

УДК 616.248:681.5

## ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБОСТРЕНИЙ БРОНХИАЛЬНОЙ АСТМЫ

**Василевская В.С., Скудняков Ю.А.**

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Институт информационных технологий

кафедра информационных систем и технологий

E-mail: [vasilvaleriay@gmail.com](mailto:vasilvaleriay@gmail.com)

### **Аннотация:**

**Василевская В.С., Скудняков Ю.А. Программно-аппаратный комплекс для раннего предупреждения обострений бронхиальной астмы.** В работе рассматривается задача предупреждения обострений бронхиальной астмы на основе анализа данных окружающей среды. Предлагается архитектура информационной системы, осуществляющей сбор и обработку данных о концентрации взвешенных частиц (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>), метеорологических параметрах и уровне аллергенов. В качестве основного метода используется корреляционный анализ с учетом временных лагов между воздействием факторов и клиническим проявлением. На основе выявленных зависимостей формируется индекс риска и реализуется механизм оповещения пользователя. Показана возможность практического применения предложенного подхода и определены направления дальнейшего развития, связанные с персонализацией прогнозирования.

**Ключевые слова:** Бронхиальная астма, анализ данных, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, корреляционный анализ, интернет вещей, прогнозирование, окружающая среда.

### **Annotation:**

**Vasilevskaya V.S., Skudnyakov Yu.A. Hardware–Software Complex for Early Detection of Bronchial Asthma Exacerbations.** This paper examines the problem of preventing asthma exacerbations based on environmental data analysis. It proposes the architecture of an information system for collecting and processing data on particulate matter concentrations (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>), meteorological parameters, and allergen levels. The primary method utilizes correlation analysis, taking into account time lags between exposure to factors and clinical manifestations. Based on the identified relationships, a risk index is generated and a user alert mechanism is implemented. The feasibility of the proposed approach is demonstrated, and future development directions related to personalize forecasting are identified.

**Keywords:** Bronchial asthma, data analysis, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, correlation analysis, Internet of Things, forecasting, environment.

### **Общая постановка проблемы**

Бронхиальная астма является одним из наиболее распространённых хронических заболеваний дыхательной системы, характеризующимся наличием воспалительного процесса в дыхательных путях и сопровождающимся периодическими обострениями различной степени тяжести. Данные обострения оказывают существенное негативное влияние на общее состояние пациентов, значительно снижая качество их жизни, ограничивая физическую активность и повышая риск госпитализаций [1,2].

В ряде случаев неконтролируемое течение заболевания может приводить к развитию осложнений и увеличению нагрузки на систему здравоохранения.

Одним из ключевых факторов, провоцирующих возникновение обострений, являются параметры окружающей среды. К таким параметрам относятся уровень загрязнения атмосферного воздуха (включая концентрацию мелкодисперсных частиц и

вредных газов), метеорологические условия (температура, влажность, атмосферное давление), а также концентрация аллергенов, таких как пыльца растений, споры грибов и бытовые аллергены.

Влияние данных факторов может носить как краткосрочный, так и накопительный характер, что усложняет своевременное выявление риска ухудшения состояния пациента.

На основе результатов первичного исследования определяется направление дальнейшей диагностики и представление патологии заболевания.

Проведение инструментальных исследований позволяет подробно изучить причины возникновения и суть процесса протекания бронхиальной астмы.

Применяя одну из первоначальных и основных спирометрических методик можно оценить объем легких, функциональное состояние бронхов как важного стандарта пульмонологического обследования.

В качестве динамического исследования используют пикфлоуметрию с применением медицинского прибора, с помощью которого оценивается функциональная сохранность бронхов и легких для подтверждения диагноза.

Кроме того, дополнительно возможно применение методов диагностики путем проведения ЭКГ, рентгенографии и бронхоскопии при сомнении в результатах, полученных в процессе диагностирования.

Современные подходы к мониторингу состояния пациентов с бронхиальной астмой в большинстве случаев ориентированы на реактивное лечение, при котором терапевтические меры принимаются уже после возникновения симптомов или обострения. При этом превентивные методы, направленные на предупреждение ухудшения состояния на основе анализа внешних факторов и прогнозирования риска, остаются недостаточно развитыми и внедрёнными в практику. Это обусловлено как сложностью сбора и обработки разнородных данных, так и отсутствием интегрированных решений, объединяющих медицинские и экологические показатели.

С развитием технологий интернета вещей (IoT), а также с ростом доступности открытых экологических данных и сенсорных систем мониторинга окружающей среды, появляется возможность создания интеллектуальных систем раннего предупреждения обострений бронхиальной астмы. Такие системы способны в режиме, близком к реальному времени, анализировать совокупность факторов риска, выявлять потенциально опасные условия и информировать пациента или медицинский персонал о вероятности ухудшения состояния.

Целью данной работы является разработка подхода к оценке риска обострений бронхиальной астмы на основе корреляционного анализа данных окружающей среды, включая выявление значимых зависимостей между внешними факторами и состоянием пациента, а также проектирование архитектуры соответствующей информационной системы. Предполагается, что предложенный подход позволит повысить эффективность профилактики обострений, снизить частоту госпитализаций и улучшить качество жизни пациентов за счёт своевременного информирования и принятия превентивных мер.

### **Исследования**

Обострения бронхиальной астмы в значительной степени обусловлены воздействием различных факторов окружающей среды, которые могут выступать как триггерами острых состояний, так и факторами, усугубляющими хроническое течение заболевания. Влияние этих факторов носит комплексный характер и зависит от их сочетания, интенсивности и длительности воздействия. Наиболее значимыми среди них являются концентрация взвешенных частиц в атмосферном воздухе (PM), метеорологические условия и уровень биологических аллергенов.

Взвешенные частицы (PM<sub>2.5</sub> и PM<sub>10</sub>) представляют собой аэрозольные загрязнители, состоящие из смеси твёрдых и жидких микрочастиц, находящихся в воздухе. Основными

источниками их образования являются выбросы автотранспорта, промышленная деятельность, сжигание топлива и природные процессы. Частицы PM2.5 обладают особенно высокой проникающей способностью: они способны проникать в глубокие отделы дыхательной системы, включая бронхиолы и альвеолы, вызывая воспалительные реакции и повреждение тканей. Это приводит к повышению чувствительности дыхательных путей и увеличению вероятности развития обострений бронхиальной астмы [1-4]. Согласно рекомендациям World Health Organization, существует прямая зависимость между увеличением концентрации мелкодисперсных частиц в воздухе и ростом заболеваемости респираторными заболеваниями, а также частотой госпитализаций.

Метеорологические параметры, такие как температура воздуха, относительная влажность, атмосферное давление и скорость ветра, также оказывают значительное влияние на состояние пациентов с бронхиальной астмой. Резкие колебания температуры могут вызывать рефлекторный бронхоспазм, особенно при вдыхании холодного воздуха. Высокая влажность способствует увеличению концентрации биологических аллергенов и развитию плесневых грибов, тогда как низкая влажность может приводить к пересушиванию слизистой оболочки дыхательных путей. Кроме того, погодные условия влияют на распространение загрязняющих веществ в атмосфере, что дополнительно усиливает их воздействие на организм человека.

Дополнительным значимым фактором являются аллергены, включая пыльцу растений, споры грибов, клещей домашней пыли и другие биологические агенты. Их концентрация в окружающей среде подвержена сезонным колебаниям и зависит от климатических условий и географических особенностей региона. Воздействие аллергенов особенно критично для пациентов с аллергической формой бронхиальной астмы, поскольку приводит к активации иммунного ответа и развитию воспалительных процессов в дыхательных путях. Данная зависимость подтверждается рядом клинических исследований, в том числе работами Jean Bousquet [5-6], в которых показана значительная роль аллергенов в развитии и обострении заболевания.

Таким образом, совокупность указанных факторов формирует сложную и динамическую среду риска, в которой вероятность возникновения обострений определяется не отдельным параметром, а их комбинацией и взаимным влиянием. Это обуславливает необходимость комплексного анализа данных окружающей среды и разработки методов, позволяющих учитывать многомерность и изменчивость внешних воздействий при оценке состояния пациентов.

Для реализации задачи прогнозирования обострений предлагается архитектура информационной системы, основанная на принципах распределённой обработки данных и использовании edge-вычислений.

В качестве вычислительного узла используется *Raspberry Pi* (одноплатный компьютер на Linux размером с банковскую карту), обеспечивающий локальный сбор и начальную обработку данных. Это позволяет снизить задержки обработки и обеспечить автономность системы.

Архитектура системы мониторинга и прогнозирования обострений заболевания показана на рисунке 1.

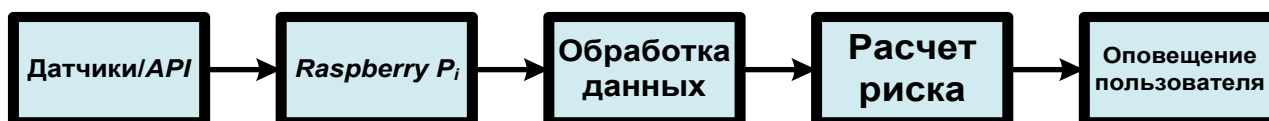


Рис. 1. Архитектура системы мониторинга и прогнозирования обострений заболевания

Источниками данных выступают:

- внешние API (метеорологические данные, качество воздуха);
- локальные сенсоры (PM2.5, PM10, температура, влажность);
- сервисы мониторинга аллергенов.

Собранные данные поступают в модуль обработки, где выполняется их предварительная фильтрация, нормализация и агрегация. Далее данные передаются в аналитический модуль, реализующий оценку риска.

Результаты анализа используются для формирования предупреждений, направляемых пользователю через интерфейс системы.

Рассматриваемая архитектура соответствует современным тенденциям развития интернета вещей, описанным в работах InternetofThings: A SurveyonEnablingTechnologies [7], и обеспечивает масштабируемость и гибкость системы.

В качестве основного метода оценки взаимосвязи между параметрами окружающей среды и обострениями бронхиальной астмы в данной работе используется корреляционный анализ. Данный метод позволяет количественно оценить степень зависимости между различными переменными и выявить наличие статистически значимых связей между воздействием внешних факторов и изменениями состояния пациента.

Для количественной оценки зависимости применяется коэффициент корреляции Пирсона, широко используемый в статистическом анализе для определения силы и направления линейной связи между двумя переменными [8].

Особенностью рассматриваемой задачи является наличие временной задержки между воздействием факторов окружающей среды и проявлением симптомов заболевания. Реакция организма на изменение качества воздуха, погодных условий или уровня аллергенов может проявляться не мгновенно, а спустя определённый промежуток времени — от нескольких часов до нескольких суток. В связи с этим вводится понятие временного лага, учитывающего сдвиг во времени между наблюдаемыми параметрами и откликом системы.

Корреляция рассчитывается с учетом временного сдвига:

$$r = \text{corr}(X(t), Y(t + \Delta t)),$$

где:

- $X(t)$  – значение экологического параметра (например, PM2.5);
- $Y(t + \Delta t)$  – наличие симптомов через промежуток времени  $\Delta t$ .

Для учёта данного эффекта проводится анализ корреляции с различными значениями временного лага, при котором один из временных рядов (например, концентрация PM2.5) последовательно сдвигается относительно другого (например, показатели симптомов пациента). Это позволяет определить временной интервал, при котором наблюдается максимальная корреляция, что может свидетельствовать о наиболее вероятном времени реакции организма на воздействие конкретного фактора.

Для наглядного представления полученных результатов используется графическая визуализация зависимости коэффициента корреляции от величины временного лага. Такой подход позволяет определить интервал времени, при котором влияние фактора является наиболее значимым, а также оценить характер этой зависимости.

Анализ графика дает возможность выявить оптимальный временной сдвиг между изменениями параметров окружающей среды и проявлением симптомов заболевания, что важно для повышения точности прогнозирования.

Дополнительно следует отметить, что форма зависимости может различаться для разных факторов окружающей среды, что отражает индивидуальные особенности их воздействия на организм. Учет этих различий позволяет более точно настраивать модель оценки риска и повышает её практическую применимость. На рисунке 2 представлена

зависимость коэффициента корреляции между концентрацией PM2.5 и симптомами от временного лага.

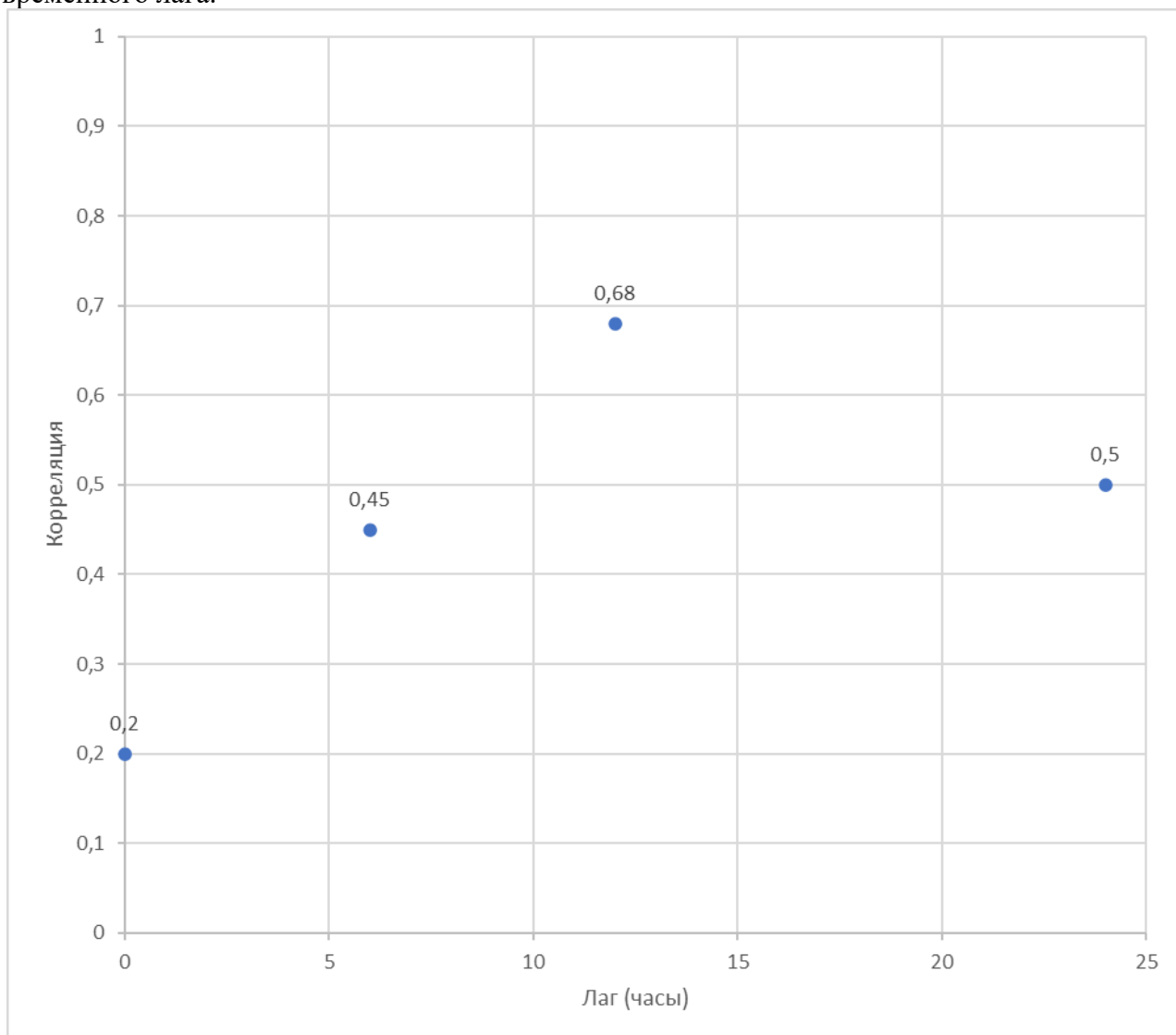


Рис.2. Зависимость коэффициента корреляции между концентрацией PM2.5 и симптомами от временного лага

На основе полученных коэффициентов формируется интегральный показатель риска:

$$Risk = \sum_{i=1}^n w_i \cdot X_i,$$

где:

- $X_i$  – нормализованные значения факторов;
- $w_i$  – веса, пропорциональные коэффициентам корреляции.

Такой подход обеспечивает интерпретируемость модели и позволяет учитывать вклад каждого фактора в общий риск.

Работа системы реализуется в виде последовательности этапов:

- сбор данных из внешних источников и сенсоров;
- предобработка данных (очистка, нормализация, синхронизация по времени);
- расчет корреляционных зависимостей с учетом временных лагов;
- формирование интегрального показателя риска;

– генерация предупреждений при превышении заданных пороговых значений.

Результаты анализа могут быть представлены в виде уровня риска (низкий, средний, высокий), что упрощает интерпретацию для пользователя.

В качестве одного из ключевых направлений дальнейшего развития разрабатываемой системы предлагается расширение её функциональных возможностей за счёт внедрения мобильного приложения, ориентированного на взаимодействие с конечным пользователем.

Такое приложение позволит пациенту в удобной форме фиксировать субъективные симптомы, общее самочувствие, а также эпизоды обострений бронхиальной астмы, включая их частоту, продолжительность и предполагаемые причины.

Дополнительно может быть реализована возможность ввода информации о принимаемых лекарственных препаратах и уровне физической активности.

Систематический сбор пользовательских данных обеспечит формирование индивидуальной базы наблюдений для каждого пациента, отражающей особенности течения заболевания в динамике. Наличие таких данных создаёт предпосылки для проведения более глубокого анализа, направленного на выявление скрытых закономерностей и триггеров, характерных для конкретного пользователя, что невозможно при использовании исключительно обезличенных или усреднённых данных.

Интеграция пользовательских данных с параметрами окружающей среды, такими как уровень загрязнения воздуха, метеорологические условия и концентрация аллергенов, позволит формировать комплексные обучающие выборки.

На основе этих выборок становится возможным применение методов машинного обучения для построения прогностических моделей. Использование таких методов обеспечит постепенный переход от обобщённых моделей оценки риска, основанных на среднестатистических зависимостях, к персонализированным моделям прогнозирования, учитывающим индивидуальные особенности организма пациента, его чувствительность к различным внешним воздействиям и историю заболевания.

Персонализированные модели прогнозирования могут учитывать широкий спектр факторов, включая:

- индивидуальные реакции пациента на концентрации взвешенных частиц PM<sub>2.5</sub> и PM<sub>10</sub>, включая пороговые значения, при которых возрастает риск обострения;
- влияние метеорологических условий (температура, влажность, атмосферное давление) и их резких изменений на состояние дыхательной системы;
- воздействие аллергенов с учётом сезонности и географических особенностей;
- динамику субъективных симптомов, фиксируемых пользователем, а также их взаимосвязь с объективными параметрами окружающей среды.

Дополнительно перспективным направлением является внедрение адаптивных алгоритмов, способных автоматически корректировать модель прогнозирования по мере накопления новых данных, что позволит повышать точность предсказаний с течением времени.

Также возможно использование методов интеллектуального анализа данных для выявления ранее неизвестных факторов риска и сложных нелинейных зависимостей между параметрами.

Таким образом, интеграция мобильного приложения с системой мониторинга окружающей среды и аналитическим модулем позволит не только повысить точность прогнозирования обострений бронхиальной астмы, но и трансформировать систему в полноценный инструмент профилактического здравоохранения.

Такая система будет способствовать раннему выявлению неблагоприятных условий, своевременному принятию превентивных мер и, как следствие, снижению частоты обострений и улучшению качества жизни пациентов с хроническим и заболеваниями дыхательной системы.

### **Выводы**

В данной работе предложен подход к обнаружению и предупреждению обострений бронхиальной астмы на основе анализа данных окружающей среды.

Разработана архитектура информационной системы, обеспечивающая сбор и обработку данных о концентрации PM<sub>2.5</sub> и PM<sub>10</sub>, метеорологических параметрах и уровне аллергенов, а также оценку риска с использованием корреляционного анализа с учётом временных лагов между воздействием факторов и проявлением симптомов.

Предложенный метод отличается простотой реализации, интерпретируемостью и возможностью быстрого внедрения, что делает его практически применимым для пациентов и специалистов здравоохранения.

Результаты анализа позволяют формировать предупреждения о возможных обострениях, обеспечивая превентивный контроль состояния пациента.

В перспективе планируется расширение функциональности системы за счёт внедрения мобильного приложения для фиксации субъективных симптомов пользователей и использования этих данных для построения персонализированных моделей прогнозирования с помощью методов машинного обучения.

Это позволит повысить точность оценки риска и создать инструмент персонального мониторинга, способствующий улучшению качества жизни пациентов с хроническими заболеваниями дыхательной системы.

### **Литература**

1. Глобальные рекомендации ВОЗ по качеству воздуха: твердые частицы (PM<sub>2.5</sub> и PM<sub>10</sub>), озон, диоксид азота, диоксид серы и монооксид углерода. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>.

2. Венкатесан, П. (2023). Отчет GINA за 2023 год по астме / П. Венкатесан // The Lancet. Респираторная медицина, 11(7), 589. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(23\)00230-8](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(23)00230-8).

3. Докери, Д.В. Влияние загрязнения воздуха твердыми частицами на здоровье / Д.В. Докери. – Ann Epidemiol, 2009 апрель. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3367838/>

4. Шварц, Дж. Загрязнение воздуха и госпитализации по поводу респираторных заболеваний / Дж. Шварц // Эпидемиология. Январь 1996 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8664396/>.

5. Буске, Дж. и др.; Всемирная организация здравоохранения; GA(2)LEN; AllerGen. Аллергический ринит и его влияние на астму (ARIA) — обновление 2008г. (в сотрудничестве с Всемирной организацией здравоохранения, GA(2)LEN и AllerGen) / Дж. Буске // Аллергия. Апрель 2008г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18331513/>.

6. Назарова, Е.В., Хаитов, М.Р. Особенности структуры аллергических заболеваний и спектра сенсibilизации в Российской Федерации с учетом климатогеографических особенностей регионов / Е.В. Назарова, М.Р. Хаитов // Российский Аллергологический журнал. – 2024. – Т. 21, №4. – С. 440-450.

7. Джаявардхана, Губби. Интернет вещей (IoT): видение, архитектурные элементы и будущие направления / Губби Джаявардхана, Буйя Раджкумар, Славен Марушич, Маримуту Паланисвами // Компьютерные системы будущего поколения, Том 29, Выпуск 7, 2013г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167739X13000241>.

8. Джеймс, Г. Введение в статистическое обучение / Г. Джеймс, Д. Виттен, Т. Хасти, Р. Тибширани // Springer, 2013. – 441с.