

С. А. Чигридов¹, Е. Н. Кулик¹✉

HARMONY: мобильная станция экологического мониторинга на базе общественного транспорта

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

Аннотация. В статье представлены результаты разработки и полевых испытаний мобильной станции для мониторинга качества воздуха, предназначенной для установки на подвижной состав наземного общественного транспорта. Устройство на базе микроконтроллера ESP8266 оснащено датчиками TVOC и CO₂-экв. (SGP30), твердых частиц (PMS7003), атмосферного давления, температуры и влажности воздуха (BME280) и GPS-модулем (NEO-6M). Данные передаются в Google Sheets через HTTP POST. Разработан и апробирован алгоритм фильтрации сырых данных, включающий удаление измерений в зоне остановочных пунктов, пространственную агрегацию по регулярной сетке 100×100 м, усреднение параметров внутри каждой ячейки и экспорт в шейп-файл. Алгоритм реализован в среде ArcMap в виде модели ModelBuilder. В ходе тестовых треков сбора данных фильтрация позволила сократить количество анализируемых измерений на 61% (с 174 до 67). У созданных точек в поле «FREQUENCY» указывается количество исходных записей измерений, что позволяет при анализе различать прямые измерения и рассчитанные усредненные значения. Результаты исследования являются основой для построения карт распределения придорожного загрязнения атмосферы в рамках гибридной системы мониторинга HARMONY.

Ключевые слова: мобильный мониторинг, загрязнение атмосферы, ESP8266, фильтрация данных, ArcMap, ModelBuilder, пространственная агрегация, придорожное загрязнение

S. A. Chigridov¹, E. N. Kulik¹✉

HARMONY: mobile environmental monitoring station based on public transport

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

Annotation. The article presents the results of the development and field testing of a mobile air quality monitoring station designed for installation on vehicles of ground-based public transport. The ESP8266 microcontroller-based device is equipped with sensors for TVOC and CO₂ (SGP30), particulate matter (PMS7003), atmospheric pressure, temperature and humidity (BME280) and GPS module (NEO-6M). The data is transmitted to Google Sheets via HTTP POST. An algorithm for filtering raw data has been developed and tested, including the removal of measurements in the area of bus stops, spatial aggregation on a regular 100×100 m grid, averaging parameters within each cell and exporting to a shapefile. The algorithm is implemented in the ArcMap environment as a ModelBuilder model. During the test data collection tracks, filtering reduced the number of analyzed measurements by 61% (from 174 to 67). For the created points, the quantity of measurements records is indicated in the «FREQUENCY» attribute field, which allows the analysis to distinguish between direct measurements and calculated average values. The results of the study are the basis for designing maps of the distribution of roadside air pollution within the framework of the HARMONY Hybrid Monitoring System.

Keywords: Mobile Monitoring, Atmospheric Pollution, ESP8266, Data Filtering, ArcMap, Model-Builder, Spatial Aggregation, Roadside Pollution

Введение

Контроль качества воздуха в городской среде, особенно в придорожных зонах, является актуальной задачей экологического мониторинга. Стационарные посты расположены редко и их данные не отражают реальную картину загрязнения вблизи дорог. Спутниковые данные (например, Sentinel-5P TROPOMI) имеют низкое пространственное разрешение, следовательно, теряются или нивелируются выбросы по площади города, что не позволяет выявить локальные пики загрязнения непосредственно у автомагистралей. Кроме того, спутниковые датчики измеряют интегральную концентрацию во всём вертикальном столбе атмосферы, оставаясь практически нечувствительными к приземному слою, где формируется и накапливается вредоносное загрязнение, влияющее на здоровье населения. Альтернативой является мобильный мониторинг с использованием подвижного состава общественного транспорта или легковых автомобилей.

Мобильные станции (МС) обеспечивают сбор детальных пространственных данных, однако формируют необработанный массив, содержащий измерения в зонах остановочных пунктов общественного транспорта, избыточную частоту записей измерений и прочие искажения. Неравномерность пространственного разрешения сырых данных, обусловленная изменением скорости носителя, приводит к искусственному завышению плотности измерений в точках длительной стоянки (остановки, заторы) и разрежению на участках свободного движения, что делает такой массив непригодным для прямой картографической интерполяции без предварительной фильтрации. Цель настоящего исследования – разработать МС и алгоритм фильтрации данных для последующего корректного построения карт придорожного загрязнения (рис. 1). Основная цель фильтрации – получить массив информации, отображающей ситуацию в потоке всех видов движущегося транспорта.



Рис. 1. Общая концепция мобильного мониторинга

Методы и материалы

Мобильная станция собрана на базе микроконтроллера ESP8266 (NodeMCU). Датчики подключаются по интерфейсам I2C (SGP30, BME280) и UART (PMS7003, GPS NEO-6M) (табл. 1) [1–5]. Питание – от бортовой сети автомобиля.

Таблица 1. Характеристики датчиков

Датчик	Измеряемый параметр	Диапазон	Погрешность
SGP30	TVOC, CO ₂ -eq	0...60000 ppb / 400...60000 ppm	±15%
PMS7003	PM _{1.0} , PM _{2.5} , PM ₁₀	0...500 мкг/м ³	±10%
BME280	Атмосферное давление, температура и влажность воздуха	300...1100 гПа	±1 гПа
NEO-6M	Координаты, скорость	—	2.5 м

Корпус спроектирован в CAD и напечатан на 3D-принтере (PETG, белый цвет). Вентиляционные отверстия организованы по принципу экрана Стивенсона – защита от прямых солнечных лучей и осадков при свободной циркуляции воздуха (рис. 2) [6].

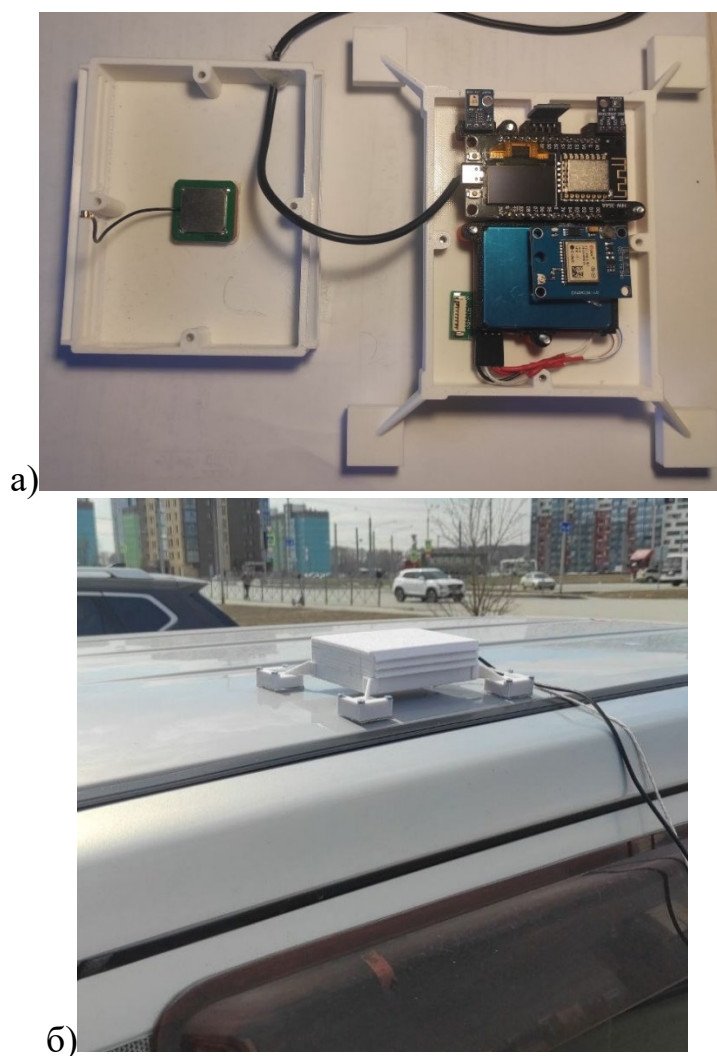


Рис. 2. Измерительный блок:

а) внутренняя компоновка элементов; б) установленный на автомобиль

МС подключается к Wi-Fi сети, данные в формате JSON отправляются в Google Sheets через HTTP POST (ESP8266HTTPClient) (рис. 3) [7, 8]. Периодичность опроса датчиков и отправки данных – каждые 7 секунд. При отсутствии связи данные буферизируются. Также реализовано отслеживание работоспособности подключенных датчиков. При запуске МС выполняется инициализация всех датчиков и в случае отсутствия ответа от датчика, в таблице Google Sheets ставится метка неисправности конкретного датчика. Экспорт в CSV для последующей обработки выполняется из интерфейса Google Sheets (Файл → Скачать).

Timestamp	#	Latitude	#	Longitude	#	Altitude	#	Speed	#	Satellites	#	Temp_BME
14.04.2026 8:52:06		54,987904		82,783768		120,5		0,1		8		2,5
14.04.2026 8:52:13		54,987911		82,783691		124,3		0,1		8		2,4
14.04.2026 8:52:20		54,987915		82,783638		124,3		0,1		7		2,4
14.04.2026 8:52:27		54,9879		82,783592		123,1		0,1		7		2,4

#	Hum_BME	#	Pressure	#	eCO2	#	TVOC	#	PM1.0	#	PM2.5	#	PM10	Статус
41,1		1014		402		0		4		5		6		Все датчики ОК
41,2		1014		400		0		4		6		7		Все датчики ОК
41,5		1014		400		0		4		6		8		Все датчики ОК
41,6		1014		404		0		4		6		8		Все датчики ОК

Рис. 3. Пример сырых данных в Google Sheets

Разработана модель в среде ArcMap (ModelBuilder), реализующая следующий порядок действий:

- удаление данных об измерениях в зоне остановочных пунктов. С использованием слоя положения остановок общественного транспорта строится буферная зона (расстояние подобрано эмпирически). Измерения МС в точках, попавших в эту зону, удаляются из массива анализируемых данных. Это исключает артефакты, связанные с длительной стоянкой (самозагрязнение и загрязнение выхлопными газами рядом стоящих единиц общественного транспорта);
- пространственная агрегация по сетке 100×100 м. Основное прореживание данных выполнено по регулярной сетке с шагом 100 м;
- ячейкам сетки, в которые попало более одной исходной точки сбора данных, по полю «FREQUENCY» присваивается значение, равное количеству записей измерений, которые были зафиксированы в исходном массиве измерений до выполнения фильтрации. Это позволяет при дальнейшем анализе различать прямые измерения и агрегированные значения;
- финальный массив с усредненными данными (агрегация по сетке в пространственном домене с усреднением измеряемых величин) экспортируется в шейп-файл для дальнейшего использования в моделях пространственного анализа и веб-картографии (рис. 4).

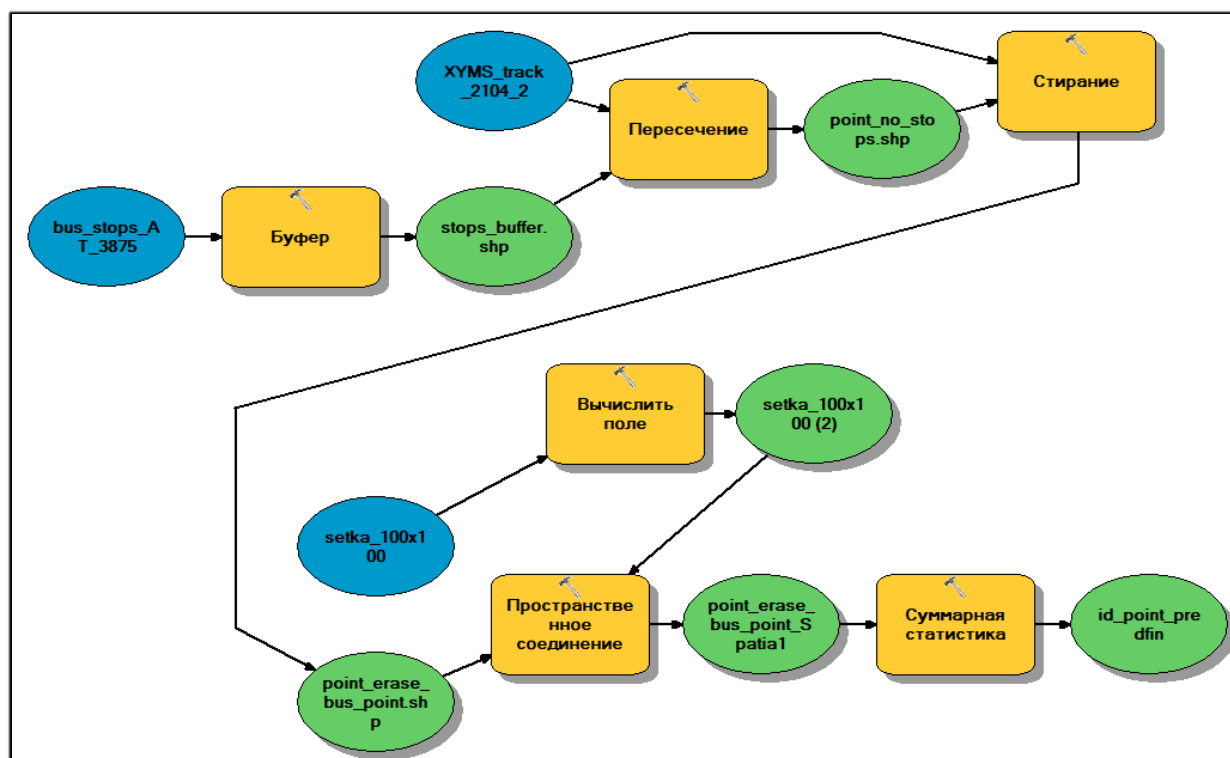


Рис. 4. Модель ModelBuilder в ArcMap

Описанный алгоритм фильтрации в текущей реализации требует ручного экспорта CSV и загрузки в ArcMap. В рамках развития сервиса HARMONY планируется полная автоматизация пайплайна: данные с МС будут поступать на серверный модуль, который автоматически запускает фильтрацию, агрегацию и сохраняет результат в базу данных, исключая ручные операции.

Результаты

В результате фильтрации получены количественные показатели (табл. 2, рис. 5, 6).

Таблица 2. Количество точек на каждом этапе фильтрации

Этап	Количество точек	Сокращение, %
Сырые данные (отправка 1/7 Гц)	174	—
После фильтрации данных в зонах остановочных пунктов	97	44% (от сырых)
После агрегации по сетке 100×100 м	67	61% (от сырых)



Рис. 5. Результаты этапов фильтрации трека измерений:

а) исходный трек; б) точки трека после фильтрации по буферам остановочных пунктов; в) результирующие положения точек трека измерений после агрегации и усреднения значений

Id	FREQUENCY	LAST Times	MEAN Latit	MEAN Longi	MEAN Altit	MEAN Speed	MEAN Satel	MEAN Temp1	MEAN Hum B	MEAN Press
17264	1	14.04.2026	54,987331	82,808807	115,8	44,3	8	6,3	30,7	1014
17272	1	14.04.2026	54,98737	82,816216	109,5	46,7	12	4,6	33,7	1013
17665	1	14.04.2026	54,988613	82,810051	115,4	39,6	8	6,8	31,7	1014
17871	1	14.04.2026	54,988857	82,815132	112,3	31,6	11	4,6	33,2	1014
14480	2	14.04.2026	54,98011	82,823498	109,25	18,9	11	6,05	31,95	1014
14701	2	14.04.2026	54,980713	82,842079	114,2	37,7	11	5,6	31,6	1013
15480	2	14.04.2026	54,982548	82,822975	109,9	1,4	12	5,6	31,5	1014
16673	2	14.04.2026	54,985733	82,8172	109,7	52,2	11	4,65	33,25	1013,5
14914	3	14.04.2026	54,981258	82,853864	120,733333	30,033333	11	6,6	30,866667	1012,666667
15337	3	14.04.2026	54,982138	82,87486	140,666667	11,166667	8,666667	5,233333	31,633333	1010
17870	3	14.04.2026	54,988795	82,814107	113,866667	43,6	10	5,633333	32,1	1013,333333
14916	4	14.04.2026	54,981346	82,855862	122,05	48,35	11	6,625	31,025	1012,75
15857	4	14.04.2026	54,983797	82,802919	113,325	8,975	7,25	6,85	29,5	1015
17464	4	14.04.2026	54,98792	82,808733	116,15	6,375	9	6,2	31,025	1015
15124	5	14.04.2026	54,981565	82,862915	125,24	6,74	10,4	6,22	30,74	1012
14919	8	14.04.2026	54,98142	82,858059	122,4625	3,8	10,75	5,85	31,6625	1013

Рис. 6. Фрагмент таблицы атрибутов результирующего слоя положения точек трека измерений после фильтрации

Обсуждение

Выбор шага агрегации 100×100 м обусловлен типовым масштабом городских экологических задач (размер квартала, ширина дорожной полосы) и достаточен для последующего пространственного анализа. Шаг менее 100 м приводит к появлению множества пустых ячеек из-за дискретности исходных измерений, а шаг более 100 м нивелирует пространственную неоднородность загрязнения в масштабе магистрали. При этом интервал измерений (7 с) выбран эмпирически

как технический компромисс: более частая отправка записей перенасыщает массив и не улучшает пространственное разрешение, более редкая — ведёт к переполнению буфера микроконтроллера.

Значение «FREQUENCY» даёт возможность при анализе собранных измерений различать те ячейки сети, где было собрано несколько измерений (например, на перекрёстке или при медленном движении), и ячейки с одиночными точками записи. Это позволит контролировать процесс моделирования распространения загрязнения и в случае необходимости исключить из анализа точки с усредненными значениями измерений.

Заключение

Разработана мобильная станция экологического мониторинга на базе ESP8266 с датчиками SGP30, PMS7003, BMP280 и GPS NEO-6M. Создан и апробирован алгоритм фильтрации данных в среде ArcMap.

Полученный после фильтрации массив данных является основой для построения карт распределения придорожного загрязнения воздуха и верификации корректности модели рассеивания вредных веществ, реализуемой внутри гибридной системы мониторинга HARMONY.

В перспективе, измерения с мобильных станций будут передаваться непосредственно на сервер геосервиса HARMONY, минуя промежуточное табличное хранилище.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. SGP30. Data Sheet [Электронный ресурс] // Sensirion – URL: https://sensirion.com/media/documents/984E0DD5/61644B8B/Sensirion_Gas_Sensors_Datasheet_SGP30.pdf (дата обращения 15.03.2026).
2. BME280. Data Sheet [Электронный ресурс] // Chipdip – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/294/DOC029294483.pdf> (дата обращения 15.03.2026).
3. PMS7003. Data Sheet [Электронный ресурс] // Espruino – URL: <https://www.espruino.com/datasheets/PMS7003.pdf> (дата обращения 15.03.2026).
4. U-blox 6 GPS Modules. Data Sheet [Электронный ресурс] // Chipdip – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/473/DOC042473703.pdf> (дата обращения 15.03.2026).
5. ESP8266 NodeMCU WiFi Devkit [Электронный ресурс] // Handson Technology – URL: <https://images.theengineeringprojects.com/document/main/datasheet/NodeMCU-V3.pdf> (дата обращения 15.03.2026).
6. Что такое экран Стивенсона [Электронный ресурс] // Wikipedia – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Stevenson_screen (дата обращения 05.04.2026).
7. Введение в работу с Apps Script в Google Таблицах [Электронный ресурс] // Timeweb – URL: <https://timeweb.com/ru/community/articles/vvedenie-v-rabotu-s-apps-script-v-google-tablicah> (дата обращения 05.04.2026).
8. Краткое руководство по сценариям Google Apps [Электронный ресурс] // Developers.Google – URL: <https://developers.google.com/workspace/sheets/api/quickstart/apps-script?hl=ru> (дата обращения 05.04.2026).

© С. А. Чигридов, Е. Н. Кулик, 2026