

**В. Б. Мокин, д. т. н., проф.; Д. Ю. Дзюняк; К. О. Бондалетов;
В. В. Олейник**

МЕТОД И ТЕХНОЛОГИЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА С ПОМОЩЬЮ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

В статье рассмотрена актуальная задача мониторинга и прогнозирования состояния атмосферного воздуха города, основным фактором загрязнения которого являются выбросы автомобильного транспорта на автомагистралях. Разработан новый метод и технология решения этой задачи, основанные на использовании универсальной информационно-измерительной системы, построенной на основе мобильных устройств, для наблюдения и контроля за состоянием атмосферного воздуха, и за источниками его загрязнения. Проведен эксперимент по тестированию этой технологии на улицах г. Винницы, который подтвердил ее работоспособность.

Ключевые слова: экологический мониторинг, атмосферный воздух, автотранспорт, информационно-измерительная система, мобильные устройства, ГИС, Винница.

Введение и исходные предпосылки

На сегодняшний день существует проблема загрязнения воздуха в городах. В последнее время в Украине имеет место тенденция того, что основными загрязнителями атмосферного воздуха в городах являются не стационарные, а передвижные источники выбросов, главным образом, автотранспорт. Для снижения этого влияния, прежде всего, в наиболее уязвимых к загрязнению местах (возле больниц, детсадов, учебных заведений, объектов природно-заповедного фонда (ПЗФ) и т. д.) необходимо провести серьезное технико-экономическое обоснование вариантов решений. И одним из первых этапов этого является построение зависимости между количеством транспортных средств (ТС) и содержанием загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, что позволило бы оценить эффективность тех или иных управленческих решений.

В международной практике теоретическими и практическими аспектами мониторинга окружающей среды занимается довольно много предприятий, некоммерческих учреждений и государственных международных экологических учреждений и агентств [1, 2].

Однако сеть постов мониторинга состояния атмосферного воздуха в городах недостаточно обширная, кроме того сложно синхронизировать данные этих постов с количеством ТС, являющихся источниками его загрязнения. Для устранения этих проблем можно применить информационно-измерительную систему (ИИС) универсального типа, основанную на использовании мобильных устройств для автоматизации всех операций обработки данных наблюдений. Такую ИИС можно установить на ТС и проводить наблюдения прямо в транспортном потоке синхронно с наблюдением количества ТС в этом потоке.

Одной из проблем таких наблюдений является их низкая достоверность. Поскольку наблюдений за состоянием окружающей среды и метеопараметров вряд ли будет достаточно для построения и идентификации комплексной физико-математической модели переноса газов в воздухе, следует применять различные подходы к агрегированию данных и некоторые статистические методы.

Весь этот комплекс задач пока является нерешенным в случае, когда нужно провести оперативное измерение заданных показателей состояния атмосферного воздуха в заданных местах синхронно с мониторингом источников его загрязнения, осуществить их оперативную обработку и при этом удешевить технологию за счет использования

универсальных компьютерных мобильных устройств. Созданию технологии для планирования наблюдений и обработки таких данных и посвящена эта работа.

Целью нашего исследования является разработка метода и технологии мониторинга состояния атмосферного воздуха с помощью универсальной информационно-измерительной системы с использованием мобильных устройств, то есть системы, все операции обработки которой осуществляются на основе универсальных мобильных компьютерных устройств (смартфон, планшет, нетбук, ноутбук и т. д.). При этом важно предусмотреть синхронизацию данных наблюдений за состоянием атмосферного воздуха и за источникам выбросов в него.

Идея решения поставленной задачи

Как было отмечено выше, для оперативного мониторинга атмосферного воздуха оптимальным является использование информационно-измерительной системы (ИИС), которую устанавливают на транспортное средство (автомобиль, трамвай, велосипед, мультикоптер, беспилотный летательный аппарат и т. д.). Для обеспечения широкого применения технологии целесообразно использовать ИИС на основе современных мобильных устройств, например, с использованием смартфонов для геолокации места наблюдения, хранения, обработки и передачи данных на сервер, а для сбора данных с датчиков могут использоваться, например, Arduino, RaspberryPi и их аналоги [3]. Подобная техническая реализация ИИС для оперативного мониторинга является более дешевой и распространённой, чем известные промышленные аналоги, что обеспечило бы более широкий круг применения и сбора большого объема данных, особенно с привлечением активной общественности.

Для решения основной задачи, связанной с измерением состояния атмосферного воздуха в городе и выявлением главных негативных тенденций, проблемных мест, а в идеале – и причин загрязнения воздуха необходимо разработать соответствующую информационную технологию сбора и обработки данных мониторинга.

Конечно, наблюдения и прогнозирование загрязнения атмосферного воздуха проводят во многих странах на протяжении десятков лет. Среди наиболее распространенных моделей прогнозирования состояния качества воздуха можно выделить следующие: SOSE, TAPM, ОНД-86 [4, 5]. Основными факторами, которые объединяют эти модели, являются большие объемы данных, необходимых для правильной оценки загрязнения. Важно то, что некоторые модели в качестве начальных данных требуют значения концентраций загрязняющих веществ в стационарном источнике выброса или объемов выбросов продуктов производства промышленных объектов. В то же время в представленном методе оценки качества атмосферного воздуха основным источником выбросов опасных веществ является автомобильный транспорт, движущийся по главным автомобильным магистралям города.

Для решения поставленной задачи предлагаем такие метод и технологию:

I. Определение условий проведения и планирования наблюдений.

Определение K показателей $F_k, k = \overline{1, K}$, которые необходимо мониторить, выбор датчиков и подключение их к ИИС.

Выбор оптимального маршрута, на котором возможно расположение проблемных мест и источников чрезмерного загрязнения и разбиение его на M характерных участков длиной $L_j, j = \overline{1, M}$. Подсчет общего пути движения ТС с ИИС:

$$L = \sum_{j=1}^M L_j.$$

Выбор оптимальной скорости движения $V_j, j = \overline{1, M}$, транспортного средства в зависимости от быстродействия датчиков и минимального количества измерений на каждом

участке (по самому медленному из них со временем срабатывания t , $V_j = \frac{L_j}{t \cdot N_j}$).

Задаем скорость V_j , длину участка L_j , интервал между измерениями датчика t и определяем количество точек наблюдения L_j , $j = \overline{1, M}$.

Определение метеоданных (направления и силы ветра, осадков и т.п.).

Определение места размещения датчиков на транспортном средстве.

II. Сбор данных наблюдения.

С использованием датчиков формируют массив показателей $F_{k,j}$, $k = \overline{1, K}$, $j = \overline{1, M}$.

С использованием GPS-датчика определяют координаты последовательных мест расположения на всех участках с максимальным быстродействием U_q , $q = \overline{1, Q}$.

С использованием видеорегистратора определяем количество стационарных и передвижных источников загрязнения на маршруте, которые могут влиять на состояние воздуха вдоль выбранного маршрута движения транспортного средства с датчиками R_j , $j = \overline{1, M}$.

Сохраняем собранные и оцифрованные данные на носителе.

III. Обработка данных наблюдения.

На основе средней скорости движения транспортного средства на каждом участке V_j определяют линейные координат мест, в которых проводили измерение $F_{k,j}$.

Геокодирование результатов геолокации средствами геоинформационных систем (ГИС), построение траектории движения транспортного средства на электронной карте местности и определение пространственных координат U_q для каждой линейной координаты из п.1.

На каждом участке определяют количество стационарных и передвижных потенциальных источников загрязнения.

Считают количество машин попутного направления, которые находились на участке, когда авто с ИИС было в начале участка (рис. 1).

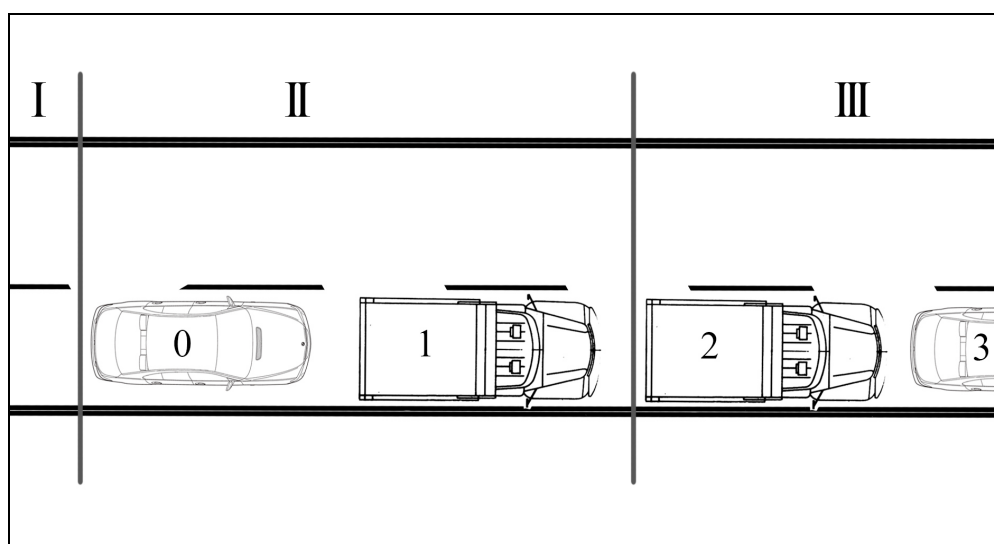


Рис. 1. Схематическое изображение принципов измерения на участке концентрации СО в атмосферном воздухе дороги

Теоретически при обработке результатов с участка измерений оператор системы должен подсчитывать не только те источники загрязнения, которые находились на этом участке, но и те, которые были на соседних участках, но в первом приближении их влиянием можно пренебречь, поскольку даже при отсутствии ветра ТС сами вызывают движение воздушных

масс, так что на самой дороге основное загрязнение вызывают ТС, недавно проехавшие именно по ней. Конечно, есть много случаев, когда это не так, тогда методологию подсчета на этом этапе нужно соответственно изменить. Также в первом приближении ТС с ИИС источником загрязнения не считают (исключая случаи, когда приходилось останавливаться или притормаживать по определенным причинам, тогда и это ТС следует считать, поскольку выхлопные газы «догоняли» датчики ИВС на этом ТС).

Например, при подсчете источников загрязнения с участка под номером Π оператор отнес к источникам загрязнения только ТС под номером 1, поскольку ТС №0 является ТС с установленными сенсорами).

VI. Построение регрессионной зависимости между данными мониторинга СО и количеством ТС с использованием ГИС-технологий и статистических методов.

Экспорт полученных данных мониторинга F_j и R_j для построения массива точечных объектов на электронной карте местности.

Построение матрицы поверхности методом средневзвешенной интерполяции, логарифмическим методом или методом крикинга.

Усреднение концентрации показателя $F_{серj}$ на каждом участке.

Проведение агрегирования условий движения ТС путем перехода к приведенному количеству ТС R' на участках с учетом соответствующих коэффициентов:

$$R' = R \cdot k_r \cdot k_d \cdot k_m,$$

где R – фактическое количество ТС, шт.; k_r – коэффициент, учитывающий снижение или увеличение выбросов СО от ТС в зависимости от характера рельефа; k_d – коэффициент, учитывающий снижение или увеличение выбросов СО от ТС из-за действия дорожных знаков (остановка перед пешеходным переходом, ограничения в скорости и т.д.); k_m – коэффициент, учитывающий повышенный выброс СО от ТС относительно усредненного ТС из-за того, что это ТС является грузовиком, автобусом, легковым автомобилем и т.д.

Определение показателя R_j , $j = \overline{1, M}$ происходит в полуавтоматическом режиме. Оператор системы, просматривая данные видеорегистратора, должен подсчитать значение показателя R_j для каждого участка длиной L_j . Для облегчения этой операции студентом Винницкого национального технического университета А. В. Крылыком было создано специальное программное обеспечение для синхронизации видео с ГИС.

Проведение корреляционного анализа между средней концентрацией показателя $F_{серj}$ на каждом участке и средним количеством автомобилей R'_j на каждом участке.

Построение регрессионных зависимостей между $F_{сер}$ и R' , интегральными для всех участков, что позволит спрогнозировать загрязнение воздуха в городе.

Оценка погрешности измерения и расчета.

Анализ ошибок. Определение наименьшей погрешности измерения.

С помощью «Google.Traffic» или «Яндекс.Пробки» просмотр прогнозируемой загруженности автомобильных дорог и на ее основе — прогноз распространения загрязнения по городу.

Пример использования технологии

Авторами была разработана универсальная информационно-измерительная система оперативного экологического мониторинга с использованием мобильных устройств [6], адаптированная к измерению концентрации СО в атмосферном воздухе. Было спланировано проведение наблюдений по автодорогам м. Винницы.

Маршрут движения ТС с ИИС в городе был выбран таким образом, чтобы он проходил

The map shows the area around the Kyiv National University of Construction and Architecture. The university is located on the right side of the map, near the intersection of the Kyiv National University of Construction and Architecture and the Kyiv National University of Construction and Architecture. The map also shows the Kyiv National University of Construction and Architecture, the Kyiv National University of Construction and Architecture, and the Kyiv National University of Construction and Architecture.

Наукові праці ВНТУ, 2015, № 4



Рис. 3. Интерполяция данных мониторинга методом крикинга вокруг территории ВНТУ (Барское шоссе, ул. Воинов-интернационалистов, ул. Келецкая)

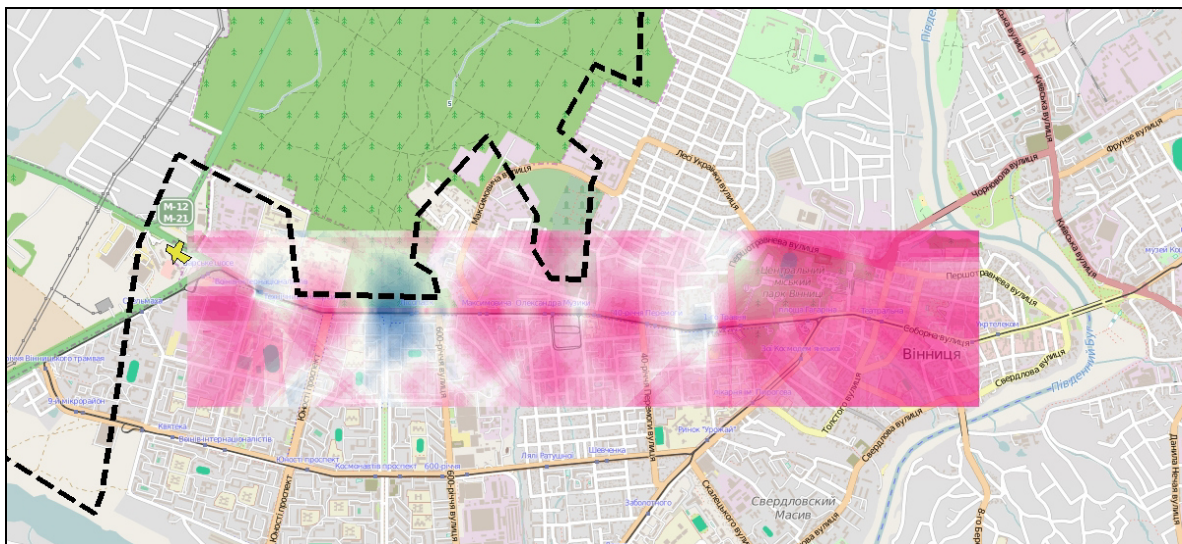


Рис. 4. Интерполяция данных мониторинга методом крикинга по второму маршруту

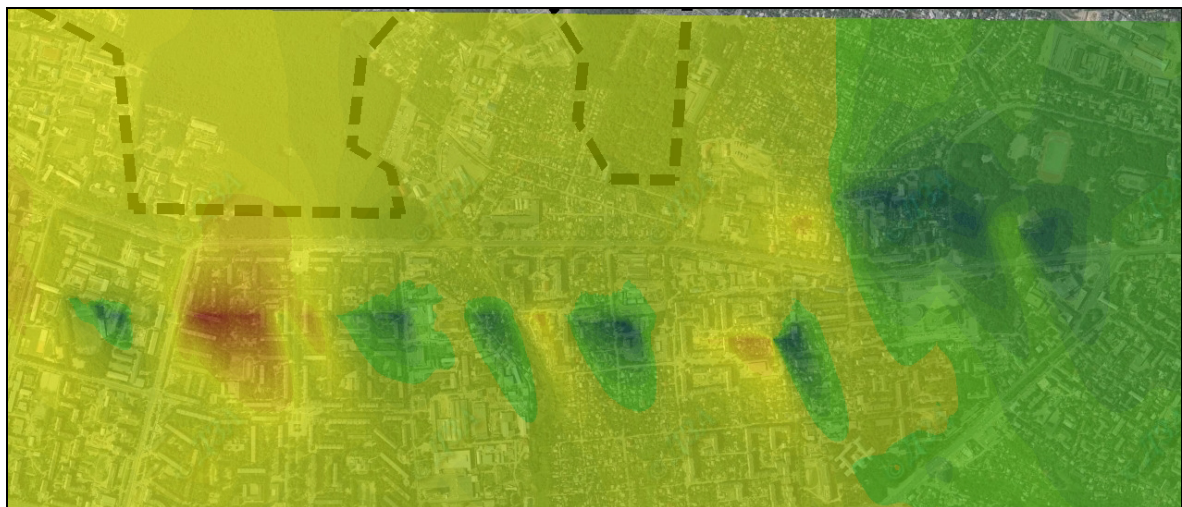


Рис. 5. Изображение матрицы концентрации CO в атмосферном воздухе г. Винницы по второму маршруту

По результатам обработки полученных данных экспериментов можно внести следующие

Наукові праці ВНТУ, 2015, № 4

рекомендации:

- увеличить количество входных данных в систему;
- разбивать общий путь L на большее количество отрезков L_j ;
- повысить синхронизацию взаимодействия датчиков. Для реализации данной рекомендации предлагаем, чтобы коэффициент кратности интервала работы датчиков различного типа максимально приближался к целому числу. Определяем время срабатывания датчиков СО (T_U) и GPS (T_W), таким образом:

$$v = \frac{T_U}{T_W}.$$

Для второго маршрута была построена регрессионная зависимость между данными мониторинга $F_{сер}$ и R' с использованием ГИС-технологий и статистических методов по предложенной технологии, в частности вычислены $F_{серj}$ и R'_j и проведен корреляционный анализ зависимости концентрации распространения СО $F_{сер}$ от R' для всего маршрута (табл. 1).

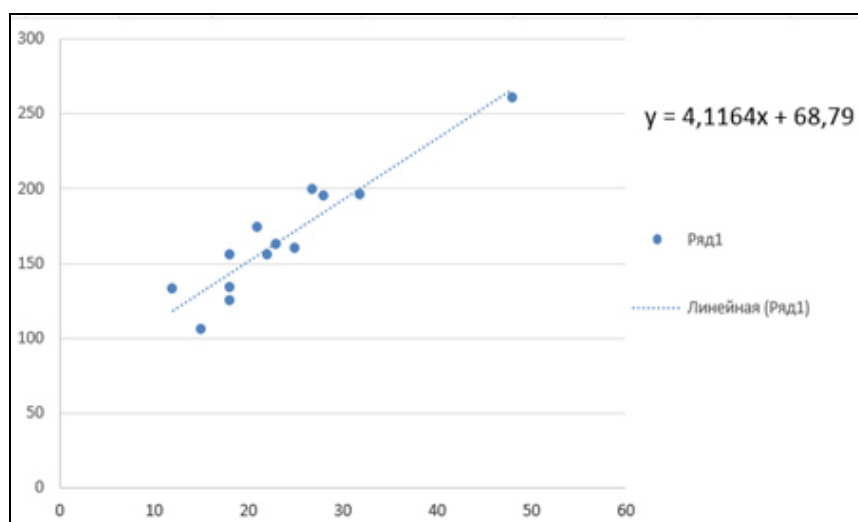
Значение коэффициента корреляции – больше 0,9. Следовательно, можно говорить о том, что имеет место сильная стохастическая взаимосвязь между концентрацией распространения СО и приведенным количеством ТС на улицах города.

Таблица 1

Зависимость концентрации СО от приведенного количества транспортных средств на участках второго маршрута

Номер участка j	Средняя концентрация СО $F_{серj}$	Приведенное количество автомобилей R'_j
1	196	32
2	156	22
3	133	12
4	195	28
5	261	48
6	174	21
7	156	18
8	125	18
9	160	25
10	106	15
11	163	23
12	199	27
13	134	18
Корреляция	0,93	

Наличие корреляции позволяет построить зависимость между $F_{сер}$ и R' , позволяющую прогнозировать загрязнение воздуха в городе. Проведем идентификацию этой зависимости тремя видами регрессии: линейной (рис. 6), логарифмической и экспоненциальной.

Рис. 6. График линейной зависимости между F и R

Определяем погрешности линейной (рис. 7), логарифмической и экспоненциальной зависимостей (табл. 2).

Y2	DY2
200,515	4,5148
159,351	3,3508
118,187	14,8132
184,049	10,9508
266,377	5,3772
155,234	18,7656
142,885	13,1148
142,885	17,8852
171,7	11,7
130,536	24,536
163,467	0,4672
179,933	19,0672
142,885	8,8852
	153,428
Погрешка2	7,10973

Рис. 7. Погрешность линейной зависимости

Таблица 2

Значения полученных погрешностей

	Погрешность линейной зависимости	Погрешность логарифмической зависимости	Погрешность экспоненциальной зависимости
Значение, %	7,1	8,2	7,8

Проанализировав ошибки, полученные экспериментальным путем, можно сделать вывод, что лучшее прогнозирование загрязнения воздушного бассейна города можно осуществить с помощью линейной зависимости между $F_{сер}$ и R' , так как погрешность аппроксимации этой зависимостью меньше, чем логарифмической и экспоненциальной зависимостей.

Выводы

Предложены новые метод и технология мониторинга и оценки состояния атмосферного воздуха, основным фактором загрязнения которого являются выбросы автомобильного транспорта на магистралях города. Основным отличием предложенного метода от существующих аналогов является использование в качестве входных параметров данных, полученных от универсальной информационно-измерительной системы, построенной на

основе мобильных устройств и установленной на транспортном средстве. Кроме того, технология предусматривает возможность синхронизации наблюдений состояния атмосферного воздуха с данными наблюдений параметров источников его загрязнения. Это позволяет значительно уменьшить время на сбор и увеличить объем и релевантность данных наблюдений по сравнению с аналогами. Также предложенный метод за счет универсального формата полученных расчетов позволяет визуализировать качественные показатели состояния атмосферного воздуха на многих ГИС, при необходимости идентифицировать регрессионную модель и с ее помощью проводить прогнозирование качества воздуха в зависимости от ожидаемого количества транспортных средств и других условий.

Предложенная технология открывает для общественных, государственных и научных организаций широкие возможности по проведению первичного независимого оперативного мониторинга состояния воздуха в городе, что, в свою очередь, предоставит основания для уточнения результатов измерения с помощью специализированного измерительного оборудования. Широкомасштабный мониторинг позволит определить проблемные места экологического характера наряду с наиболее уязвимыми объектами инфраструктуры (больницы, школы и т.д.), объектами природно-заповедного фонда и разработать рекомендации по улучшению состояния воздуха в городе. Важным преимуществом разработанной технологии является возможность использования технологии и для других целей: мониторинг состояния вод и других составляющих и объектов окружающей среды, загруженности автомагистралей, движения общественного и коммерческого транспорта и т. п.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Моніторинг довкілля: підручник / [Боголюбов В. М., Клименко М. О., Мокін В. Б. та ін.] ; під ред. В. М. Боголюбова. — [2-е вид., перероб. і доп.]. — Вінниця : ВНТУ, 2010. — 232 с.
2. Mendez D. P-Sense: A participatory sensing system for air pollution monitoring and control / D. Mendez, A. J. Perez, M. A. Labrador, J. J. Marron // Pervasive Computing and Communications Workshops. 2011. — P. 344 – 347.
3. Chaudhry V. Arduair: Air Quality Monitoring / V. Chaudhry // International Journal of Environmental Engineering and Management. — 2013. - Volume 4, Number 6. — P. 639 – 646.
4. Peter F. Nelson. Using computer modelling to simulate atmospheric movement and potential risk of pollutants from post-combustion carbon capture projects / Peter F. Nelson, Ye Wo // Energy procedia (63). — November, 2014. — P. 976 – 985.
5. Pelliccioni A. Air pollution model and neural network: An integrated modelling system / A. Pelliccioni, T. Tirabassi // Environmental Modelling & Software. — May, 2008. — Volume 21, Issue 4. — P. 539 – 546.
6. Бондалетов К. О. Мобільна аналітична комп'ютерна система для оперативного моніторингу стану атмосферного повітря міста / К. О. Бондалетов, Д. Ю. Дзюняк, В. Б. Мокін // Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи : матеріали Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції, 23-26 квітня 2015 року ВНТУ. — Вінниця. — 2015. — С. 76 – 77.

Мокин Виталий Борисович – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой компьютерного эколого-экономического мониторинга и инженерной графики.

Дзюняк Дмитрий Юрьевич – аспирант кафедры компьютерного эколого-экономического мониторинга и инженерной графики.

Винницкий национальный технический университет.

Бондалетов Константин Олегович – инженер-программист Департамента информационных технологий.

Винницкий городской совет.

Олейник Валентина Витальевна – студентка института экологической безопасности и мониторинга окружающей среды.

Винницкий национальный технический университет.