

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКЕ

СКОБЕЛЕВА Е.А., АБРАМОВ А.В., ПИЛИПЕНКО О.В.,
ПЧЕЛЕНОК О.А., РОДИЧЕВА М.В.

Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, г. Орел, Россия

Аннотация. В рамках концепции устойчивого развития городов решается задача прогнозирования параметров воздушной среды и проводится оценка влияния процессов, протекающих на урбанизированных территориях на атмосферу. Показано, что в числе основных методов решения этой задачи – создание и развитие информационных систем мониторинга, прогнозирования и оповещения о состоянии воздушной среды. Установлено, что наиболее активно развиваются комплексные информационные системы, позволяющие рассматривать физико-химические процессы на достаточно больших пространственных масштабах, а также прогнозировать состояние воздушной среды города в целом. Возможности использования этих систем для исследования процессов в относительно небольших объемах воздуха ограничены.

Авторами предложена принципиальная схема локальной информационной системы прогнозирования динамики воздушной среды. Приведен алгоритм реализации предложенного подхода. Подробно рассмотрены результаты разработки измерительного компонента локальной информационной системы. Представлены результаты измерения динамики концентрации угарного газа, оксида азота 4, сернистого ангидрида в атмосферном воздухе жилой застройки, прилегающей к территории Орловской ТЭЦ в течение дня. Показано, что динамика концентрации загрязняющих веществ в воздухе в течение дня, полученная экспериментально, соответствует современным теоретическим представлениям о характере распространения рассмотренных загрязняющих веществ в воздухе. На основе полученных результатов был сделан вывод об адекватности разработанного измерительного компонента локальной информационной системы прогнозирования динамики воздушной среды.

Ключевые слова: информационная система мониторинга, прогнозирования и оповещения о состоянии воздушной среды, численная модель, измерение, физическое поле в воздухе.

PREDICTING THE DYNAMICS OF THE AIR ENVIRONMENT IN URBAN AREAS

SKOBELEVA E.A., ABRAMOV A.V., PILIPENKO O.V.,
PCHELENOK O.A., RODICHEVA M.V.

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia

Abstracts. Within the framework of the concept of sustainable urban development, the problem of forecasting the parameters of the air environment is being solved and the impact of the processes occurring in urban areas on the atmosphere is assessed. It is shown that among the main methods for solving this problem is the creation and development of information systems for monitoring, forecasting and warning about the state of the air environment. It has been established that complex information systems are developing most actively, allowing one to consider physical and chemical processes on a fairly large spatial scale, as well as to predict the state of the air environment of the city as a whole. The possibilities of using these systems to study processes in relatively small amounts of air are limited.

The authors proposed a schematic diagram of a local information system for predicting the dynamics of the air environment. An algorithm for the implementation of the proposed approach. The results of the development of the measuring component of the local information system are considered in detail. The results of measuring the dynamics of the concentration of carbon monoxide, nitric oxide 4, and sulfur dioxide in the ambient air of residential buildings adjacent to the territory of the Oryol CHP during the day are presented. It is shown that the dynamics of the concentration of pollutants in the air during the day, obtained experimentally, corresponds to modern theoretical ideas about the nature of the distribution of the pollutants in the air. On the basis of the obtained results, it was concluded that the de-

veloped measuring component of the local information system for forecasting the dynamics of the air environment was adequate.

Keywords: *information system for monitoring, forecasting and warning about the state of the air environment, numerical model, measurement, physical field in the air.*

Современные мегаполисы являются центрами науки, культуры, общественной жизни и достаточно интенсивно развиваются. Не смотря на попытки формирования концепции устойчивого развития городов, процессы их становления протекают хаотично и нередко связаны с обострением экологических проблем. К числу основных опасностей, формирующихся в больших городах сегодня можно отнести изменение параметров воздушной среды под действием избыточных выделений тепла, загрязняющих веществ, нарушения естественных потоков с внешней средой.

В настоящее время проблему прогнозирования состояния воздушной среды в городах предлагается решать за счет комплексных информационных систем мониторинга, прогнозирования и оповещения о состоянии воздушной среды на урбанизированных территориях. Такие системы как «Urban Weather», «Environmentata», «Climate Services» уже внедрены в Болонье, Валенсии, Копенгагене, Хельсинки, Осло и др. [2].

Элементами комплексных систем являются: сети наблюдения, прогнозирования, предупреждения интегрируются в коммунальную инфраструктуру и позволяют прогнозировать последствия от изменения микроклиматического режима, или сокращения выбросов (рис. 1).

Они позволяют отслеживать показатели физико-химических процессов, определяющих состояние воздушной среды в текущий момент времени. Исходя из этих результатов формируются предсказания будущего состояния воздушной среды в определенных временных интервалах и при возможном формировании опасных состояний осуществляют оповещение населения, проживающего в потенциально опасной зоне.

Дальнейшее развитие теоретических основ построения информационных систем, а также решение прикладных научных задач с их помощью проводится А. Баклановым, G. Beig, T. Butter, M. Lawrence в рамках комплексных проектов GURME, HIVFUMAPEX и т.д. [1, 3, 4, 5, 11].

Эти комплексные информационные системы без сомнения являются мощными инструментами прогнозирования динамики физических полей в воздухе больших городов. Однако их применение ограничено при решении задач, связанных с исследованием относительно небольших объемов воздуха, в частности таких задач как:

1. Исследование процессов переноса атмосферных потоков и рассеивания загрязняющих веществ в городских кварталах.
2. Исследование влияния растительности и, в более широком смысле, интегральной степени черноты поверхностей в городской среде на процессы переноса тепла в городской среде.

В то же время, как показывают исследования Т.М. Butler, эти задачи являются важными при научном обосновании жилой застройки [3]. Например, важной прикладной задачей современной теории тепломассообмена применительно к жилой застройке является изучение выраженных тепловых зон («strong urban heat islands») [1, 2].

Эта и подобная ей задачи могут быть решены с помощью локальных информационных систем, функционал которых составляют измерительные и прогностические компоненты. Например, развиваемая авторами локальная информационная система прогнозирования динамики воздушной среды (рис. 2) подразумевает реализацию следующих этапов:

- конфигурирование измерительного комплекса исходя из задач прогнозирования, сбор исходных экспериментальных данных;
- формирование начальных и граничных условий в прогностической модели исходя из целей исследования и экспериментальных результатов;

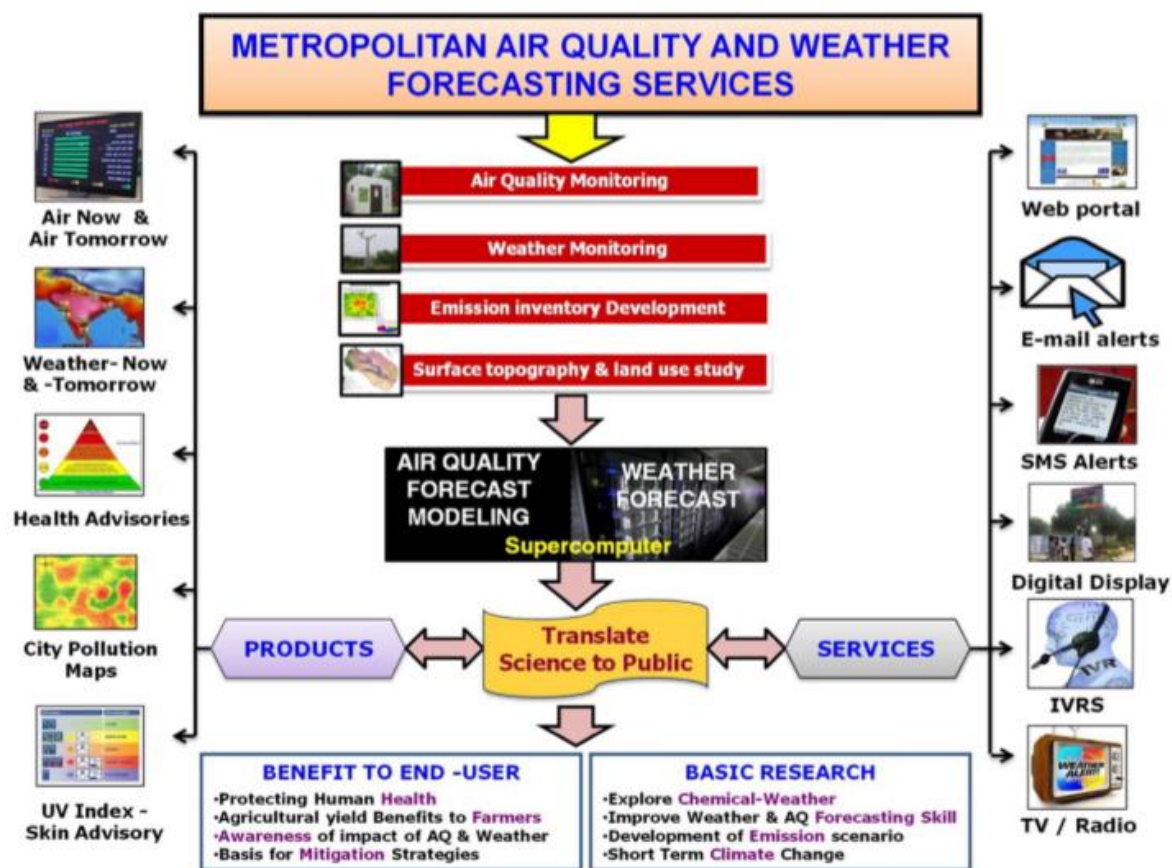


Рисунок 1 – Комплексная информационная система мониторинга, прогнозирования и оповещения о состоянии воздушной среды на урбанизированных территориях

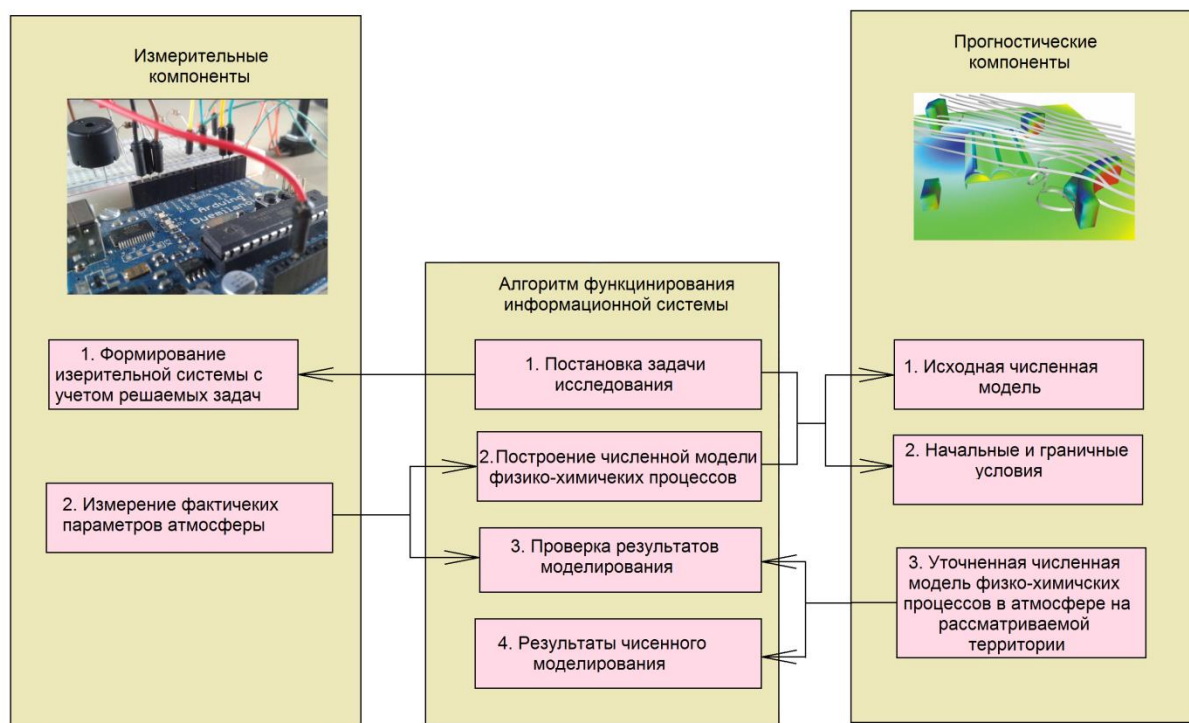


Рисунок 2 – Локальная информационная система прогнозирования динамики воздушной среды

- численное решение прогностической модели для ограниченного количества проверочных решений, сопоставление вычисленных результатов с измерениями; вывод об адекватности (неадекватности) модели;
- уточнение начальных и граничных условий в неадекватных моделях, повторная проверка;
- получение комплекса численных решений в виде распределения температуры, концентрации различных веществ и других физических полей на адекватной численной модели;
- проведение анализа вычислительных результатов исходя из задач исследования.

Измерительный компонент системы реализован на основе автоматизированной платформы Arduino и комплексного программного обеспечения (рисунок 3).

Конфигурация измерительного компонента проводится за счет подключения заданного числа сенсоров и первичных преобразователей к платформе Arduino, а также загрузки в микроконтроллер программы, написанной в специализированной IDE-среде. Под управлением этой программы платформа осуществляет опрос всех подключенных к ней преобразователей и формирование блоков измерений согласно программно определенному алгоритму.

Эти блоки могут передаваться компьютеру через USB порт или накапливать в память системы. Для обработки блоков данных, поступающих в порт ПЭВМ в среде LabView разработано программное обеспечение сбора первичных экспериментальных данных. Программа принимает исходные данные, осуществляет их обработку, в зависимости от целей исследования и формирует базу данных, для чего взаимодействует с системой управления базой данных SQLiteStudio.

Таким образом, измерительный компонент обеспечивает возможность измерения любой комбинации параметров окружающей среды и формирования таблиц с исходными и обработанными данными.

Прогностический компонент локальной информационной системы прогнозирования динамики воздушной среды основан на математическом моделировании физико-химических процессов в атмосфере. Получаемая в итоге динамика физических полей, иллюстрирует направление и развитие рассматриваемого процесса.

Этапы математического моделирования представлены на рис. 4 на примере анализа выраженной тепловой зоны, формируемой на оживленном проспекте одного из больших городов Российской Федерации.

На первом этапе моделирования разрабатывается исходная численная модель, представленная расчетной геометрией.

Расчетная геометрия может быть сформирована в двух или трехмерном пространстве. Как показывает практика, многие тепловые процессы могут быть рассмотрены на двухмерных срезах без потери сути физического процесса. Это позволяет не только облегчить процесс построения численной модели, но и сэкономить вычислительный ресурс, что очень важно при реализации расчетов по методу конечных элементов.

Далее, используя результаты предварительных экспериментальных исследований, накладываются начальные и граничные условия задачи. На четвертом этапе формируется сетка конечных элементов, пятый этап связан с получением результатов вычисления.

В настоящий момент авторами разрабатываются отдельные компоненты информационной системы прогнозирования динамики воздушной среды в городской застройке. Собирается элемент измерения концентрации угарного газа (CO), оксида азота 4 (NO₂), сернистого ангидрида (SO₂) в воздухе. В его основу положена схема, представленная на рисунке 3, для чего к платформе Arduino подключены блоки: MG-811, MiCS-2714, 2SH12 (рис. 5), согласно стандартным схемам [15].

Для проверки эффективности блока проведены измерения качества воздуха на территории жилого района вблизи тепловой электроцентрали (Орловская ТЭЦ) на оживленном перекрестке, территорий многоэтажной и малоэтажной застройки; дошкольного и среднего образовательных учреждений. Результаты измерений представлены на рис. 6 – 8.

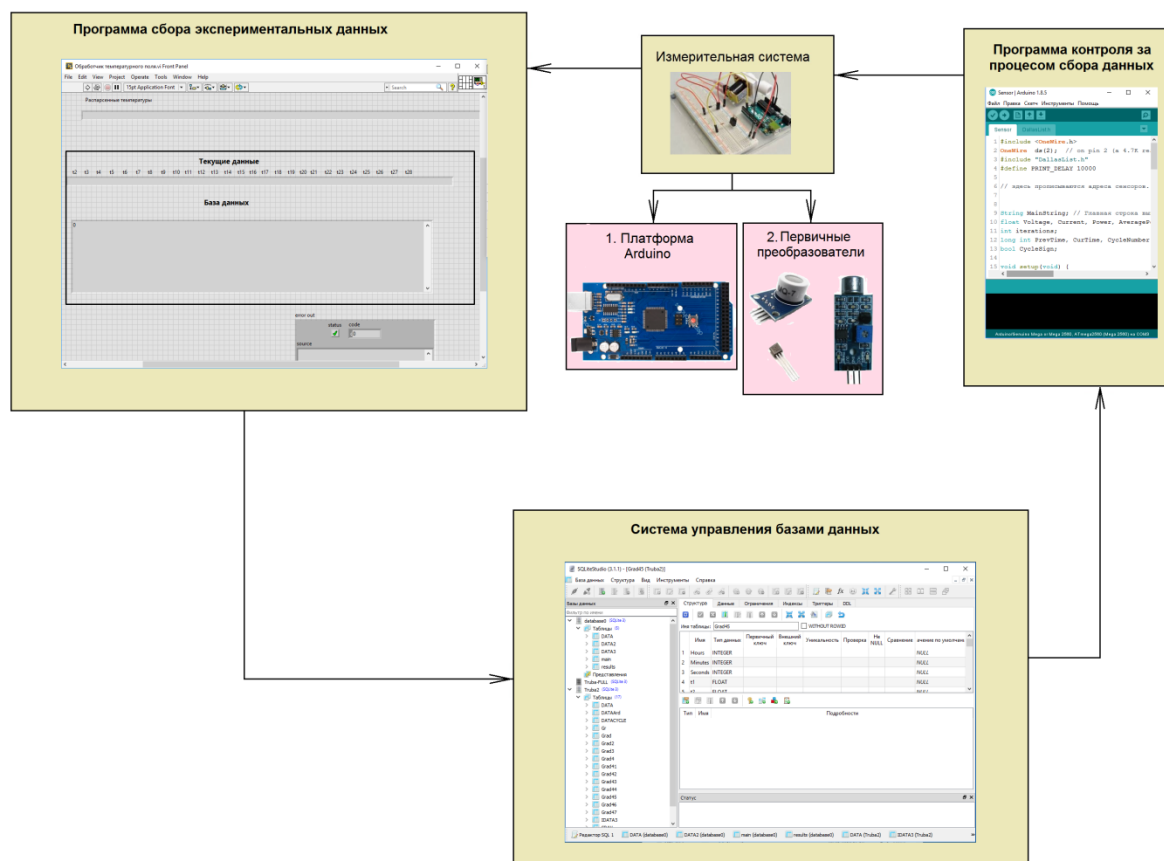


Рисунок 3 – Структура измерительного компонента локальной информационной системы прогнозирования динамики воздушной среды

Как видно, максимальные значения концентрации угарного газа наблюдаются в утренние часы (рис. 6), что объясняется усилением гравитационного компонента скорости оседания выбросов дымовых труб при более интенсивном охлаждении в ночные часы. Наблюдаемая динамика процесса соответствует качественной характеристике, представленной в Приказ Министерства Природных ресурсов и экологии РФ №273, а количественные изменения концентрации во времени соответствуют данным G. Brunet, van der Gon [9, 10, 12, 14].

На территории, прилегающей к оживленному перекрестку, динамика концентрации угарного газа связана с изменением транспортных потоков. Максимальные концентрации СО регистрируются до 12-00 часов и в период 18-00 ÷ 20-00 часов. Первый локальный максимум более выражен, что связано с суточными колебаниями ветровой активности [8]. Динамика концентрации угарного газа на территории промышленного предприятия связана с особенностями производственного режима, а также суточными колебаниями ветровой активности. Полученные результаты соответствуют требованиям ($ПДК_{\max}=5 \text{ мг/м}^3$; $ПДК_{\text{ср}}=3 \text{ мг/м}^3$).

Динамика концентрации NO_2 и SO_2 (рис. 7, 8) связана с изменением транспортных потоков, а также процессов перемещения воздушных масс, что соответствует существующим представлениям [6, 7]. На территории оживленного перекрестка ход концентрации NO_2 аналогичен рассмотренному ранее. Различие состоит в том, что второй локальный максимум более выражен.

Динамика NO_2 и SO_2 в остальных точках связана с особенностями миграции вредных веществ по территории жилой застройки. Основными механизмами переноса выступают молярная и молекулярная диффузия [13]. Причем первый механизм является преобладающим. За счет тепловыделений автомобильных потоков над дорогой формируется восходящий воздушный поток, который вовлекает NO_2 и SO_2 , выделяющиеся при неполном сгорании топлива. По мере удаления от дороги воздушный поток охлаждается и опускается вниз, вызывая осажде-

ние вредных веществ. При достаточной протяженности автомобильной дороги на ней могут формироваться горизонтальные воздушные течения, которые вызывают повышение давления воздуха между зданиями и проникновение насыщенных вредными веществами воздушных масс в жилую застройку.

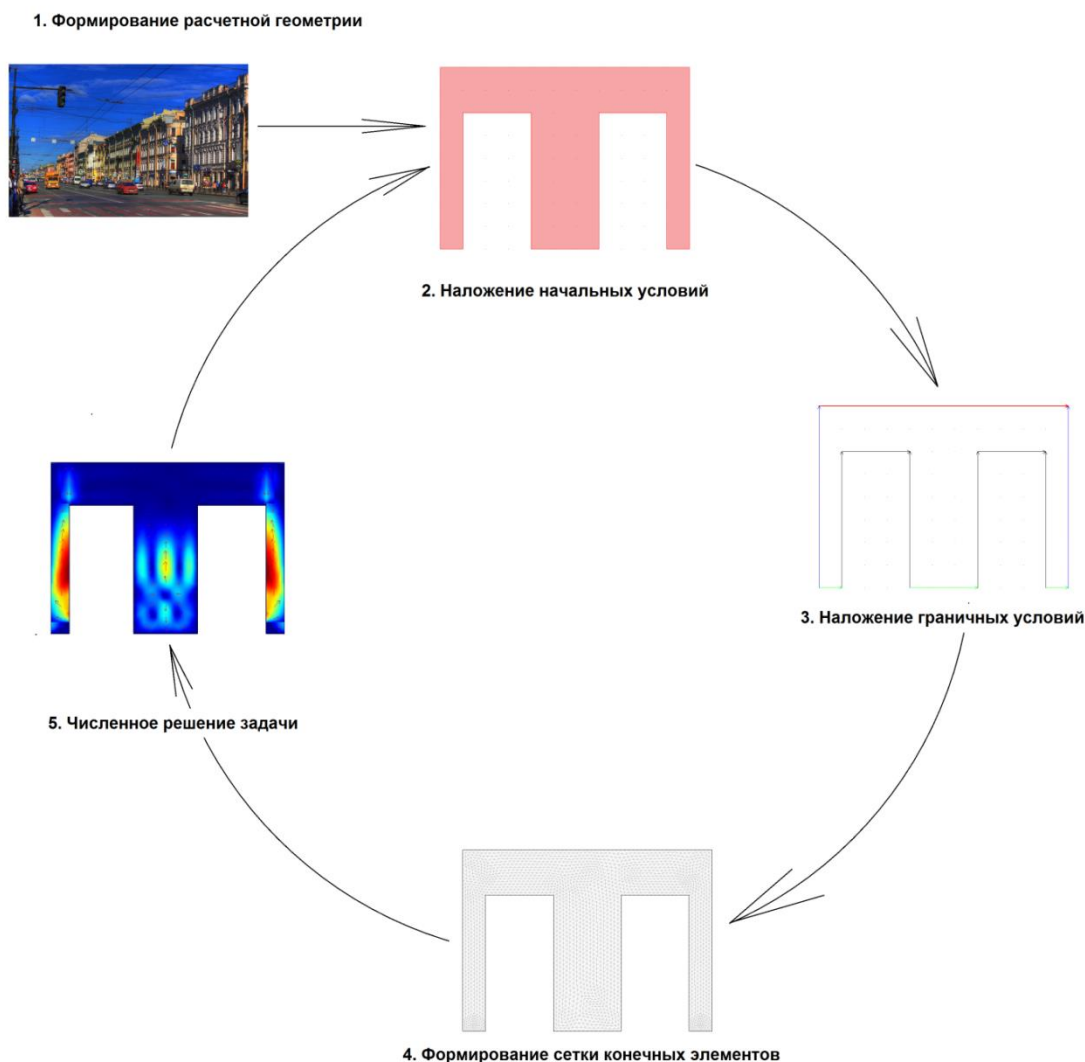


Рисунок 4 – Этапы прогностического моделирования

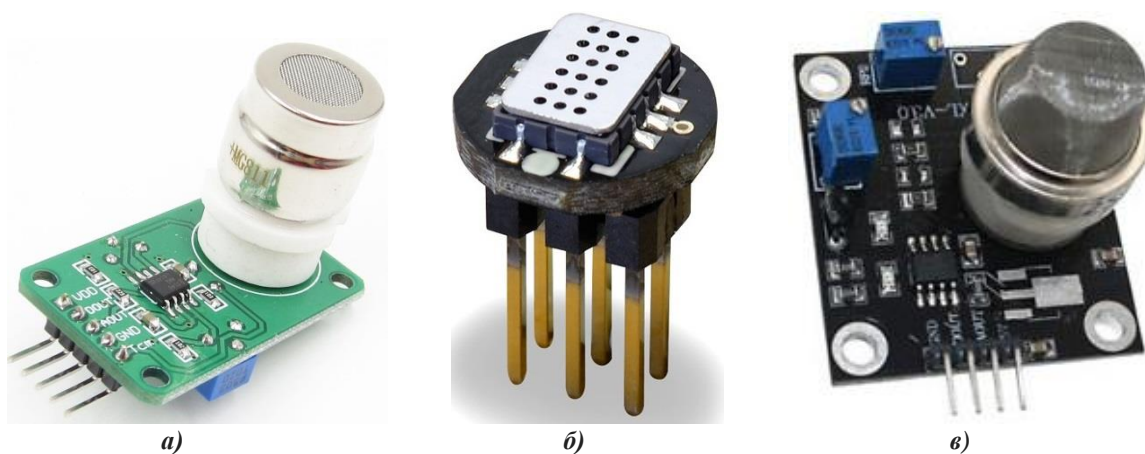


Рисунок 5 – Модули для измерения концентрации загрязняющих веществ в воздухе (а – модуль MG-811 для измерения CO; б – модуль MiCS-2714 для измерения NO₂; в – модуль 2SH12 для измерения SO₂)

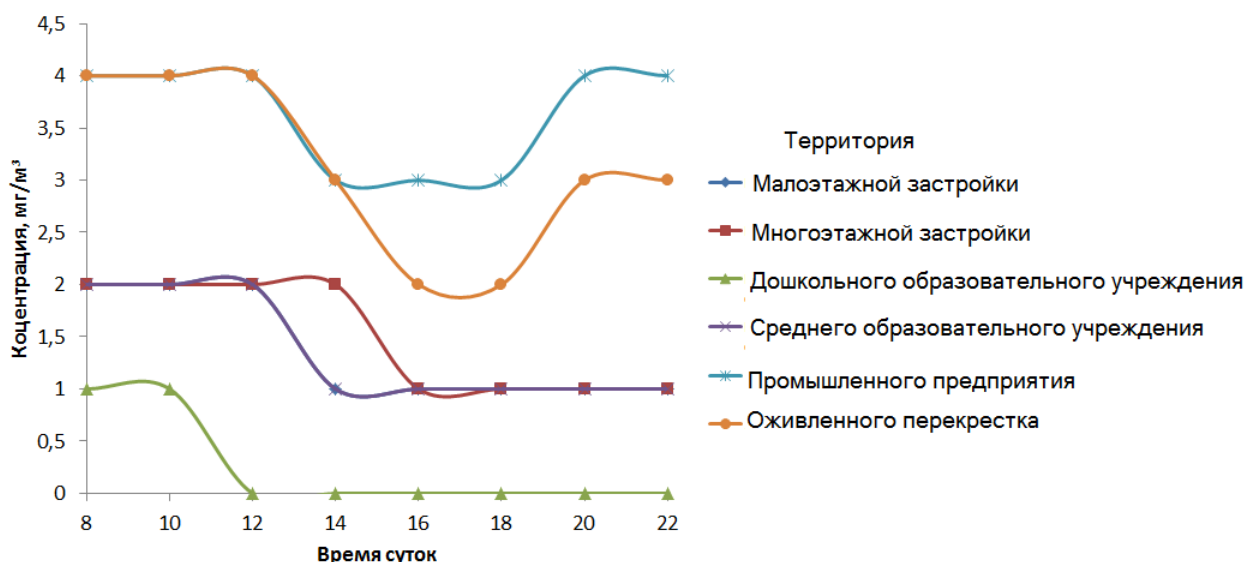


Рисунок 6 – Динамика концентрации угарного газа в атмосферном воздухе

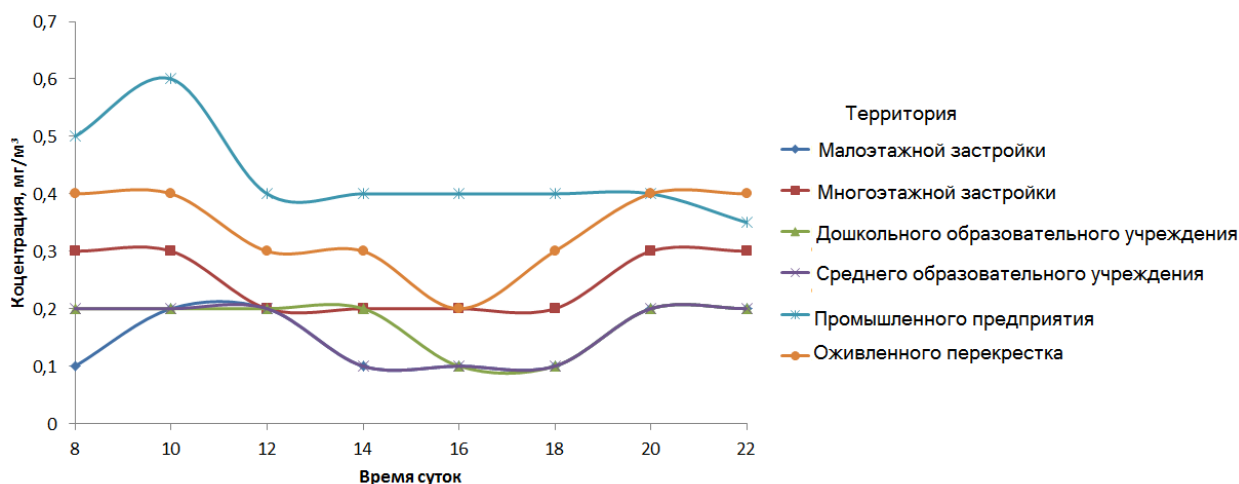


Рисунок 7 – Динамика концентрации угарного газа в атмосферном воздухе

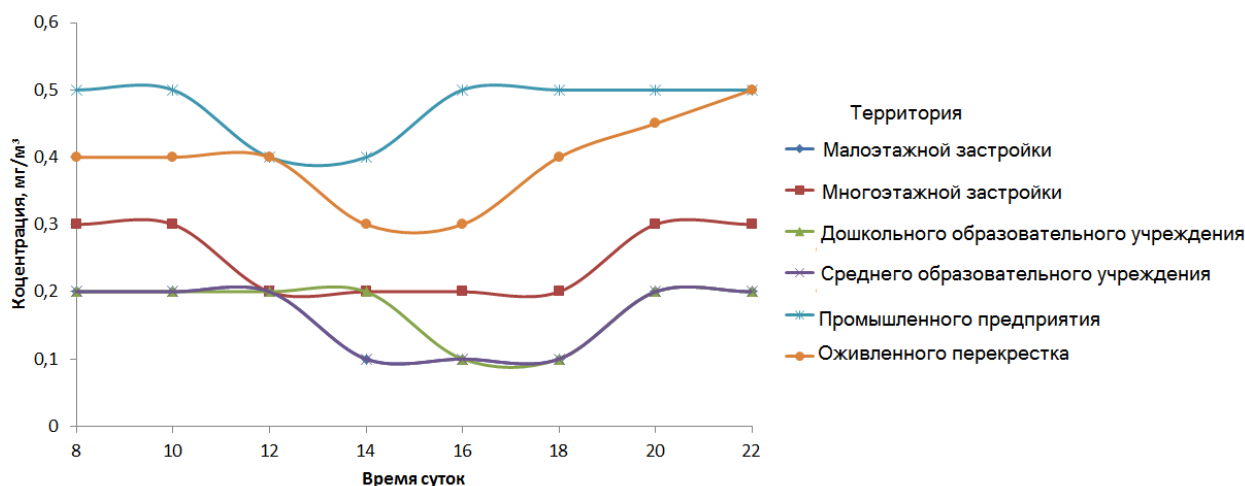


Рисунок 8 – Динамика концентрации сернистого ангидрида в атмосферном воздухе

Эти процессы являются достаточно инерционными, что и обуславливает отставание локальных максимумов концентрации рассматриваемых веществ на территории жилой застройки от максимумов на рассматриваемом перекрестке. Полученные результаты во всех случаях превышают величины ПДК как по NO_2 , так и по SO_2 .

Как видно, результаты измерений согласуются с современными теоретическими представлениями о динамике вредных веществ в атмосфере, что позволяет судить об адекватности разработанного измерительного компонента. Дальнейшее развитие локальной информационной системы прогнозирования динамики воздушной среды позволит достаточно точно предсказывать направление развития физических процессов, а также получать данные для научно обоснованных подходов к проектированию жилой застройки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baklanov, A., Hänninen, O., etc. Integrated systems for forecasting urban meteorology, air pollution and population exposure. // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2007. No 7. Pp. 855–874.
2. Baklanov A., Grimmond C.S., etc. From urban meteorology, climate and environment research to integrated city services // *Urban Climate*. 2018. No 23. Pp. 330–341.
3. Butler, T.M., Lawrence, M.G., The influence of megacities on global atmospheric chemistry: a modelling study // *Environment Chemistry*. 2009. No 6. Pp. 219–225.
4. Coupled Chemistry-Meteorology/Climate Modelling (CCMM): Status and Relevance for Numerical Weather Prediction, Atmospheric Pollution and Climate Research. World Meteorological Organization, Switzerland, Geneva. 2016.
5. Dabberdt W.F., Baklanov, A., etc. WMO GURME Workshop on Urban Meteorological Observation Design, Shanghai, China. WMO, Geneva, 2011. 208 p.
6. Freney, E.J., etc. Characterizing the impact of urban emissions on regional aerosol particles: airborne measurements during the MEGAPOLI experiment // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014. No 14. Pp. 1397–1412.
7. Grimmond, C.S.B., etc. Urban-scale environmental prediction systems. Chapter 18. In: *Seamless Prediction of the Earth System: From Minutes to Months*. World Meteorological Organization, Switzerland, Geneva, 2015. Pp. 347–370.
8. Grimmond, C.S., etc. Guidelines for Establishing Weather, Climate, Water and Related Environmental Services for Megacities and Large Urban Complexes: Integrated Urban Weather, and Climate Service. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. 2015. 356 p.
9. Tan, J., etc. Urban integrated meteorological observations: practice and experience in Shanghai, China // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2015. No 96. Pp. 85–102.
10. van der Gon, D., e.c.t. Discrepancies between top-down and bottom-up emission inventories of megacities: the causes and relevance for modeling concentrations and exposure. // *Air Pollution Modeling and its Application XXI, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. 2011. Vol. 4. Pp. 194–204.
11. WMC-17, Seventeenth World Meteorological Congress. Geneva. Abridged Final Report With Resolutions. 2015. Pp. 560–561.
12. Brunet, G., Jones, S., Ruti, P.M. Seamless Prediction of the Earth System: from Minutes to Months // *World Meteorological Organization*, Geneva, Switzerland. 2015. No 418. Pp. 1156.
13. Zhang, Y. Online-coupled meteorology and chemistry models: history, current status, and outlook // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2008. No 8. Pp. 2895–2932.
14. Приказ Министерства Природных ресурсов и экологии РФ №273 от 06.06.2017
15. Форум разработчиков «Mysensors» [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://forum.mysensors.org/topic/147/air-quality-sensor>.

REFERENCES

1. Baklanov, A., Hänninen, O., etc. Integrated systems for forecasting urban meteorology, air pollution and population exposure. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2007. No 7. Pp. 855–874.
2. Baklanov A., Grimmond C.S., etc. From urban meteorology, climate and environment research to integrated city services. *Urban Climate*. 2018. No 23. Pp. 330–341.
3. Butler, T.M., Lawrence, M.G., The influence of megacities on global atmospheric chemistry: a modelling study. *Environment Chemistry*. 2009. No 6. Pp. 219–225.
4. Coupled Chemistry-Meteorology/Climate Modelling (CCMM): Status and Relevance for Numerical Weather Prediction, Atmospheric Pollution and Climate Research. World Meteorological Organization, Switzerland, Geneva. 2016.
5. Dabberdt W.F., Baklanov, A., etc. WMO GURME Workshop on Urban Meteorological Observation Design, Shanghai, China. WMO, Geneva, 2011. 208 p.
6. Freney, E.J., etc. Characterizing the impact of urban emissions on regional aerosol particles: airborne measurements during the MEGAPOLI experiment. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014. No 14. Pp. 1397–1412.
7. Grimmond, C.S.B., etc. Urban-scale environmental prediction systems. Chapter 18. In: *Seamless Prediction of the Earth System: From Minutes to Months*. World Meteorological Organization, Switzerland, Geneva, 2015. Pp. 347–370.
8. Grimmond, C.S., etc. Guidelines for Establishing Weather, Climate, Water and Related Environmental Services for Megacities and Large Urban Complexes: Integrated Urban Weather, and Climate Service. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. 2015. 356 p.
9. Tan, J., etc. Urban integrated meteorological observations: practice and experience in Shanghai, China. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2015. No 96. Pp. 85–102.

10. van der Gon, D., e.c.t. Discrepancies between top-down and bottom-up emission inventories of megacities: the causes and relevance for modeling concentrations and exposure. *Air Pollution Modeling and its Application XXI, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. 2011. Vol. 4. Pp. 194–204.
11. WMC-17, Seventeenth World Meteorological Congress. Geneva. Abridged Final Report With Resolutions. 2015. Pp. 560–561.
12. Brunet, G., Jones, S., Ruti, P.M. Seamless Prediction of the Earth System: from Minutes to Months. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. 2015. No 418. Pp. 1156.
13. Zhang, Y. Online-coupled meteorology and chemistry models: history, current status, and outlook. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2008. No 8. Pp. 2895–2932.
14. Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation No. 273 of 06.06.2017.
15. Developers' forum «Mysensors». URL: <https://forum.mysensors.org/topic/147/air-quality-sensor>.

Информация об авторах:

Скобелева Е.А.

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Россия,
канд. тех. наук, доцент, декан архитектурно-строительного института,
E-mail: asi.gu-unpk@mail.ru

Абрамов А.В.

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Россия,
д-р техн. наук, доцент кафедры техносферной безопасности,
E-mail: Ant-lin88@mail.ru

Пилипенко О.В.

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Россия,
ректор ОГУ имени И.С. Тургенева, д-р техн. наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации
E-mail: rektor@ostu.ru

Пчеленок О.А.

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Россия,
канд. с.-х. наук, доцент, зав. кафедрой техносферной безопасности,
E-mail: bgdgtu@mail.ru

Родичева М.В.

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Россия,
канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой индустрии моды,
E-mail: rodicheva.unpk@gmail.com

Information about authors:

Skobeleva E.A.

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia,
cand., tech., sci., director of Architecture and Construction Institute,
E-mail: asi.gu-unpk@mail.ru

Abramov A.V.

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia,
doct. tech. sci., senior lecturer, department "Technosphere safety",
E-mail: Ant-lin88@mail.ru

Pilipenko O.V.

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia,
rector, doct. tech. sci., Professor, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation,
E-mail: rektor@ostu.ru

Pchelenok O.A.

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia,
cand. tech. sci., director of department "Technosphere safety",
E-mail: bgdgtu@mail.ru

Rodicheva M.V.

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia,
cand. tech. sci., senior lecturer, head of the department "Technology and designing of garments",
E-mail: rodicheva.unpk@gmail.com