristics of PM2.5 speciation in representative megacities and across China // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. Vol. 11. P. 5207–5219.
- Yuming Guo, Shanshan Li, Zhaoxing Tian et al. The burden of air pollution on years of life lost in Beijing, China, 2004–08: retrospective regression analysis of daily deaths // *BMJ*. 2013. Vol. 347. f7139.
- Zhang L., Wang T., Lv M. et al. On the severe haze in Beijing during January 2013: Unraveling effects of meteorological anomalies with WRF-Chem // *Atmos. Environ.* 2015. Vol. 104. P. 11–21.
- Zhao B., Wang S.X., Liu H. et al. NO_x emissions in China: historical trends and future perspectives // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. Vol. 13. P. 9869–9897.
- Zilitinkevich S.S. National security and human health implications of climate change. NATO science for peace and security series C: Environmental security. Cha P. 13. Springer, 2012. P. 147–161.

Поступила в редакцию 08.04.2016
Принята к публикации 02.06.2016

Received 08. 04.2016
Accepted 02. 06.2016