



## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ РАБОТНИКОВ СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

*Т. А. Корольков, С. А. Дерябин, И. О. Темкин, Рзазаде Ульви Азар оглы, А. А. Валова*

**Корольков Тимофей Алексеевич**, аспирант, Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, г. Москва, Российская Федерация;

**Дерябин Сергей Андреевич**, старший преподаватель, заведующий лабораторией кафедры автоматизированных систем управления, Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, г. Москва, Российская Федерация; тел.: +7(499)230-24-34; e-mail: deryabin.sa@misis.ru;

**Темкин Игорь Олегович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления, Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, г. Москва, Российская Федерация; тел.: +7(495)638-44-74 (044-74); e-mail: temkin.io@misis.ru;

**Рзазаде Ульви Азар оглы**, старший преподаватель кафедры автоматизированных систем управления, Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, г. Москва, Российская Федерация;

**Валова Анастасия Александровна**, ассистент кафедры автоматизированных систем управления, Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, г. Москва, Российская Федерация; тел.: +7(499)230-24-34; e-mail: a.valova@misis.ru

Статья посвящена описанию разработки модели, необходимой для осуществления автоматизированного контроля деятельности работников строительного комплекса с целью повышения безопасности и эффективности производственных процессов. В статье проводится анализ существующих решений в данной области, в рамках которого обсуждаются недостатки подходов к организации мониторинга в строительстве. Раскрываются основные принципы функционирования разработанной специализированной программно-аппаратной системы, представляющей из себя комплекс носимых устройств «умная спецодежда» и программного обеспечения на базе методов интеллектуального анализа данных. Дается описание процесса построения модели идентификации деятельности строителя на основе классифицирующих алгоритмов машинного обучения, включая этапы сбора и предобработки данных, полученных с использованием аппаратных средств системы. Приводятся результаты построения модели, а также ее работы в рамках апробации прототипа системы на одном из строительных объектов г. Москвы в рамках совместного проекта Национального исследовательского технологического университета МИСиС, Департамента градостроительной политики и Департамента информационных технологий г. Москвы.

**Ключевые слова:** мониторинг работников, носимые устройства, умная спецодежда, Vision Zero, Индустрия 4.0, Правила безопасности и охраны труда, классификационные модели, машинное обучение, строительный комплекс, промышленный интернет вещей.

## MODEL DEVELOPMENT TO IDENTIFY ACTIVITIES OF CONSTRUCTION LABOURERS

*T. A. Korolkov, S. A. Deryabin, I. O. Temkin, Rzazade Ulvi Azar oglu, A. A. Valova*

**Korolkov Timofey Alekseyevich**, Post-graduate student, National Research Technological University MISiS, Moscow, Russian Federation;

**Deryabin Sergey Andreyevich**, Senior Lecturer, Head of the Laboratory of the Department of Automated Control Systems, National Research Technological University MISiS, Moscow, Russian Federation; phone: +7(499)230-24-34; e-mail: deryabin.sa@misis.ru;

**Temkin Igor Olegovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Automated Control Systems, National Research Technological University MISiS, Moscow, Russian Federation; phone: +7(495)638-44-74 (044-74); e-mail: temkin.io@misis.ru;

**Rzazade Ulvi Azar oglu**, Senior Lecturer, Department of Automated Control Systems, National Research Technological University MISiS, Moscow, Russian Federation;

**Valova Anastasiya Aleksandrovna**, Assistant of the Department of Automated Control Systems, National Research Technological University MISiS, Moscow, Russian Federation; tel.: +7(499)230-24-34; e-mail: a.valova@misis.ru

The article is devoted to the description of the development of an approach to the automated control of the construction complex workers activities in order to improve the safety and efficiency of production processes. The article analyzes the existing solutions in this area, in which the shortcomings of approaches to the organization of monitoring in construction are discussed. The main principles of functioning of the developed specialized software and hardware system, which is a complex of wearable devices "smart overalls" and software based on data mining methods, are revealed. A description of the process of constructing a model for identifying the builder's activity based on classifying machine learning algorithms, including the stages of collecting and preprocessing data obtained using the system hardware is given. The results of building a model, as well as its work while testing a prototype of the system at one of the construction sites in Moscow, are presented in frame of a joint project of the National Research Technological University MISiS, the Department of Urban Planning Policy and the Department of Information Technologies of Moscow.

**Keywords:** employee monitoring, wearable devices, smart workwear, Vision Zero, Industry 4.0, Occupational Safety and Health Regulations, classification models, machine learning, construction sites, industrial Internet of Things.

## Введение

Как правило, контроль за деятельностью работников на строительной площадке осуществляется путем непосредственного наблюдения за их деятельностью руководителями бригад. При этом ввиду масштабы объектов строительства и фактической невозможности наблюдения за всеми работниками одновременно, контроль соблюдения Правил безопасности и охраны труда (ПБиОТ), а также технологий строительства, являются непростыми задачами. Более того, увеличение числа новых строительных объектов и острая нехватка квалифицированных кадров требуют новых более эффективных методов мониторинга строительных процессов [1].

Сегодня в строительстве для этих целей широко используются стационарные видеокамеры, однако это не является рациональным способом наблюдения за деятельностью работников внутри помещений [2]. Нерациональность данного подхода обусловлена высокой стоимостью и технологической сложностью установки камер внутри динамически изменяющегося объекта, которым, очевидно, является строительная площадка. Поэтому использование камер сегодня ограничено наблюдением за открытой частью стройки и чаще всего используется только в рамках систем контроля и управления доступами на пропускных пунктах.

Для решения ряда задач мониторинга в строительной отрасли набирает популярность использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА, дронов), обеспечивающих легкий доступ к труднодоступным и сложным частям производственного объекта. БПЛА способны предоставлять данные аэрофотосъемки, фотограмметрическую и иную радарную визуальную информацию, что позволяет детально контролировать ход реализации строительного проекта в режиме реального времени [3–5]. Однако использование беспилотных летательных аппаратов также не обеспечивает необходимый уровень детализации информации о деятельности работников строительной площадки внутри помещений, не говоря о возникающих трудностях, связанных с привлечением лицензированных пилотов и соблюдением требований Федеральных правил использования воздушного пространства Российской Федерации.

Таким образом, для осуществления мониторинга деятельности работников на строительной площадке наиболее целесообразным является использование персональных носимых устройств, таких как умные часы, трекинговые устройства и др., обеспечивающих сбор данных о их деятельности в режиме реального времени. Подобные устройства уже активно применяются в строительной отрасли, но чаще всего направлены на обеспечение коммуникаций между работниками, отслеживание их спутникового местоположения и общей физической активности. Вследствие того, что данные

устройства не могут фиксировать всю необходимую информацию о действиях работников, под которой понимается изменение положений частей тела во времени, по результатам анализа получаемых от них данных, практически невозможно иметь достоверную информацию о потенциальных рисках нарушения ПБиОТ или нарушениях технологий строительства [6–8].

В связи с вышеизложенным наиболее верным решением для обеспечения непрерывного контроля безопасности и эффективности деятельности строителей нам представляется использование комплекса носимых устройств, достаточно подробно, но не избыточно описывающих динамику действий работников во времени и представляющих необходимые данные для построения программных аналитических моделей с целью автоматизации функций мониторинга. В качестве такого комплекса носимых устройств предлагается использовать разработанный программно-аппаратный комплекс «умная спецодежда», структура и функциональные возможности которого, были рассмотрены ранее [9]. В рамках данной работы дается описание этапов построения модели идентификации деятельности строителей на примере одной из строительных специальностей и некоторых результатов, полученных с использованием методов машинного обучения.

## Описание структуры и порядка организации решения

В основе построения модели идентификации деятельности работников лежит схема организации получения первичных данных, описывающих их действия в режиме реального времени. На рисунке 1 представлена структура прототипа программно-аппаратного комплекса «умная спецодежда», представляющего из себя набор связанных носимых сенсорных и вычислительных устройств.

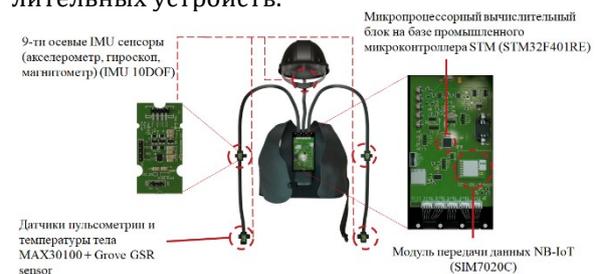


Рисунок 1. Комплекс носимых устройств для работников «умная спецодежда»

К основным элементам умной спецодежды относятся девятиосевые инерциальные измерительные устройства, размещаемые в ключевых (с точки зрения определения деятельности) частях тела – на голове, корпусе и по две единицы на руках, способные фиксировать изменение положений частей тела в пространстве. Также в состав умной спецодежды входят датчики пульсометрии и температуры тела, способствующие определению физиологического состояния работника. Все данные регистрируются с частотой 15 Гц и передаются на

сервер системы по протоколу беспроводной передачи данных NB-IoT.

Следующим этапом построения модели идентификации деятельности работника является определение порядка сбора и последующей обработки данных. Вследствие того, что деятельность работников на строительной площадке регламентируется их специальностью (операционными картами), а возможные нарушения Правил безопасности и охраны труда хорошо известны, в качестве наиболее подходящего формализма был выбран эмпирический классификационный механизм. Использование методов кластеризации, безусловно, может быть эффективно для подобных задач, при условии, что имеются полноценные сбалансированные наборы данных, а для интерпретации результатов используются достаточно сложные модели, описывающие кинематику рабочих движений. В противном случае полученные результаты будут практически бесполезны [10, 11]. В данном же случае, предполагается, что результат работы модели, представляющийся в виде определения действий работника в конкретный момент времени, в первую очередь необходим административно-управляющему персоналу строительной площадки для принятия решений по изменению процесса и оперативному реагированию в случае возникновения рисков нарушения ПБиОТ, а значит интерпретируемость результатов работы модели имеет критическую важность.

В рамках же детерминированной классификационной схемы, предполагается, что все возможные варианты действий работника заранее определены, а для построения самой модели по такой схеме необходима первичная разметка данных – сопоставление данных с одним из заранее известных классов деятельности работника. Таким образом, разметка данных (фактически, процесс обучения) является наиболее трудоемкой операцией и требует непосредственного понимания каждой единичной записи данных. Для решения этой задачи нами были использованы видеокамеры, размещаемые на козырьке каски работника и непрерывно фиксирующие его действия во время проведения полевых работ по сбору экспериментальных данных (рис. 2). Разметка данных и построение модели осуществлялись для специальности «Каменщик», для которой было рассмотрено несколько различных классификационных схем (использовались от 6 до 18 классов), однако, как показали результаты экспериментов при первичном обучении моделей, наилучшим (по точности) вариантом оказалась схема, включающая следующие 12 классов:

- a) перемещение по рабочей зоне;
- b) подъем на высоту;
- c) спуск с высоты;
- d) крепление страховки;
- e) забор раствора;

- f) нанесение раствора;
- g) забор кирпича;
- h) укладка кирпича;
- i) укладка арматурной сетки;
- j) курение;
- k) бездействие;
- l) работа с инструментом.



Рис. 2. Фрагмент видеозаписи действий работника во время полевых работ по сбору экспериментальных данных

Проведение полевых работ по сбору экспериментальных данных осуществлялось на строительном объекте в период с 30.11.2020 по 28.12.2020 г. В рамках данного этапа был собран обширный массив информации объемом более 1,6 млн строк записей, позволивший перейти к непосредственному обучению модели идентификации деятельности работников по специальности «Каменщик».

#### **Предобработка данных и выбор методов решения задачи**

В соответствии с определенной классификационной схемой для специальности «Каменщик» мы перешли к выбору способов представления данных для получения наиболее точной и производительной модели. Вследствие того, что инерциальные сенсорные устройства по своей физической природе серьезно подвержены возникновению резких пиковых значений и зашумленности в целом, для первичной обработки данных был применен фильтр Маджвика [12], позволивший существенно сократить помехи и повысить точность получаемых результатов, за счет более четкого выделения характерной для каждого из классов динамики.

Очевидно, что любая целенаправленная физическая активность человека представляет собой последовательное изменение положения частей тела во времени, т.е. мы наблюдаем семейство временных рядов. При этом было ожидаемо, что однотипные действия должны обладать схожей динамикой. Тем не менее расхождения амплитудно-частотных характеристик для действий из одного класса оказались неизбежными, а, следовательно, временной ряд являлся не стационарным и использование статистических линейных моделей в данном случае не могло привести к высокоточным результатам. Для решения подобных задач хорошо зарекомендовали себя различные алгоритмы машинного обучения, среди которых наиболее распространенными являются варианты решающих деревьев и искусственные нейронные сети.

В рамках экспериментальных работ нами были рассмотрены две основные модели – алго-

ритм «Random Forest» и многослойный перцептрон [13–15]. В ходе тестирования различных вариантов построения данных моделей мы подбিরали такой вариант, который бы отвечал точноности определения класса деятельности работника не менее 0,80 (80 %) и осуществлял операции по обработке исходных данных и возврату результата за 1 сек. с целью максимального приближения работы системы к режиму реального времени.

При этом тестировались различные варианты входного вектора данных – окно мониторинга задавалось от 1 до 15 сек., частотность временного ряда (регистрируемых данных устройствами) от 4 до 15 Гц, количество параметров от 54 до 163. Для оценки качества работы моделей проводился расчет метрик точности (доля объектов, которые определены, как положительные и таковыми являются) и полноты (доля объектов, которые определены как положительные относительно всех положительных объектов выборки). Данные метрики использовались, как базис для расчета производной метрики – F-мера (F-measure), представляющей из себя среднегармоническое значение между точностью и полнотой. В итоговом варианте вектор входных данных состоял из 54 параметров (только данные акселерометров, без гироскопов, магнитометров и пульса) с частотой 5 Гц и окном мониторинга 5 сек.

Отдельно стоит отметить, что на этапе обучения возник ряд сложностей, связанных с серьёзным дисбалансом классов в исходных данных. Такие классы, как «Спуск с высоты», «Подъём на высоту» и «Крепление страховки» были представлены наименьшим образом, поэтому исходную выборку пришлось сбалансировать путём снижения объемов данных по всем остальным видам деятельности, однако полностью устранить данную проблему не удалось, так как сокращение объема выборки приводит к серьёзным потерям в точности по другим классам, для которых снижение числа обучающих примеров вызывает эффект неразличимости классов.

### Результаты обучения моделей

По результатам обучения моделей с различными вариантами настроек наилучших показателей в точности удалось добиться с применением алгоритма «Random Forest». Большая часть классов деятельности определялась с достаточно высокой точностью от 90 до 100 %, а среднее гармоническое модели составило порядка 96 %. Однако из-за склонности данного алгоритма к переобучению при несбалансированных классах скорость вычислений превышала допустимое пороговое значение в 1 сек., а при усечении глубины и количества деревьев существенно падала точность и взвешенная F-мера. Так, обработка одного пакета данных занимала 1,9 сек. и, как следствие, процесс автоматизированного мониторинга осуществлялся с

накапливаемой задержкой во времени и не соответствовал условиям работы системы в режиме реального времени.

Таким образом итоговая модель была реализована на базе алгоритма многослойной искусственной нейронной сети с обратным распространением с двумя скрытыми слоями. Использование большего числа скрытых слоёв не приводило к значительному росту точности вычислений, но существенно замедляло процесс обучения. Результаты обучения модели (F-меры) в соответствии с заданной классификационной схемой представлены на рисунке 3.



Рис. 3. Матрица оценок точности модели мониторинга операционной деятельности по специальности «Каменищик»

Среднегармоническое модели составило 0,90 (90 %) при времени обработки данных за 0,3 сек., что более, чем удовлетворяло условиям решения задачи. Низкая точность определения классов e, f, g («Забор раствора», «Нанесение раствора», «Забор кирпича» обусловлена плохой различимостью классов в целом, вследствие фактической схожести самих действий работника, а также необходимостью снижения количества обучающих примеров для гармонизации выборки.

### Обсуждение результатов

Полученная модель мониторинга деятельности работников строительного комплекса в дальнейшем была апробирована в составе системы на реальном строительном объекте г. Москвы. На основании результатов работы модели рассчитывался ряд статистических показателей деятельности работников, которые представлены в таблице.

Таблица 1

### Показатели мониторинга деятельности работников

Показатели	Значение
Нарушение ПБиОТ (курение)	149
- среднее число нарушений в день	3,8
- среднее число нарушений в месяц	83,6
Среднее время активной работы в день (из 3 ч в день)	2 ч 24 м 56 с
Среднее время бездействия	43 м 38 с
Средняя производительность труда в день (% эффективности выполнения работ)	76,81 %

По итогу апробации модели и системы, в целом, можно говорить о положительном технико-технологическом результате, адекватности и эффективности предложенных методов и средств для их практического применения и масштабирования на строительных объектах.

Однако внедрение системы в промышленную эксплуатацию требует проведение комплекса мероприятий по доработке отдельных элементов технологической схемы решения в целях обеспечения удобства пользовательского использования и бесперебойности работы умной спецодежды: разработка версии с беспроводным соединением устройств и собственной заряжающей док-станции, изготовление сенсорных датчиков для повышенной частоты снятия данных и уменьшение их количества и т. д.

Построение же модели мониторинга деятельности работников в части предварительной разметки данных является весьма трудоемким процессом и требует поиска более эффективного способа, выполняемого в автоматизированном или автоматическом режимах.

### Заключение

По итогам настоящей работы получены следующие результаты:

1. Дано обоснование актуальности и применимости носимых устройств для работников строительного комплекса в целях реализации за-

дачи мониторинга безопасности и эффективности реализации протекающих производственных процессов в режиме реального времени.

2. Предложены способы организации проведения полевых работ по сбору экспериментальных данных с использованием программно-аппаратных средств системы «умная спецодежда».

3. Сформулированы основные подходы и этапы по предобработке и подготовке экспериментальных данных для построения модели мониторинга деятельности работников строительного комплекса.

4. Протестированы различные варианты алгоритмов из группы методов машинного обучения для построения модели мониторинга деятельности строителей, в ходе чего определены границы применимости отдельных алгоритмов и эффективные варианты настроек для различных режимов работы системы мониторинга.

5. Получена и апробирована модель мониторинга безопасности и эффективности деятельности работников по специальности «Каменщик», удовлетворяющая поставленным условиям по точности (более 80 %) и производительности (менее 1 сек.).

### Список литературы

1. Zhang K., Li D., Shen X., Hou W., Yanfeng L., Xue X. CONSTRUCTION MONITORING AND LOAD TESTING OF A PEDESTRIAN SUSPENSION BRIDGE IN CHINA Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering. 2021.
2. Гигаури Т.Т. «Разработка методики внедрения видеоконтроля за производством строительного комплекса» Colloquium-journal. 2020. № 2-2 (54). С. 203-204.
3. Габриелян Г.В. «ROBOTS AND DRONES IN CONSTRUCTION INDUSTRY» В сборнике: Дни студенческой науки. Сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов Института фундаментального образования НИУ МГСУ за 2020-2021 учебный год. Москва, 2021. С. 370-373.
4. Zaychenko I., Smirnova A., Borremans A. DIGITAL TRANSFORMATION: THE CASE OF THE APPLICATION OF DRONES IN CONSTRUCTION В сборнике: MATEC Web of Conferences. 2018. С. 05066.
5. Umar T. APPLICATIONS OF DRONES FOR SAFETY INSPECTION IN THE GULF COOPERATION COUNCIL CONSTRUCTION Engineering Construction & Architectural Management. 2020.
6. Дунаева Е.Е. «Прогнозирование рабочих процессов на строительной площадке с применением носимых цифровых устройств». Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. 2021. № 4.
7. Yang K., Ahn C.R., Kim H., Vuran M.C. COLLECTIVE SENSING OF WORKERS' GAIT PATTERNS TO IDENTIFY FALL HAZARDS IN CONSTRUCTION Automation in Construction. 2017. Т. 82. С. 166-178.
8. A REVIEW ON THE INTERACTIONS OF ROBOTIC SYSTEMS AND LEAN PRINCIPLES IN OFFSITE CONSTRUCTION Gusmao Brissi S., Wong Chong O., Debs L., Zhang J. Engineering Construction & Architectural Management. 2021.
9. Дерябин С.А., Темкин И.О., Корольков Т.А., Кондратьев Е.И., Валова А.А. «Система мониторинга производственной деятельности работников строительного комплекса» Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. – Астрахань: ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2022. - №1 (39).
10. Sutanto D., Asheibi A., Strirling D. CLUSTERING OF HARMONIC MONITORING DATA USING DATA MINING В сборнике: ICHQP 2010 - 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power. 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP 2010. Bergamo, 2010.
11. Rosa J.L.A., Ebecken N.F.F. DATA MINING FOR DATA CLASSIFICATION BASED ON THE KNN-FUZZY METHOD SUPPORTED BY GENETIC ALGORITHM Lecture Notes in Computer Science. 2003. Т. 2565. С. 126-134.
12. Sebastian O.H. Madgwick. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. Report x-io and University of Bristol (UK) vol. 25, 113-118.
13. Чесалин П.Ю., Шелехин П.В. «Использование алгоритма Random Forest для решения задачи классификации». В сборнике: Информационные технологии. Межвузовский сборник научных трудов. Рязань, 2018. С. 123-125.
14. Sheridan R.P. USING RANDOM FOREST TO MODEL THE DOMAIN APPLICABILITY OF ANOTHER RANDOM FOREST MODEL Journal of Chemical Information and Modeling. 2013. Т. 53. № 11. С. 2837-2850.
15. Geidarov P.S. CLEARLY DEFINED ARCHITECTURES OF NEURAL NETWORKS AND MULTILAYER PERCEPTRON Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). 2017. Т. 26. № 1. С. 62-76.

© Т. А. Корольков, С. А. Дерябин, И. О. Темкин, Рзазаде Ульви Азар оглы, А. А. Валова

### Ссылка для цитирования:

Корольков Т. А., Дерябин С. А., Темкин И. О., Рзазаде Ульви Азар оглы, Валова А. А. Построение модели идентификации деятельности работников строительного комплекса // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2022. № 2 (40). С. 112-116.