

УДК 519.6 + 004.4 : 504.05

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ВЕБ-СИСТЕМА И ПРИБОРНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

О. Э. Якубайлик^{1,2}, А. А. Кадочников¹, А. В. Токарев¹

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН,
660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44

²Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: oleg@ict.krasn.ru

Рассматривается опыт исследований и разработок программных и аппаратных средств для мониторинга загрязнения атмосферы промышленного города, выполненных в Институте вычислительного моделирования СО РАН. Обсуждаются функциональные возможности, архитектурные особенности, пользовательский интерфейс распределённой геоинформационной веб-системы экологического мониторинга г. Красноярска, которая создаётся в сервис-ориентированной архитектуре. Реализованы сбор данных с автоматизированных постов наблюдений за состоянием атмосферного воздуха, сервисы агрегации и представления информации в виде интерактивных графиков и тематических карт в веб-интерфейсе. Разработан оригинальный прибор для измерения уровня загрязнения атмосферы мелкодисперсной пылью (PM_{2.5}), данные с которого в реальном времени поступают в систему через сотовую сеть. Сформирована система интегральной оценки уровня загрязнения атмосферы, основанная на вычислениях индекса качества атмосферы (AQI).

Ключевые слова: веб-ГИС, веб-сервисы, экологический мониторинг, AQI, загрязнение атмосферы, взвешенные частицы, мелкодисперсная пыль, пространственные данные, геопортал, Arduino, аэрозоль.

DOI: 10.15372/AUT20180305

Введение. Системы мониторинга состояния загрязнения атмосферного воздуха в настоящее время создаются и внедряются во многих городах мира как за рубежом, так и в России. Например, в Калужской области функционирует система анализа и управления качеством атмосферного воздуха, информационная поддержка которой основана на программно-аналитическом комплексе «Воздух-Город» [1]. В г. Новосибирске компанией «Тион» сформирована сеть из 16 небольших станций с датчиками, которые непрерывно измеряют концентрацию аэрозольных частиц PM_{2.5} и PM₁₀, а также влажность, температуру и атмосферное давление; данные системы доступны онлайн [2]. Созданная в Санкт-Петербурге автоматизированная система мониторинга атмосферного воздуха обеспечивает регулярное получение информации о состоянии воздушной среды в черте города органами власти и другими профильными организациями [3]. Разработанная в г. Тула информационно-измерительная система оценки загрязнения атмосферного воздуха позволяет проводить сбор информации различными типами датчиков, использовать всевозможные технические средства, вести сравнительный анализ полученных данных, а также решать важнейшие задачи, в частности определять вклад отдельных предприятий в загрязнение атмосферного воздуха в настоящий момент времени [4].

Следует отметить немецкую систему мониторинга состояния атмосферы, основанную на веб-интерфейсах и сервисах, в соответствии со спецификациями инфраструктуры пространственных данных INSPIRE Евросоюза [5]. В Румынии создана распределённая система мониторинга загрязнения атмосферы мелкодисперсной пылью PM_{2.5} с веб-интерфейсом на базе геоинформационной системы [6]. В Китае ведутся разработки специализированных средств для задач мониторинга загрязнения воздуха — язык сценариев TaskML и основанная на нём система обработки и анализа данных с датчиков загрязнения

атмосферы Sensor Web [7]. В Италии реализована система мониторинга качества воздуха и транспортных потоков, в которой работают датчики собственного производства, созданные на основе микроконтроллера Arduino; для представления результатов используется веб-портал [8]. Безусловным трендом стало внедрение веб-ориентированных решений, базирующихся на распределённой сети относительно дешёвых датчиков.

Мониторинг состояния загрязнения атмосферного воздуха в г. Красноярске ведётся рядом организаций федерального и региональных уровней (Среднесибирским управлением гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды, Центром реализации мероприятий по природопользованию и охране окружающей среды Красноярского края, Главным управлением Министерства чрезвычайных ситуаций Красноярского края, Сибирским федеральным университетом и другими). Каждая из этих организаций обладает собственными методиками, технологиями и системами сбора, хранения и обработки данных. Кроме того, с появлением доступных приборов для оценки уровня загрязнения воздуха участие в сборе информации стали принимать общественные экологические организации и независимые активисты, блогеры. Разнообразие используемых решений, межведомственная и организационная разобщённость приводят к тому, что комплексный анализ и оперативная оценка всего массива регистрируемой информации представляются в настоящее время технически затруднительными и практически не проводятся. С учётом запланированного рядом организаций расширения числа стационарных постов наблюдений за состоянием природной среды в ближайшие годы ситуация будет только усугубляться.

Исследования и разработки программно-аппаратного обеспечения для мониторинга загрязнения атмосферы, выполняемые в Институте вычислительного моделирования (ИВМ СО РАН), направлены на решение указанной проблемы. Во-первых, ведётся создание веб-ориентированной геоинформационной аналитической системы мониторинга загрязнения атмосферы. Её особенностью является представление информации об уровне загрязнения атмосферы в простой наглядной форме на основе индекса качества воздуха. Во-вторых, решается задача сбора информации об уровне загрязнения атмосферы города, поступающей из разных источников в централизованную базу данных (БД). В рамках организованного информационного взаимодействия с уполномоченными краевыми подведомственными организациями обеспечен сбор информации с автоматизированных постов наблюдений за состоянием атмосферы в реальном режиме времени, сформирован веб-интерфейс для аналитической обработки и представления данных. В-третьих, создан рабочий прототип прибора для измерения уровня загрязнения атмосферы мелкодисперсной пылью, обеспечивающего автоматическую передачу информации об уровне загрязнения в БД системы мониторинга через сотовую сеть GSM.

Взвешенные частицы PM_{2.5} являются одним из основных загрязнителей атмосферы (данные Управления Роспотребнадзора по Красноярскому краю), однако при этом федеральная и краевая системы мониторинга атмосферы г. Красноярска имели очень ограниченные возможности в измерении концентраций PM_{2.5}. Стоимость систем регистрации концентраций взвешенных частиц PM_{2.5} с сертифицированными датчиками достаточно высокая (в нынешних экономических условиях создание детальной сети наблюдений представляется маловероятным). В то же время себестоимость предлагаемого прибора составляет всего несколько тысяч рублей, а погрешность измерений не превышает 10 %. Это позволяет говорить о потенциальной возможности установки достаточно большого количества устройств в городе (десятки–сотни). В результате может быть создана уникальная научно-исследовательская сеть наблюдений за загрязнением атмосферы пылью (PM_{2.5}). Такая сеть позволит выявлять проблемные участки и моменты времени в пространственно-временном распределении загрязнений, может стать для соответствующих экологических организаций хорошей «исследовательской основой» последующего детального анализа с помощью сертифицированных приборов.

В целом преимущество предлагаемого подхода является уникальное сочетание основанных на свободном программном обеспечении веб-ГИС, построенной в сервис-ориентированной архитектуре геопортала, и IT-инфраструктуры сбора данных, обеспечивающей интеграцию оперативной информации различных городских систем мониторинга атмосферы. С использованием относительно недорогого прибора для измерения концентрации пыли такой подход может внести существенный вклад в решение экологических проблем.

Цель предлагаемой работы — провести обзор возможностей создаваемого информационно-технологического обеспечения системы мониторинга загрязнения атмосферы, вычислительных технологий и методов анализа данных.

Оценка загрязнения атмосферы на основе индекса качества воздуха. Качество атмосферного воздуха — важнейший экологический фактор, определяющий здоровье населения и состояние экосистем. Для целей интегральной оценки степени загрязнения атмосферы в большинстве стран мира используются унифицированные показатели — индексы качества атмосферы AQI (Air Quality Index) [9] — инструмент предоставления информации о загрязнении атмосферного воздуха широкой общественности в простой и наглядной форме. Основная идея состоит в том, что для каждого вещества формируется шкала уровней загрязнения, состоящая из нескольких классов в зависимости от степени воздействия на здоровье человека. Индекс качества вычисляется на основе индексов концентраций нескольких загрязняющих веществ: взвешенные частицы диаметром менее 10 мкм (PM10) и менее 2,5 мкм (PM2.5), углекислый газ (CO), сернистый газ (SO₂), диоксид азота (NO₂) и озон (O₃). Для каждого класса шкалы уровней загрязнения вводится цветовое обозначение (зелёный/жёлтый/красный/бордовый/чёрный цвета означают соответствующую степень загрязнения атмосферы и влияние на здоровье человека — от безопасного уровня до стихийного бедствия), формулируются рекомендации населению.

Особенностью и преимуществом рассматриваемой в этой работе геоинформационной веб-системы ИВМ СО РАН является её возможность представления данных о загрязнении как в показателях AQI, так и в их модификациях InstantCast, NowCast, NowCastChina и др., использование которых значительно облегчает восприятие информации обычными пользователями-неспециалистами.

Система сбора, представления и анализа данных оперативных наблюдений. Источником информации об уровне загрязнения атмосферы является «Краевая ведомственная информационно-аналитическая система о состоянии окружающей среды Красноярского края» (КВИАС), сбор которой ведётся с 2009 года. Наблюдения за качеством атмосферного воздуха проводятся на шести автоматизированных постах наблюдений в г. Красноярске, где размещено оборудование, обеспечивающее непрерывное автоматическое измерение массовых концентраций оксида и диоксида азота, диоксида серы, оксида углерода, пыли, формальдегида в атмосферном воздухе. Система обеспечивает сбор, обработку, хранение, передачу накопленной информации на удалённый сервер. Наряду с измерениями концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе на постах наблюдений в автоматическом режиме проводится и измерение метеорологических параметров (направление и скорость ветра, температура, влажность, атмосферное давление). Кроме того, в некоторых районах г. Красноярска ежедневно осуществляются наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха (аммиаком, сероводородом, гидрохлоридом, гидрофторидом, бенз[а]пиреном и взвешенными веществами) с использованием передвижной лаборатории (по скользящему графику).

Система сбора информации реализована на базе инструментальных программных средств геопортала ИВМ СО РАН [10–12]. Доступ к результатам наблюдений осуществляется стандартными средствами геопортала, включающего просмотр табличных данных, экспорт, просмотр данных на картах с возможностью выбора временных интервалов. Отличительной особенностью является возможность гибкой настройки визуализации, веб-сервисов импорта/экспорта всей доступной информации.

Для просмотра результатов наблюдений использованы возможности существующего картографического веб-интерфейса геопортала [13]. Основные элементы интерфейса: карта-подложка и данные наблюдения в виде полупрозрачного слоя на заданный момент времени для определённого показателя. Пользователю доступны такие элементы управления, как выбор показателя, выбор временного интервала. С помощью дополнительных инструментов можно просматривать данные с некоторым временным шагом в одном из направлений. Для поиска аномалий предусмотрен вывод данных в виде активного графика максимальных значений с быстрым переходом к их просмотру на определённый момент времени (рис. 1).

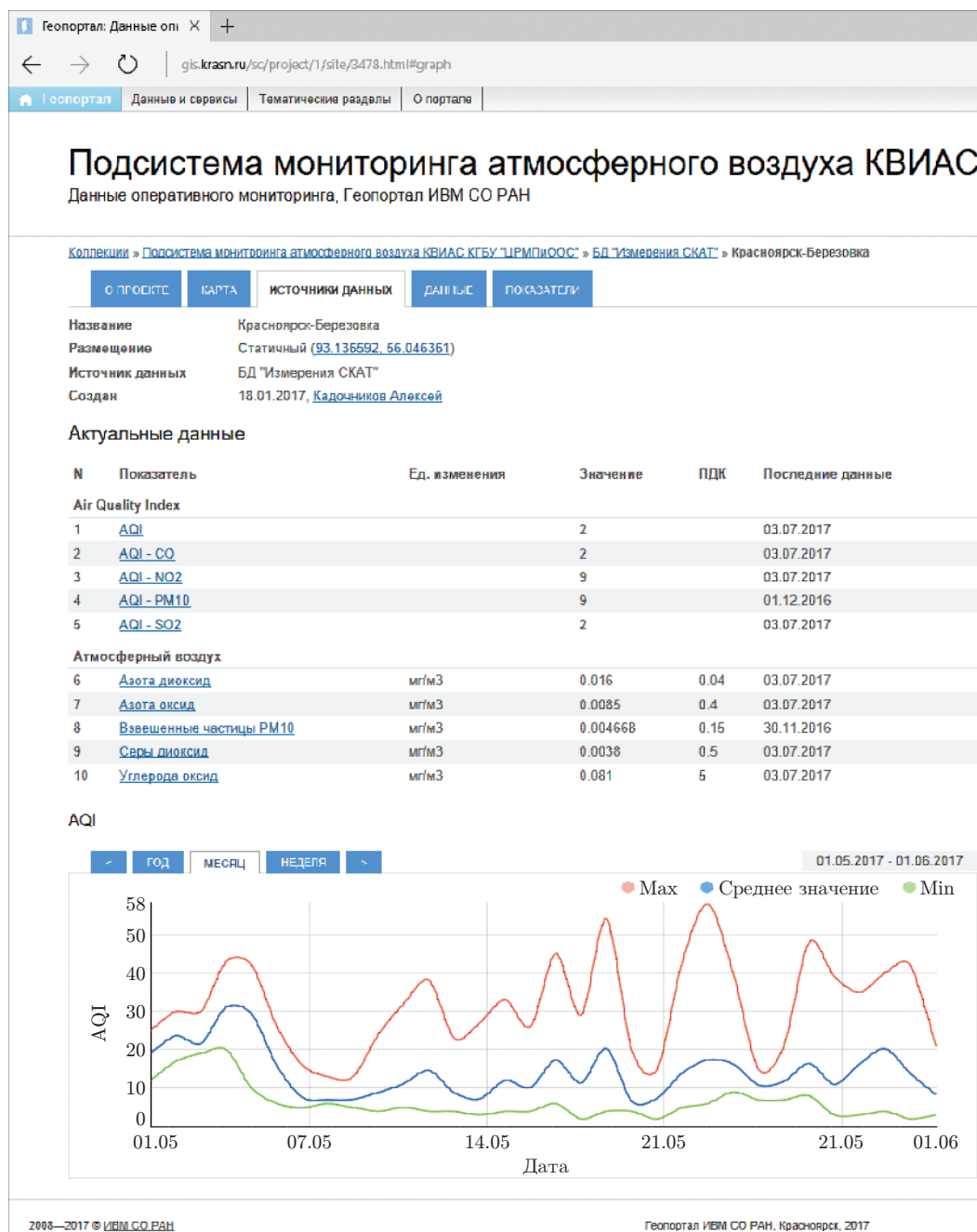


Рис. 1. Данные оперативного мониторинга на геопортале ИВМ СО РАН (на графике показана динамика изменения показателя AQI — средние значения, минимумы и максимумы за выбранный период времени (май 2017 г.))

Для загрузки информации на геопортал подготовлен программный модуль с соответствующим драйвером для обработки и преобразования входных данных, обеспечивающий периодическую загрузку данных наблюдений через веб-сервис в JSON-формате, который содержит три раздела информации: посты наблюдения и их координаты, список показателей (загрязняющие вещества и метеоданные), значения показателей с привязкой ко времени [14, 15].

Для минимизации нагрузки на удалённый сервер в процессе загрузки архива данных наблюдений с 2009 по 2017 гг. были сформированы текстовые файлы в JSON-формате. Импорт данных напрямую из БД на удалённом сервере на сервер геопортала занял несколько дней. После импорта архива данные загружаются 1 раз в час, а данные передвижных лабораторий — 1 раз в несколько дней. При возникновении проблем импорта с удалённого веб-сервиса разработанное программное обеспечение автоматически находит дату последних полученных данных и формирует запрос для загрузки новых. Для минимизации нагрузки на удалённый сервис информация загружается порциями с определённым временным интервалом до тех пор, пока не будет достигнут текущий момент времени в данных.

Прибор для измерения уровня загрязнения атмосферы. Проектирование и создание устройства для регистрации концентрации мелкодисперсных взвешенных частиц (PM2.5) размером до 2,5 мкм в воздухе выполнялись на основе доступных на рынке электронных компонент. Системной основой прибора стал микроконтроллер Arduino — электронный конструктор и удобная платформа быстрой разработки устройств, которая пользуется огромной популярностью во всём мире благодаря удобству и простоте языка программирования, а также открытой архитектуре и программному коду. Микроконтроллер программируется с помощью языка Wiring (упрощённая версия C++) и среды разработки Arduino IDE.

Схема прибора и его основные компоненты показаны на рис. 2:

- 1) Arduino Nano 3.0 — микроконтроллер с обвязкой, из линейки различных модификаций которого плата выбрана исходя из достаточного объёма памяти, количества портов ввода-вывода, миниатюрных размеров и удобства работы;
- 2) PMS7003 — датчик взвешенных частиц;

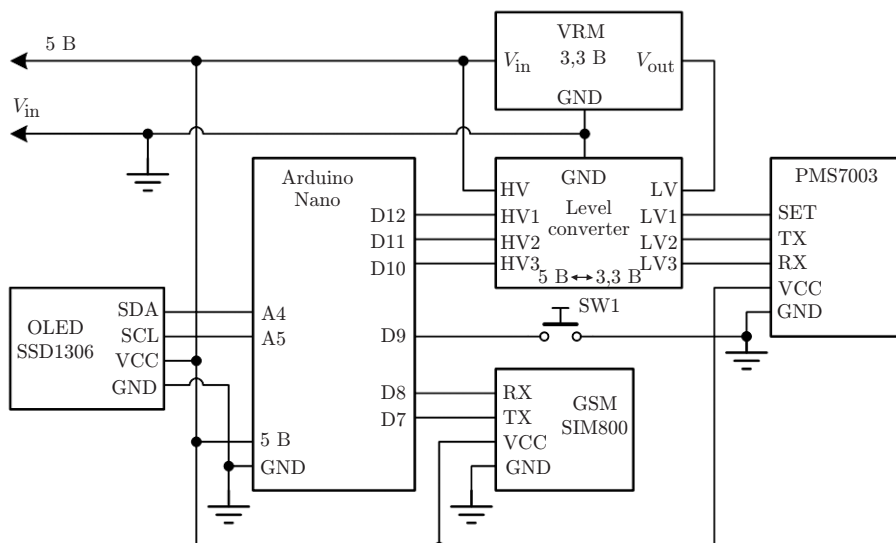


Рис. 2. Принципиальная схема прибора для измерения уровня загрязнения атмосферы

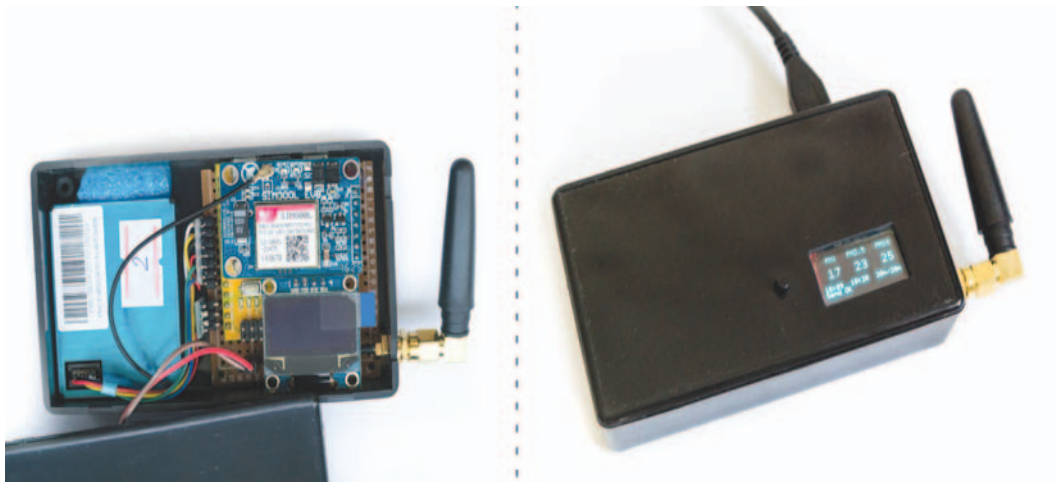


Рис. 3. Прототип прибора для измерения уровня загрязнения атмосферы

- 3) SIM800 — модуль GSM/GPRS сотовой связи для передачи данных на сервер, в котором реализован стек протокола TCP/IP, есть возможность выполнять HTTP-запросы;
- 4) OLED — монохромный матричный дисплей 128×64 на контроллере SSD1306;
- 5) VRM 3,3 В — линейный стабилизатор, понижающий напряжение питания до 3,3 В;
- 6) LevelConverter — преобразователь логических уровней для согласования модулей с различными напряжениями логических уровней (Arduino Nano и PMS7003).

Измеряющим элементом созданного устройства для определения концентрации взвешенных частиц в воздухе является модуль PMS7003 — универсальный цифровой датчик компании Plantower [16]. В основе работы датчика лежит измерение рассеивания лазерного излучения на взвешенных частицах. Датчик имеет цифровой последовательный интерфейс, по которому на микроконтроллер Arduino поступают измеряемые значения концентраций пыли.

Для микроконтроллера была разработана внутренняя микропрограмма на языке Wiring. Предусмотрено несколько режимов работы устройства с разными периодами отображения и передачи данных на сервер (время обновления экрана/передачи данных): 5s/off, 5s/20s, 5s/20m, 20m/20m. В режимах с большим периодом между измерениями выполняется временное выключение внутреннего вентилятора датчика пыли для экономии его ресурса работы. Приложение построено на базе планировщика задач, что даёт возможность разгрузить основной программный цикл и вынести логику в виде отдельных задач с управляемым периодом запуска.

Использован ряд библиотек с открытым исходным кодом для программирования устройства: Agenda — для реализации планировщика задач, SSD1306Ascii — для работы с OLED-дисплеем на контроллере SSD1306, TinyGSM — для передачи данных через сотовую сеть. Датчик PMS7003 появился на рынке достаточно недавно, и ещё нет удобных библиотек для работы с ним из среды Arduino. На основе программного кода от Martin Falatic была создана собственная библиотека для получения данных с датчика PMS7003.

На этапе предварительного исследования возможностей выбранных компонент устройство собиралось и отлаживалось на макетной плате, в дальнейшем прототип был собран в компактном корпусе размерами $100 \times 60 \times 25$ мм. Прибору необходим внешний источник питания, подключаемый через стандартный разъём микроUSB (рис. 3).

Программный интерфейс системы мониторинга. Для сбора и обработки данных о загрязнении воздуха взвешенными частицами используется сервис SensorCollector геопортала ИВМ СО РАН. Программный интерфейс сервиса построен на основе REST-

подхода, запросы передаются HTTP-методами GET/POST/DELETE. Передача текущих значений показателей выполняется следующим запросом:

```
http://gis.krasn.ru/sc/api/1.0/projects/<project_id>/values/send?key =  
<key>&site = <site_id>&<values>
```

(key — ключ пользователя для доступа к сервису; project_id — идентификатор проекта, в рамках которого собираются данные; site_id — идентификатор площадки, на которой размещён датчик; values — значения показателей, передаваемых отдельными параметрами).

Веб-интерфейс системы мониторинга загрязнения атмосферы. Проектирование и создание пользовательского интерфейса веб-ГИС мониторинга выполнялись на базе программных интерфейсов геопортала ИВМ СО РАН, набора ранее разработанных инструментальных программных средств [17]. Для дизайна экранных форм веб-приложения использовался механизм формирования динамического контента на основе шаблонов. Шаблоны позволяют изменять порядок и форму вывода атрибутивных данных по объектам в слоях карты, включая различные элементы стилового оформления: цвет, параметры шрифтов и т. д.

Заключение. Разработана веб-ориентированная геоинформационная аналитическая система мониторинга загрязнения атмосферы на основе технологий геопортала ИВМ СО РАН. Решается задача автоматического сбора информации об уровне загрязнения атмосферы города, поступающей из разных источников в централизованную базу данных. Реализовано представление информации об уровне загрязнения атмосферы в простой наглядной форме на основе индекса качества атмосферы. При использовании доступных комплектующих создан рабочий прототип прибора для измерения уровня загрязнения атмосферы мелкодисперсной пылью и автоматической передачи данных в систему мониторинга. Устройство находится в опытной эксплуатации, в текущей версии реализована передача значений PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ по сотовой сети. В дальнейшем список показателей планируется расширить, добавив общее количество взвешенных частиц в единице объёма, температуру, влажность, атмосферное давление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ашитко А. Г., Маньшина И. В.** Система мониторинга состояния качества атмосферного воздуха в г. Калуге // Вестн. Калужского университета. 2014. **22**, № 1. С. 5–9.
2. **CityAir.** Мониторинг качества города. URL: <http://cityair.ru/> (дата обращения: 5.04.2018).
3. **Азёмов Д. Т.** Система мониторинга атмосферного воздуха Санкт-Петербурга // Окружающая среда Санкт-Петербурга. 2016. **2**, № 2. С. 8–14.
4. **Карпов В. С., Панарин В. М., Горюноква А. А.** Информационно-измерительная система оценки загрязнений атмосферного воздуха // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2012. Вып. 2. С. 173–182.
5. **Wiemann S., Brauner J., Karrasch P. et al.** Design and prototype of an interoperable online air quality information system // Environmental Modelling & Software. 2016. **79**. P. 354–366.
6. **Savu T., Jugravu B. A., Dunea D.** On the development of a PM_{2.5} monitoring network for real-time measurements in urban environments // Revista de Chimie. 2017. **68**, N 4. P. 796–801.
7. **Hu L., Yue P., Zhang M. et al.** Task-oriented Sensor Web data processing for environmental monitoring // Earth Sci. Inform. 2015. **8**, N 3. P. 511–525.
8. **Zaldei A., Camilli F., de Filippis T. et al.** An integrated low-cost road traffic and air pollution monitoring platform for next citizen observatories // Trans. Research Procedia. 2017. **24**. P. 531–538.

9. **Beijing Air Pollution:** Real-time Air Quality Index (AQI). URL: <http://aqicn.org/> (дата обращения: 5.04.2018).
10. **Геопортал ИВМ СО РАН.** URL: <http://gis.krasn.ru/> (дата обращения: 5.04.2018).
11. **Yakubailik O., Kadochnikov A., Tokarev A.** Applied software tools and services for rapid web GIS development // Proc. of the 15th Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConf. Albena, Bulgaria, June 18–24, 2015. Book 2, Vol. 1. P. 487–494.
12. **Матвеев А. Г., Якубайлик О. Э.** Проектирование и разработка программно-технологического обеспечения для геопространственных веб-приложений // *Фундаментальные исследования*. 2013. **15**, № 10. С. 3358–3362.
13. **Кадочников А. А., Якубайлик О. Э.** Разработка программных средств сбора и визуализации данных наблюдений для геопортала Института вычислительного моделирования СО РАН // *Вестн. НГУ. Информационные технологии*. 2014. **12**, № 4. С. 23–31.
14. **Кадочников А. А.** Особенности построения геопространственных веб-приложений и сервисов для систем мониторинга состояния окружающей природной среды // *Журнал СФУ. Сер. Техника и технологии*. 2015. **8**, № 7. С. 908–916.
15. **Якубайлик О. Э.** Технологии формирования интерактивных тематических карт на геопортале // *Вестн. компьютерных и информационных технологий*. 2017. **154**, № 4. С. 23–28.
16. **The Plantower PMS5003 and PMS7003 Air Quality Sensor experiment.** URL: <http://aqicn.org/sensor/pms5003-7003/> (дата обращения: 5.04.2018).
17. **Матузко А. К., Якубайлик О. Э.** Разработка прикладных ГИС на основе технологий геопортала // *Образовательные ресурсы и технологии*. 2016. **14**, № 2. С. 202–209.

Поступила в редакцию 16 января 2018 г.
