

УДК 551.584

© С. С. Зилитинкевич<sup>1–5</sup>, К. Кулмала<sup>1</sup>, А. А. Бакланов<sup>6</sup>, И. Н. Эзау<sup>7</sup>, С. А. Тюряков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Хельсинкский университет, Финляндия

<sup>2</sup>Финский метеорологический институт, Финляндия

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Россия

<sup>4</sup>Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Россия

<sup>5</sup>Институт географии Российской академии наук, Россия

<sup>6</sup>Всемирная метеорологическая организация, департамент научных исследований, Швейцария

<sup>7</sup>Центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Ф. Нансена, Норвегия  
sergej.zilitinkevich@fmi.fi

## МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ «ПЕРСОНАЛЬНОЙ» ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Современное технологическое развитие и глобальная урбанизация в сочетании с изменением климата и загрязнением воздуха, водоемов и почв резко повышает чувствительность к состоянию окружающей среды большинства сфер жизни, включая транспорт, энергетический сектор, сельское хозяйство. Современному человеку требуется все более детальное знание о его «персональной» среде обитания: климате, погоде и качестве воздуха на рабочем месте, дома, на улице, на приусадебном участке, на сельскохозяйственном поле и т. п. С позиций науки «персональная» окружающая среда человека — это планетарный пограничный слой (ППС) — нижний турбулентный слой атмосферы, непосредственно взаимодействующий с подстилающей земной или водной поверхностью и ограниченный сверху слаботурбулентной свободной атмосферой. Характеристики ППС в значительной степени определяются свойствами почв, растительности, поверхностных вод и сооружений. Настало время применить на практике новейшие достижения в понимании природы ППС, турбулентности, атмосферной химии и взаимодействий в системе аэрозоль–облачность–климат, что позволит кардинально улучшить архитектуру системы наблюдения за погодой и качеством воздуха, включая краудсорсинг; моделирование и прогнозирование погоды и качества воздуха со сверхвысоким разрешением. Мы ожидаем, что уже в ближайшем будущем данные традиционного метеорологического мониторинга, выполняющегося национальными службами погоды, будут все в большей степени дополняться данными, поступающими от физических лиц, метеозависимых предприятий (транспортного, энергетического и аграрного секторов) и других заинтересованных организаций (например, школ). Угроза катастрофического загрязнения воздуха в мегаполисах создает очевидную мотивацию для частных наблюдений, а значит и спроса на недорогие приборы для измерений, прежде всего, качества воздуха и на улице, и внутри помещений. Этот процесс уже идет, и важно гармонизировать его с вездущимися разработками в области атмосферных наук, технологий наблюдений и управления качеством окружающей среды.

**Ключевые слова:** изменение климата, качество воздуха, качество жизни, микроклимат, персональная окружающая среда, планетарный пограничный слой, урбанизация.

S. S. Zilitinkevich<sup>1–5</sup>, M. Kulmala<sup>1</sup>, A. A. Baklanov<sup>6</sup>, I. N. Esau<sup>7</sup>, S. A. Tyuryakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Helsinki, Finland

<sup>2</sup>Finnish Meteorological Institute, Finland

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, Russia

<sup>4</sup>Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Russia

<sup>5</sup>Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Russia

<sup>6</sup>World Meteorological Organization, Research Department, Switzerland

<sup>7</sup>Nansen Environmental and Remote Sensing Centre, Norway

## MONITORING AND FORECASTING OF PERSONAL ENVIRONMENT

In view of ongoing industrial development, urbanisation, deterioration of environment and climate change, individuals, organisations and businesses are becoming more and more meteorologically/environmentally vulnerable. Modern life requires knowledge about our personal environment: climate, weather and air/water/soil quality at home or work, outdoors, in a garden or field, etc. From the scientific standpoint, personal environment is the lower essentially turbulent

*Зилитинкевич С. С., Кулмала М., Бакланов А. А., Эзау И. Н., Тюряков С. А.* Мониторинг и прогноз «персональной» окружающей среды // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016. Т. 9, № 1. С. 93—97.

*Zilitinkevich S. S., Kulmala M., Baklanov A. A., Esau I. N., Tyuryakov S. A.* Monitoring and forecasting of personal environment. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2016, 9, 1, 93—97.

atmospheric planetary boundary layer (PBL) — immediately affected by interactions with underlying land/water surfaces, separated from the free atmosphere by the low-turbulence interface, and controlled by the properties of underlying soils, buildings, vegetation and surface waters. The time is ripe to employ recent achievements in understanding the nature of atmospheric PBL, turbulence, chemistry and aerosols, so that to radically improve general architecture of meteorological and air quality observations, including those provided from crowdsourcing; very high resolution meteorological and air-quality modelling and forecasting. In the near future traditional top-down meteorological monitoring by national weather services will be ever more supplemented through private bottom-up monitoring by individuals, meteorologically dependent businesses (such as transport, agriculture, energy sector, etc.) and volunteer organisations (e.g., schools). Heavily polluted megacities are disposed for establishing massive private environmental monitoring, and provide an increasing market for inexpensive instruments, e.g., indicators of outdoor and indoor air quality. This process is already on track. It is important to harmonise it with current developments in atmospheric science, industry of observations, and environmental management.

**Key words:** air quality, climate change, microclimate, personal environment, planetary boundary layer, quality of life, urbanisation.

Современное технологическое развитие и глобальная урбанизация в сочетании с изменением климата и загрязнением воздуха, водоемов и почв резко повышает чувствительность к состоянию окружающей среды большинства сфер жизни, включая транспорт, энергетический сектор, сельское хозяйство и т. д., не говоря уже о комфорте и здоровье людей — в особенности, жителей больших городов. Современному человеку требуется все более детальное знание о его «персональной» среде обитания: климате, погоде и качестве воздуха на рабочем месте, дома, на улице, на приусадебном участке, на сельскохозяйственном поле, в аэропорту, вдоль магистрали автомобильного, железнодорожного или водного транспорта.

Локальные черты микроклимата и погоды, как физической, так и химической, контролируются процессами в атмосферном планетарном пограничном слое (ППС), непосредственно взаимодействующем с подстилающей земной или водной поверхностью и, как правило, сильно турбулентном, в отличие от слаботурбулентной свободной атмосферы. Свойства ППС в значительной степени определяются городской застройкой, растительностью, почвами, водоемами и т. д. Именно поэтому при сложном рельефе или пересеченном характере местности, прежде всего, в больших городах локальная погода и климат могут резко различаться уже на расстояниях в несколько сотен метров. Качество воздуха может быть различным на соседних улицах (рис. 1).

В настоящее время гидрометеорологические службы осуществляют оперативный прогноз погоды и климатическое обслуживание, как правило, с горизонтальным разрешением в несколько километров.

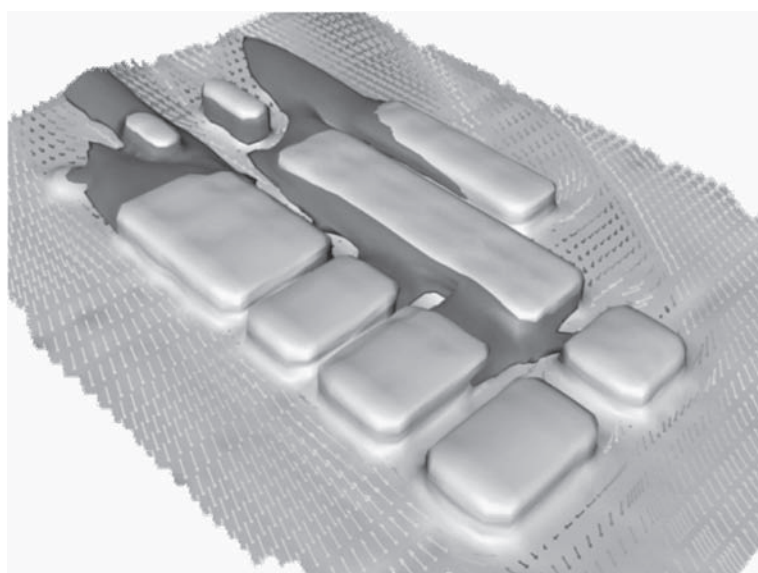


Рис. 1. Неоднородность загрязнения воздуха (темный цвет) на примере городских каньонов в Копенгагене (по результатам высокоразрешающего моделирования из проекта MEGAPOLI).

При этом взаимодействия между ППС и подстилающей поверхностью характеризуются значениями турбулентных потоков энергии, вещества и количества движения, осредненными по ячейкам расчетной сетки, то есть сглаженными по площади в десятков и более квадратных километров. Вертикальное разрешение нижнего слоя атмосферы все еще недостаточно для уверенного определения верхней границы ППС. Особенности «персональной» окружающей среды с масштабами в сотни метров, связанные с конкретными источниками загрязняющих веществ и конкретными чертами природного или городского ландшафта, остаются неразрешенными. Это серьезнейшая проблема: загрязнение воздуха, особенно в мегаполисах, изменчиво, причем локальные максимумы загрязнения могут превышать его прогнозируемый средний уровень в десятки и сотни раз. Именно локальные, даже кратковременные, максимумы загрязнений наиболее опасны для здоровья людей [1]. По современным оценкам загрязнение воздуха в больших городах ежегодно приводит к преждевременной смерти более 3 млн человек. Помимо непосредственного воздействия на качество жизни и здоровье людей, загрязнение воздуха приводит к негативным изменениям климата [2, 3].

До недавнего времени проблема, о которой идет речь, решалась постепенно, шаг за шагом, путем улучшения пространственного разрешения мониторинга и прогноза окружающей среды. Это дорогостоящий и медленный путь. Более того, движение по этому пути встречает и непредвиденные трудности. Разрешение атмосферной модели с шагом сетки менее 1 км нередко приводит вместо ожидаемого повышения качества моделирования к его ухудшению — вследствие развития в модели паразитарных движений, напоминающих реальные самоорганизующиеся структуры в конвективных ППС, но выходящих далеко за пределы реальных ППС. Причина — в неадекватном описании турбулентности в свободной атмосфере, которое влечет за собой завышение уровня турбулентности, высоты ППС и интенсивности обмена между ППС и свободной атмосферой. В последние годы установлено, что перенос тепла при очень сильно стратифицированной турбулентности на один-два порядка слабее, чем перенос количества движения [4]. Именно по этой причине суточные колебания температуры наблюдаются в ППС, но не за его пределами, загрязняющие вещества от наземных источников могут удерживаться в ППС в течение многих часов (рис. 2), а реальные самоорганизующиеся структуры не выходят за пределы ППС [5].

В настоящее время назрела необходимость, и одновременно открываются реальные возможности объединить новое понимание турбулентности, природы ППС, химических процессов в атмосфере и взаимодействий в системе аэрозоль-облачность-климат с новым подходом к мониторингу и прогнозу состояния окружающей среды. Центр тяжести мониторинга переносится на «персональные» наблюдения, позволяющие достичь разрешения, необходимого конкретному заказчику для конкретного места; а задача о локальном прогнозе с практически любым разрешением решается путем коррекции результатов стандартного прогноза по данным совокупности «персональных» наблюдений. При этом заказчик, покупая и размещая приборы для измерения нужных ему параметров, становится одним из «персональных наблюдателей», т. е. активным участником производства нужной ему информации [6, 7]. Математический аппарат коррекции, основанный на современной теории физических и химических процессов в ППС, учитывает предысторию отклонений реальных наблюдаемых характеристик от усредненных характеристик, поставляемых в рамках стандартных технологий прогноза погоды [8]. Таким образом, сервисы, которые предстоит развить, должны быть основаны на интеграции двух информационных потоков: а) от служб погоды — о сглаженной крупномасштабной картине состояния окружающей среды и б) от совокупности частных «персональных наблюдателей», включая самого клиента — об интересующих его конкретных особенностях окружающей среды с необходимой ему степенью детализации.

Есть все основания ожидать, что в ближайшем будущем централизованный (сверху вниз) метеорологический мониторинг силами служб погоды, будет в нарастающей степени дополняться саморазвивающимся (снизу вверх) мониторингом силами «персональных наблюдателей»: предприятий транспортного, энергетического и аграрного секторов; школ, природоохранных организаций; жилищных товариществ, отдельных домовладельцев, и метеорологически зависимых индивидуумов. Эта перспектива ставит новые задачи и одновременно открывает новые возможности в следующих сферах:

- науках об окружающей среде и высшем образовании в этой области,
- производстве и продаже метеорологических и других приборов для регистрации состояния окружающей среды,

- метеорологическом и климатическом обслуживании,
- технологиях мониторинга, прогноза и управления городской средой.

Население и муниципалитеты современных мегаполисов испытывают обоснованную тревогу в связи с загрязнением окружающей среды и изменениями климата и образуют растущий потенциал спроса на приборы и сервисы для измерения и прогноза ее показателей — прежде всего, качества воздуха как на улице, так и внутри помещений. Задача ближайшего будущего — гармонизировать производство и продажу подобных приборов с важнейшими инновациями в области атмосферных наук и наблюдательных технологий.

Необходим диалог между учеными и заинтересованными компаниями на рынке профессиональных и потребительских метеорологических и климатических сервисов и приборов, с тем чтобы расширить спектр сервисов и повысить до профессионального уровня качество данных, поступающих от «персональных наблюдателей».

Необходимо междисциплинарное и межсекторное сотрудничество между наукой об окружающей среде, высшим образованием, индустрией метеорологических наблюдений и природоохранной деятельностью с особым вниманием к проблемам мониторинга и прогноза экстремальных и опасных явлений погоды, локальных экстремумов загрязнения и локальных проявлений изменений климата. Эта мысль уже высказана в призыве Всемирной метеорологической организации к созданию «комплексных погодных, экологических и климатических сервисов для городской среды» [9].

Платформой для обсуждения и разрешения назревших проблем мониторинга и прогноза окружающей среды, в том числе «персональной», может служить междисциплинарная программа «Паневразийский эксперимент» (РЕЕХ), инициированная в 2012 г. группой ученых из Финляндии и России и включающая к настоящему моменту около сотни университетов и научных центров из 20 стран Западной Европы, России и Китая [10, 11]. В числе главных практических приложений программы РЕЕХ — планирование новых городских агломераций, таких как «Большая Москва», с учетом обратных связей между мегаполисом, климатом и качеством окружающей среды в диапазоне масштабов от «персональной» среды обитания отдельного человека до мегаполиса в целом.

Первые шаги по техническому воплощению идеи о «персональной» окружающей среде, сделанные под эгидой РЕЕХ в проекте Финского метеорологического института «Комплексная система мониторинга и прогнозирования локальной погоды и микроклимата» (FP7 ERC PoCGrant 632295, 2014—2015), привели к осознанию недостаточности общего уровня знаний в области локальных влияний погоды, качества воздуха и климата на экономику и общество. В результате, Хельсинкский университет предложил и возглавил международный проект (Erasmus + CBHE Grant 561975, 2015—2018) по созданию адаптивной образовательной среды для повышения компетентности в этих вопросах самой широкой целевой аудитории — от руководителей метеозависимых компаний и департаментов городского хозяйства, до студентов отраслевых вузов и частных граждан.

Намеченные в статье пути развития систем мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды основываются на результатах исследований, выполненных под руководством Маркку Кулмала, Сергея Зилитинкевича и Александра Бакланова в проектах Европейской Комиссии: FP5 EVK4-CT-2002-00097FUMAPEX «Комплексные системы для прогнозирования городской погоды, качества воздуха и их воздействий на население» (Датский метеорологический институт, 2002—2005, <http://fumapex.dmi.dk>), FP6 036833-2 EUCAARI «Комплексный проект по изучению взаимодействий аэрозолей, облаков, климата и качества воздуха» (Хельсинкский университет, 2007—2010, <http://www.atm.helsinki.fi/eucaari/>), FP7 227463 ATMNUCLE «Атмосферная нуклеация: от молекулярного до глобального масштабов» (Хельсинкский университет, 2009-2013, <http://www.atm.helsinki.fi/m/atmnucle/>), FP7 227915 PBL-PMES «Атмосферные планетарные пограничные слои: физика, моделирование и роль в геосистеме» (Финский метеорологический институт, 2009—2013, <http://pbl-pmes.fmi.fi/>), FP7 212520 MEGAPOLI «Мегагорода: эмиссии, городское, региональное и глобальное загрязнение атмосферы и климатические эффекты, а также комплексные инструменты для их оценки и смягчения последствий» (Датский метеорологический институт, 2009—2011, <http://megapoli.info>); Академии Финляндии: Центр передового опыта в области атмосферных наук «От молекулярных и биологических процессов к глобальному климату» (Хельсинкский университет, 2014—2016, <http://www.atm.helsinki.fi/FCoE/>), Грант 280700 АВВА «Взаимодействие атмосферы и гидросферы в Балтийском и Арктическом бассейнах» (Финский метеорологический институт, 2014—2017); и Правительства РФ: Мегагрант 11.G34.31.0048



«Взаимодействие атмосферы, гидросферы и поверхности суши: физические механизмы, методы мониторинга и контроля планетарных пограничных слоев и качества окружающей среды» (Нижегородский государственный университет, 2011—2015, <http://planetlab.unn.ru/>).

### Литература

1. *Searl A.* A review of the acute and long term impacts of exposure to nitrogen dioxide in the United Kingdom. Research Report TM/04/03, Institute of Occupational Medicine, UK. 2004
2. *Arneth A., Unger N., Kulmala M., Andreae M.O.* Perspectives: Clean the air, heat the planet? // *Science*. 2009. 326. P. 672—673.
3. *Kulmala M.* et al. General overview: European Integrated project on Aerosol Cloud Climate and Air Quality interactions (EUCAARI) — integrating aerosol research from nano to global scales // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. 11. P. 13061—13143.
4. *Zilitinkevich S. S., Elperin T., Kleerorin N., Rogachevskii I., Esau I. N.* A hierarchy of energy- and flux-budget (EFB) turbulence closure models for stably stratified geophysical flows // *Boundary-Layer Meteorol.* 2013. 146. P. 341—373.
5. *Zilitinkevich S. S., Hunt J.C.R., Grachev A. A., Esau I. N., Lalas D. P., Akylas E., Tombrou M., Fairall C. W., Fernando H.J.S., Baklanov A., Joffre S. M.* The influence of large convective eddies on the surface layer turbulence // *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 2006. 132. P. 1423—1456.
6. *Zilitinkevich S., Kulmala M., Esau I., Baklanov A.* Megacities — refining models to personal environment // *WMO Bulletin*. 2015. 64 (1). P. 20—22.
7. *Muller C., Chapman L., Johnston S., Kidd C., Illingworth S., Foody G., Overeem A., Leigh R.* Crowd sourcing for climate and atmospheric sciences: current status and future potential // *Int. J. Climatol.* 2015. 35. P. 3185—3203.
8. *Baklanov A., Grimmond S., Mahura A., Athanassiadou M.* Meteorological and Air Quality Models for Urban Areas. Springer, 2009. 184 p.
9. *Grimmond S., Xu T., Baklanov A.* Towards integrated urban weather, environment and climate services // *WMO Bulletin*. 2014. 63 (1). P. 10—14.
10. *Lappalainen H. K., Petäjä T., Kujansuu J., Kerminen V.-M., Shvidenko A., Bäck J., Vesala T., Vihma T., de Leeuw G., Lauri A., Ruuskanen T., Lapshin V. B., Zaitseva N., Glezer O., Arshinov M., Spracklen D. V., Arnold S. R., Juhola S., Lihavainen H., Viisanen Y., Chubarova N., Chalov S., Filatov N., Skorokhod A., Elansky N., Dyukarev E., Esau I., Hari P., Kotlyakov V., Kasimov N., Bondur V., Matvienko G., Baklanov A., Mareev E., Troitskaya Y., Ding A., Guo H., Zilitinkevich S., Kulmala M.* Pan-Eurasian Experiment (PEEX) — a research initiative meeting the grand challenges of the changing environment of the northern Pan-Eurasian Arctic-boreal areas // *Geography, Environment and Sustainability*. 2014. V. 7, N 2, P. 13—48.
11. Pan-Eurasian Experiment (PEEX) [Официальный сайт]. URL: <http://www.atm.helsinki.fi/peex/> (дата обращения: 12.10.2015).

Статья поступила в редакцию 23.10.2015 г.

К статье Романенков Д.А. и др. «Изменчивость фронтальных разделов...»

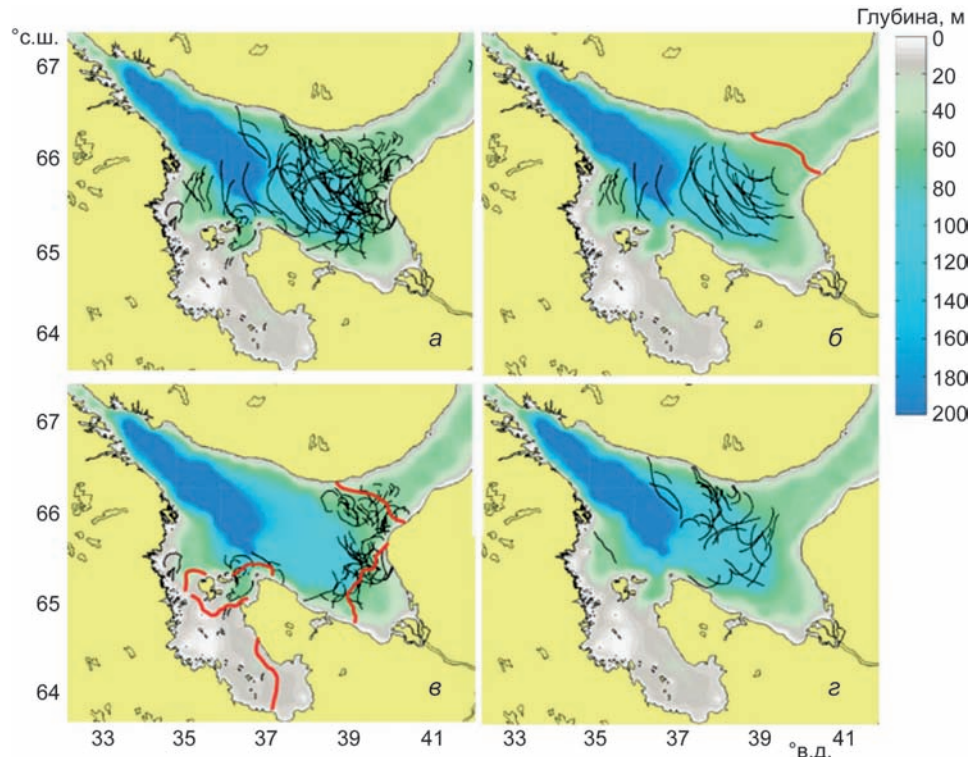


Рис. 9. Проявления короткопериодных внутренних волн по РЛ данным 2010 г. Показаны позиции гребней лидирующих волн в пакетах: *а* — все данные; *б* — регулярные волновые пакеты из Горла; *в* — фронтальные волновые пакеты; *г* — нерегулярные волны. Красная линия — положения фронтальных линий (в среднем за сезон).

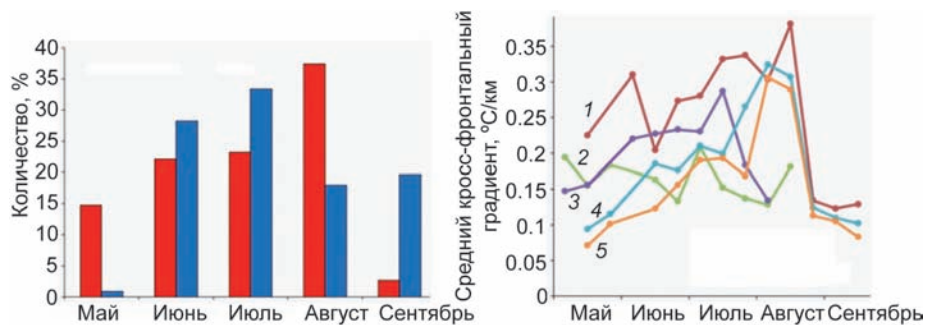


Рис. 10. Сезонный ход поверхностных проявлений вихрей, короткопериодных внутренних волн и градиентов ТПМ на фронтах в Белом море по спутниковым данным 2010 г. *а* — относительное количество вихрей и волн (красный столбик — внутренние волны, синий — вихри); *б* — средний кросс-фронтальный градиент ТПМ по декадным оценкам (фронты: 1 — горловский, 2 — двинский, 3 — онежский, 4 — соловецкий северный, 5 — соловецкий южный).

К статье Зилитинкевич С.С. и др. «Мониторинг и прогноз...»



Рис. 2. Тонкий слой загрязненного воздуха над Москвой утром 19.03.2015, вид с 18 этажа главного здания МГУ (фото С. А. Добролюбова).