

УДК 004.056.53

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.52.1.001](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.52.1.001)

Математическая модель биометрического контрольного шаблона клавиатурного почерка

Е.В. Шкляр[✉], А.Д. Шульженко

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им В.И. Ульянова-Ленина, Санкт-Петербург, Российской Федерации

Резюме. В настоящей работе представлена математическая модель биометрического контрольного шаблона клавиатурного почерка, позволяющая проводить биометрическую идентификацию пользователей на основе ввода свободного текста. Обзор современной научной литературы по теме исследования показал, что биометрические контрольные шаблоны могут быть представлены в подсистемах сбора и хранения с помощью различных характеристик, таких как скорость печати, время между нажатиями клавиш или время набора биграмм. Выявлено, что основной характеристикой, позволяющей проводить биометрическую идентификацию, является временной интервал между последовательными нажатиями пар клавиш (биграмм). Биометрический контрольный шаблон клавиатурного почерка определен как совокупность непрерывных вероятностных характеристик, каждая из которых отражает распределение временных задержек между нажатиями конкретных пар символов. Проведена оценка модели на соответствие требованиям ГОСТ, доказана устойчивость к вариативности вводимых текстов, показана эффективность интеграции в биометрические системы за счет меньшего использования памяти, чем в существующих решениях, а также описана возможность использования модели в подсистеме обработки сигнала в схеме биометрической системы общего вида. Результаты исследования могут быть использованы при разработке систем биометрической идентификации, соответствующих ГОСТ.

Ключевые слова: клавиатурный почерк, идентификация, биометрия, математическая модель, биометрический контрольный шаблон.

Для цитирования: Шкляр Е.В., Шульженко А.Д. Математическая модель биометрического контрольного шаблона клавиатурного почерка. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(1). URL: <https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=2067> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.52.1.001

The mathematical model of keystroke dynamics biometric reference

Е.В. Shklyar[✉], A.D. Shulzhenko

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin),
Saint Petersburg, the Russian Federation

Abstract. This paper presents a mathematical model of a biometric reference template for keystroke dynamics, enabling biometric user identification based on free-text input. A review of contemporary scientific literature on the topic revealed that biometric reference templates can be represented using various features, such as typing speed, keystroke latency (time between keystrokes), or digraph (bigram) duration. It was identified that the primary feature enabling biometric identification is the time interval between consecutive keystrokes of character pairs (bigrams). The biometric reference template for keystroke dynamics is defined as a set of continuous probabilistic characteristics, each representing the distribution of time latencies between the keystrokes of specific character pairs. The model was evaluated for compliance with GOST (Russian State Standard) requirements. Its robustness to text variability was demonstrated, and integration efficiency was shown through lower memory usage

compared to existing solutions. The possibility of using the model within a signal processing subsystem in a general-purpose biometric system architecture is described. The research results can be applied in the development of biometric identification systems compliant with GOST standards.

Keywords: keystroke dynamics, identification, biometrics, mathematical model, biometric reference.

For citation: Shklyar E.V., Shulzhenko A.D. The mathematical model of keystroke dynamics biometric reference. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(1). (In Russ.). URL: <https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=2067> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.52.1.001

Введение

Задача идентификации пользователей на основе анализа клавиатурного почерка относится к классу задач биометрической идентификации и аутентификации субъектов доступа и объектов доступа (далее – ИАФ) в соответствии с ГОСТ Р 54412-2019¹: «Динамика работы на клавиатуре является биометрической технологией, построенной на анализе ритма печати. Динамика работы на клавиатуре человека развивается со временем, так как он учится печатать на клавиатуре, тем самым развивая уникальные навыки печати».

Исходя из этого, клавиатурный почерк можно определить как индивидуальный способ печати на клавиатуре, уникальный у разных людей. Он зависит от большого количества параметров – биометрических признаков (например, скорости печати или времени набора пар клавиш), обучаемости (привычки к клавиатуре) и психофизического состояния человека (например, усталости в конце рабочего дня).

Клавиатурный почерк – это качественная характеристика, для оценки которой, необходимо перейти к ее численному определению, то есть к представлению в виде биометрического контрольного шаблона.

В современной научной литературе описано несколько математических моделей представления и хранения биометрического контрольного шаблона (далее – БКШ) клавиатурного почерка (далее – КП). Ниже приведена классификация таких моделей, построенная на основе различных исследований, а также список биометрических признаков, использование которых допустимо при построении БКШ КП.

Вектор признаков с фиксированными временными метриками. В ряде исследований, например, [1, 2], рассматривают ввод текста с клавиатуры как последовательность чисел – вектор признаков:

$$x = [H_1, F_{1,2}, H_2, F_{2,3}, \dots, H_n],$$

где $x \in \mathbb{R}^{2n-1}$ – вектор признаков длины $2n-1$ для строки из n символов; H_i – hold time, время удержания клавиши i , то есть время между нажатием и отпусканием этой клавиши; $F_{i,i+1}$ – flight time, время между отпусканием клавиши i и нажатием клавиши $i+1$, т. е. пауза между соседними нажатиями.

Векторы признаков такого рода используются в системах сравнения на основе метрик расстояния, например, Евклида или Махalanобиса, а также в системах сравнения на основе методов машинного обучения.

В исследовании [3] рассматривался ручной ввод фиксированных паролей, из которых извлекались стандартные характеристики hold time и flight time. Далее векторы использовались в алгоритмах бинарной классификации, таких как метод опорных

¹ ГОСТ Р 54412-2019. Информационные технологии. Биометрия. Общие положения и примеры применения: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 ноября 2019 г. № 1184-ст: замен ГОСТ Р 54412-2011/ISO/IEC/TR 24741:2007: дата введения 2020-06-01. Москва: Стандартинформ; 2019. 38 с.

векторов с радиальной базисной функцией, срединные векторы и метод k ближайших соседей.

В исследовании [4] авторы использовали физическое расстояние между клавишами на клавиатуре для учета особенностей ввода, например, расположения пальцев.

В работе [2] были применены производные характеристики на основе фиксированных временных метрик – относительные паузы и темп набора и приведены ссылки на публикации, в которых описана передача в классификаторы статистических показателей: стандартное отклонение и среднее арифметическое.

В исследованиях [1, 5] проводилась оценка влияния отдельных признаков на общую результативность систем идентификации. Был получен вывод о том, что большинство эффективных моделей с EER в диапазоне от 2 % до 6 % используют параметры hold time и flight time.

Временные ряды. В качестве аналога модели БКШ КП в ряде исследований были представлены наборы полных временных рядов. При использовании этого подхода сохраняется полная последовательность событий, полученных во время ввода текста:

$$S = \{(k_i, t_i^{down}, t_i^{up})\}_{i=1}^n, \quad (1)$$

где k_i – код нажатой клавиши на позиции i ; t_i^{down} – момент времени нажатия клавиши k_i ; t_i^{up} – момент времени отпускания клавиши k_i ; n – общее число символов во введенной строке.

В перечисленных работах временные ряды применяются в «скользящих окнах» для непрерывного мониторинга действий и проверки, не произошла ли подмена пользователей.

N-графы (биграммы, триграммы). Для данной последовательности нажатий клавиш $K = (k_1, k_2, k_3, \dots, k_n)$ строятся n-графы – непрерывные подпоследовательности длины n . Например, биграммы ($n = 2$) имеют вид:

$$G^{(2)} = \{(k_1, k_2), (k_2, k_3), \dots, (k_{n-1}, k_n)\}. \quad (2)$$

Для каждой пары (k_i, k_{i+1}) вычисляются соответствующие временные признаки: H_i – hold time клавиши k_i , $F_{i,i+1}$ – flight time между клавишами k_i и k_{i+1} .

Основные исследования, в которых в качестве основных метрик БКШ КП используются биграммы, связаны с изучением физиологического состояния пользователей. Так, в работе [6] на основе времени набора биграмм исследовалась зависимость между навыками печати и тем, насколько они сохраняются с течением времени. В результате обнаружено, что у опытных пользователей навык печати со временем практически не меняется. В исследовании [7] изучалась связь между сердечным ритмом, ритмом печати и уровнем стресса. Отмечено, что индивидуальные вариации в темпе набора могут указывать на изменения когнитивной нагрузки и стресса.

Таким образом, к характеристикам клавиатурного почерка могут быть отнесены время между нажатиями клавиш (причем разные варианты, в зависимости от того, считаем мы время нажатия или отпускания), время нажатия на каждую отдельную клавишу, сила нажатия (неизмерима на стандартной клавиатуре без тензодатчиков), средняя скорость печати текста. При этом время нажатия на клавишу зависит от типа клавиатуры (механическая, мембранные и т. д.); сила нажатия неизмерима на стандартной клавиатуре без тензодатчиков; средняя скорость печати текста зависит от текста и может меняться с течением времени. Возможные характеристики БКШ КП, сгруппированные по смыслу, приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Возможные характеристики БКШ КП

Table 1 – Possible metrics of keystroke dynamics biometric reference

Группа метрик	Что измеряет	Примеры работ
Время удержания клавиши (hold time, dwell time)	Время между нажатием и отпусканием клавиши	[1], [2], [3], [8], [4], [5]
Пауза между клавишами (flight time)	Задержка между отпусканем одной клавиши и нажатием следующей	[1], [9], [3], [8], [4], [5], [10], [11]
Интервал между событиями (down-down, up-up time)	Интервал между одинаковыми событиями (двумя нажатиями или двумя отпусканиями)	[1], [4], [10]
Биграммы и n-граммы (n-graph dynamics)	Временные интервалы между последовательными нажатиями клавиш.	[1], [12], [10]
Ошибки и редактирование (error rate)	Частота нажатий Backspace и исправлений текста	[1], [13], [14]
Пространственные признаки (key distance)	Физическое расстояние между клавишами	[9], [4], [15]
Скорость и ритм (typing speed)	Общая скорость набора и длительность пауз	[1], [16], [9]
Перекрытия во времени (overlap ratio)	Доля случаев, когда клавиши нажимаются до отпускания предыдущих	[13], [14]
Дополнительные источники данных	Сигналы от датчиков движения, дополняющие тайминги	[17]

Исходя из результатов проведенного анализа, были сделаны три вывода, характеризующие проблемную ситуацию:

1. Явно прослеживается неполнота математических моделей, отражающих способ хранения КП (т. е., БКШ КП), которая снижает точность статистического анализа.

2. Отмечается ориентированность на анализ фиксированного текста. Анализ свободного текста остается исследованным недостаточно, при том, что именно он позволяет в динамике фиксировать подмену пользователя.

3. Ключевой характеристикой, действительно отражающей привычку и навык, является время между нажатиями клавиш².

На основании выводов была сформулирована задача исследования: разработка новой математической модели представления клавиатурного почерка – БКШ КП, с целью обеспечения выполнение требований ГОСТ¹ и повышения точности ИАФ относительно существующих решений.

Для выполнения первой части необходимо определить место исследования в биометрической системе общего вида (далее – БСОВ, Рисунок 1). В рамках исследования не разрабатывается система в целом, а в контуре подсистемы обработки сигнала совершенствуется математический аппарат для создания БКШ КП, обеспечивающих на

² Время между нажатиями последовательных клавиш 1 и 2 можно измерить четырьмя способами: нажатие 1 — нажатие 2; отпускание 1 — нажатие 2 (может быть отрицательным); нажатие 1 — отпускание 2 (зависит от времени отпускания); отпускание 1 — отпускание 2 (зависит от времени отпускания). С точки зрения разрабатываемой модели между этими характеристиками нет разницы, поэтому можно использовать любой удобный.

Предлагается использовать первый вариант, так как в этом случае невозможны отрицательные значения, а также нет зависимости от типа клавиатуры и времени отпускания клавиши. Таким образом, клавиатурный почерк предлагается интерпретировать как набор временных интервалов между событиями нажатиями клавиш.

уровне представления данных эффективность работы подсистемы сравнения. Именно сравнимость двух БКШ КП с целью проведения идентификации является одним из конечных показателей выполнения требований указанного ГОСТ в контексте исследования.

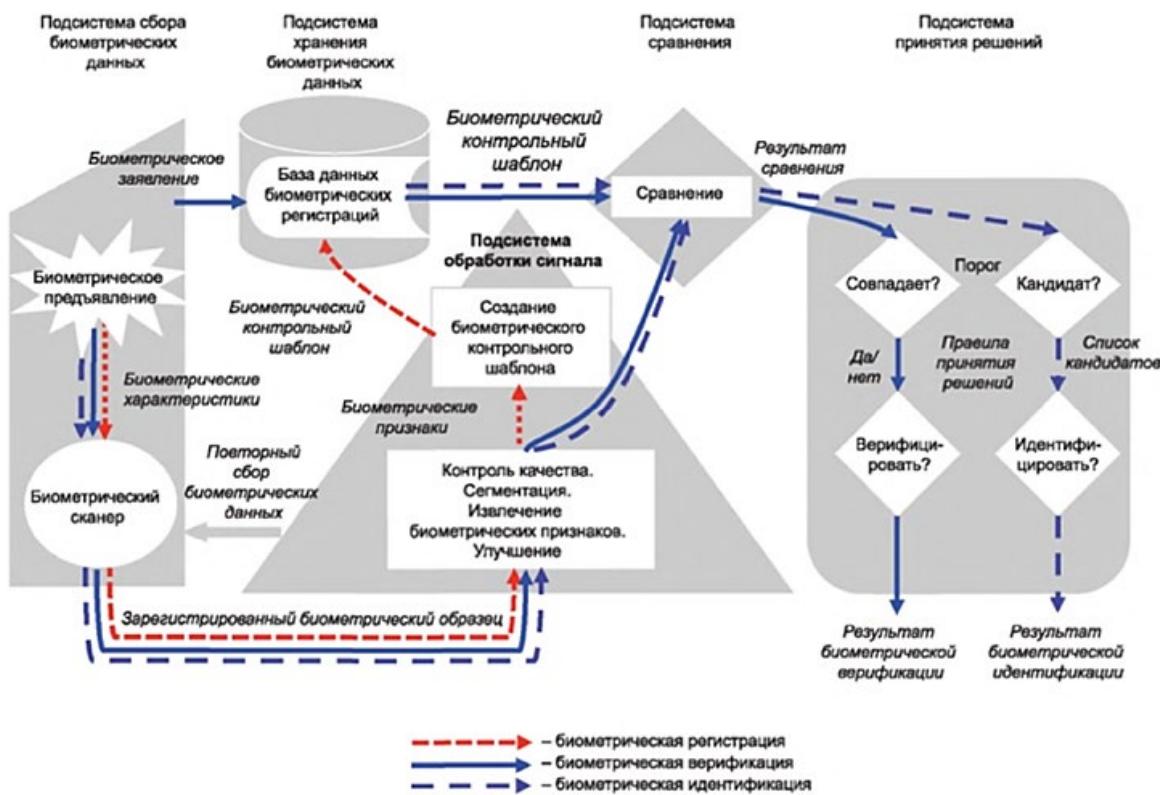


Рисунок 1 – Биометрическая система общего вида
 Figure 1 – General biometric system

Для выполнения второй части необходимо определить требования к разрабатываемой модели. Базовыми среди них являются универсальность применения, устойчивость к вариативности текстов и эффективность интеграции в реальные биометрические системы.

Универсальность применения заключается в том, что модель должна быть независима от способа сравнения, то есть формировать поведенческий профиль в виде структуры, пригодной как для метрических, так и вероятностных методов сопоставления, соответствующих требованиям блоков сравнения и оценки в БСОВ.

Устойчивость к вариативности текстов подразумевает работу со свободным текстом на любом языке и устойчивое извлечение признаков вне зависимости от лексического состава, длины или алфавита вводимой последовательности.

Эффективность интеграции предполагает компактные размеры для существенного превосходства над нейросетевыми или статистическими моделями по экономии памяти, что критично для масштабируемых и встроенных систем ИАФ.

Таким образом, модель должна сочетать архитектурную независимость, языковую нейтральность и вычислительную эффективность при сохранении высокого уровня распознавательной способности.

Материалы и методы

Верbalное описание модели БКШ КП. В предлагаемой модели представления БКШ КП определен как совокупность непрерывных вероятностных характеристик, каждая из которых отражает распределение временных задержек между нажатиями конкретных пар символов. Вместо использования агрегированных статистик или скрытых признаков нейросетей, анализ БКШ КП опирается на совокупность эмпирических распределений временных интервалов между биграммами текста.

Для каждой уникальной пары символов строится оценка плотности вероятности задержек, что позволяет учитывать как временную, так и контекстную структуру набора. Таким образом, математическая модель БКШ КП строится как множество функций плотности, описывающих характерную динамику ввода, обладающее интерпретируемостью, устойчивостью к вариативности почерка и пригодностью для точного сравнения между пользователями.

Формальное описание модели БКШ КП. Имеется множество S троек значений:

$$S = \{(c_i, c_j), t_{ij}\}, i, j \in \{1..N\}, t_{ij} \in \mathbb{R}^+, \quad (3)$$

где (c_i, c_j) – символы из алфавита, записанные последовательно («биграммы»); t_{ij} – временной интервал между нажатиями (c_i, c_j) ; N – общее количество троек.

Из исходного множества S отбираются уникальные пары символов по условию существования временного интервала между ними (что подтверждает факт нажатия этих символов), из них формируется новое множество P :

$$P = \{(c_i, c_j) \mid \exists t_{ij}\}. \quad (4)$$

Для каждой пары (c_i, c_j) из множества P формируется множество T временных интервалов, где

$$T_{ij} = t_k \mid (c_i, c_j, t_k) \in S, \quad (5)$$

T_{ij} – множество времен для уникальных пар биграмм.

Графически это может быть проиллюстрировано следующим образом (Рисунок 2).

Исходный текст:
история восторг моторист источник

Уникальные биграммы:
ст – 4 то – 4 оп – 3 ис – 3 ри – 2
ия, яв, ос, рг, гм, мо, от, ти, оч, чн, ни, ик – 1

Значимые биграммы и интервалы (пример)
ст – 102, 109, 168, 190 мс
то – 204, 207, 230, 231 мс
...

Рисунок 2 – Пример представления исходного текста в виде уникальных биграмм и наборов их временных интервалов

Figure 2 – An example of representing the source text as unique bigrams and sets of their time intervals

Для каждой пары (c_i, c_j) на основе T_{ij} строится ядерная оценка плотности распределения (kernel density estimation, KDE):

$$\widehat{f}_{ij}(t) = \frac{1}{|T_{ij}| h} \sum_{k=1}^{|T_{ij}|} K\left(\frac{t - t_k}{h}\right), \quad (6)$$

где $K(\cdot)$ – ядро, например, Гауссово:

$$K(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}}, \quad (7)$$

h – ширина окна сглаживания, $|T_{ij}|$ – количество временных интервалов для этой пары букв.

В итоге, клавиатурный почерк может быть описан математической моделью как совокупность функций плотности для всех уникальных пар символов исходного текста, где каждое $\widehat{f}_{ij}(t)$ характеризует временные задержки между конкретной парой символов:

$$\mathcal{F} = \{\widehat{f}_{ij}(t) \mid ((c_i, c_j) \in P)\}. \quad (8)$$

Такое формальное описание позволяет легко интегрировать модель в подсистему сравнения БСОВ для проведения биометрической ИАФ в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54412-2019 «Информационные технологии. Биометрия. Общие положения и примеры применения». При этом сравнению подлежат распределения плотностей вероятности, которые, как показано на Рисунке 3, могут взаимоотноситься как пересекающиеся.

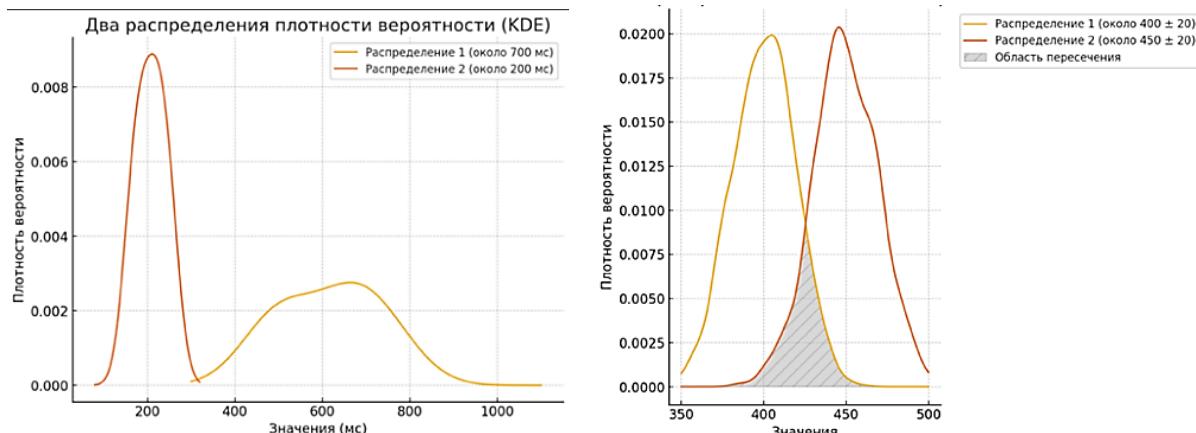


Рисунок 3 – Взаиморасположение распределений плотности вероятности времени набора биграмм

Figure 3 – The relative positions of the probability density distributions of the time of typing bigrams

Сравнение БКШ КП при таком представлении заключается в вычислении площади пересечения графиков плотности, т. е. вычислении «схожести» распределений. Такая схожесть вычисляется для всех биграмм, присутствующих в обоих БКШ КП минимум t раз. Значение t задается на основе требований к количеству ошибок первого и второго рода, увеличение t увеличивает число ошибок первого рода и уменьшает количество ошибок второго рода. На основе рассчитанной схожести вычисляется итоговая схожесть, которая затем сравнивается с пороговым значением. Пороговое значение, как и значение t , выбирается разработчиками системы ИАФ в зависимости от требований к надежности и удобству использования. Низкие пороговые значения увеличивают ошибки второго рода, но увеличивают удобство для легитимных пользователей.

Как показано на Рисунке 4, даже для одной отдельно взятой пары биграмм, введенной 214 пользователями, есть значительное отличие в формах KDE. В рамках

работы был проведен эксперимент со сбором данных клавиатурного почерка у 216 пользователей. Эксперимент показал, что накопление разницы в наборах популярных биграмм позволяет проводить идентификацию пользователей на основе единственного критерия – времени между нажатиями клавиш.

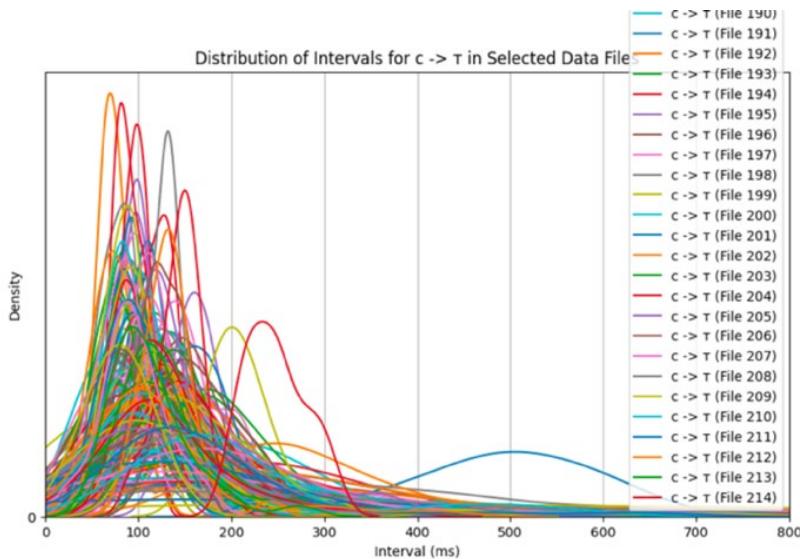


Рисунок 4 – Сравнение плотности вероятности времени набора биграммы «с-т» для 216 пользователей

Figure 4 – Comparison of the probability density of the typing time of the bigram "c-t" for 216 users

Результаты и обсуждение

Основные отличия и преимущества предлагаемого подхода по сравнению с существующими исследованиями заключаются в следующем.

Устойчивость к вариативности текстов. В отличие от исследований [5, 18], изучающих КП как усредненную характеристику, не зависящую от вводимого текста, например, описываемая в настоящем исследовании модель БКШ КП учитывает навык печати отдельных пар символов. Такой подход позволяет определить «стиль» печати текста и связан с навыком печати – например, расположением пальцев на клавиатуре или использованием (или не использованием) десятипалцевого набора.

Эффективность интеграции. В Таблице 2 приведена оценка объема БКШ КП на основе предложенной модели в сравнении с другими моделями хранения КП.

Таблица 2 – Сравнение оценок объема БКШ КП на основе различных моделей
Table 2 – Comparison of keystroke dynamics biometric references volume estimates

Модель БКШ КП	Структура шаблона	Объем (оценка)	Примечания
Предложенная модель (на основе 15 биграмм)	15 функций плотности \times 32 точки (float32) + мета	~2,1 КБ	Высокое покрытие (94%) [19], контекстная чувствительность, интерпретируемость.
Классический вектор признаков	1 усреднённый вектор (20–100 признаков)	0,5–2 КБ	Обычно применим только к фиксированным паролям.
Нейросетевой эмбеддинг	Вектор из нейросети (128–512 float32)	~0,5–5 КБ	Размер зависит от архитектуры.

Таблица 2 (продолжение)
Table 2 (continued)

KDE по всем биграммам (без отбора)	100–300 биграмм × 32 точки (float32)	12–40 КБ	Высокая эффективность, но ресурсоемкость и риск переобучения.
Автоэнкодер	Параметры модели + код ошибки	50–150 КБ	Требует хранения архитектуры и весов модели.
Гистограммы/агрегаты (медианы, σ)	Простые статистики по признакам	1–5 КБ	Низкая точность, но высокая интерпретируемость.

Универсальность применения. В исследованиях [11, 17] БКШ КП хранится в виде скрытого эмбеддинга, а сравнение происходит с помощью нейросетей. Недостатком такого подхода является невозможность однозначной трактовки векторов скрытых признаков. В настоящем исследовании предлагается модель БКШ КП, сохраняющая форму распределения входных данных, подходящая для наглядной визуализации каждой пары символов.

Полученное представление БКШ КП совместимо с метрическими и вероятностными методами сравнения. Например, плотности распределения вероятности могут быть сопоставлены с использованием расстояний Кульбака-Лейблера или Васерштейна. БКШ КП, описанный с помощью предложенной модели, может быть без значительных усилий преобразован в другие совместимые форматы или использован в подсистемах сравнения БКШ КП, основанных на фиксированном тексте.

Выполнение предъявленных требований подтверждает, что предложенная модель БКШ КП может быть использована в рамках подсистемы обработки сигнала БСОВ, описанной в ГОСТ Р 54412-2019.

Заключение

В результате исследования разработана математическая модель биометрического контрольного шаблона клавиатурного почерка, позволяющая проводить биометрическую идентификацию пользователей на основе ввода свободного текста. Выявлено, что основной характеристикой, позволяющей проводить такую идентификацию, является временной интервал между последовательными нажатиями пар клавиш (биграмм).

Научная новизна предлагаемой модели заключается в представлении клавиатурного почерка как совокупности распределений плотности вероятности времени набора биграмм. Предложенная модель позволяет сохранять форму эмпирических распределений и описывает их с помощью ядерной оценки плотности распределения вероятности. Такое представление БКШ КП дает возможность сравнивать шаблоны с использованием метрических методов – например, вычислять расстояния между распределениями, такие, как расстояние Кульбака-Лейблера или расстояние Васерштейна. Модель устойчива к вариативности поведения пользователей, не зависит от конкретной архитектуры подсистемы принятия решений БСОВ и может быть использована в различных сценариях биометрической ИАФ.

В дальнейших исследованиях планируется использование разработанной модели БКШ КП при разработке метода идентификации и аутентификации на основе анализа клавиатурного почерка, соответствующего требованиям ГОСТ Р 54412-2019.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Артюшина Л.А., Троицкая Е.А. Некоторые подходы к оценке информативности параметров идентификации пользователя по клавиатурному почерку на основе поведенческой биометрии. *Вестник Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2022;22(3):30–38. <https://doi.org/10.14529/ctcr220303>
Artyushina L.A., Troitskaya E.A. Some Approaches to Assessing the Informative of User Identification Parameters by Keyboard Handwriting Based on Behavioral Biometrics. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Computer Technology, Automatic Control, Radio Electronics"*. 2022;22(3):30–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/ctcr220303>
2. Чекмарев Д.Ю., Борзенкова С.Ю. Оценка и сравнительный анализ эффективности систем распознавания клавиатурного почерка. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023;(12):490–492.
Chekmarev D.Yu., Borzenkova S.Yu. Evaluation and Comparative Analysis of the Efficiency of Keyboard Handwriting Recognition Systems. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2023;(12):490–492. (In Russ.).
3. Dimaratos A., Pöhn D. Evaluation Scheme to Analyze Keystroke Dynamics Methods. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Information Systems Security and Privacy, ICISSP 2023: Volume 1, 22–24 February 2023, Lisbon, Portugal*. SciTePress; 2023. P. 357–365. <https://doi.org/10.5220/0011626100003405>
4. Kaluarachchi N., Kandanaarachchi S., Moore K., Arakala A. DEFT: A New Distance-Based Feature Set for Keystroke Dynamics. arXiv. URL: <https://arxiv.org/abs/2310.04059> [Accessed 12th August 2025].
5. Roy S., Pradhan J., Kumar A., et al. A Systematic Literature Review on Latest Keystroke Dynamics Based Models. *IEEE Access*. 2022;10:92192–92236. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3197756>
6. Smeaton A.F., Krishnamurthy N.G., Suryanarayana A.H. Keystroke Dynamics as Part of Lifelogging. In: *MultiMedia Modeling: 27th International Conference, MMM 2021: Proceedings: Part II, 22–24 June 2021, Prague, Czech Republic*. Cham: Springer; 2021. P. 183–195. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67835-7_16
7. Unni S., Gowda S.S., Smeaton A.F. An Investigation into Keystroke Dynamics and Heart Rate Variability as Indicators of Stress. In: *MultiMedia Modeling: 28th International Conference, MMM 2022: Proceedings: Part I, 06–10 June 2022, Phu Quoc, Vietnam*. Cham: Springer; 2022. P. 379–391. https://doi.org/10.1007/978-3-030-98358-1_30
8. Ismail M.G., Salem M.A., Abd El Ghany M.A., Aldakheel E.A., Abbas S. Outlier Detection for Keystroke Biometric User Authentication. *PeerJ Computer Science*. 2024;10. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2086>
9. Сайтов И.А., Сайтов А.И., Шарапов М.М. Аутентификация оператора АРМ критически важного объекта на основе компьютерного почерка. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2023;66(6):449–456. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2023-66-6-449-456>
Saitov I.A., Saitov A.I., Sharapov M.M. Authentication of a Critical Object Workstation Operator Based on Computer Handwriting. *Journal of Instrument Engineering*. 2023;66(6):449–456. (In Russ.). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2023-66-6-449-456>
10. Shadman R., Wahab A.A., Manno M., Lukaszewski M., Hou D., Hussain F. Keystroke Dynamics: Concepts, Techniques, and Applications. *ACM Computing Surveys*. 2025;57(11). <https://doi.org/10.1145/3733103>

11. Simão M., Prado F.O.C., Wahab O.A., Avila A.R. TempCharBERT: Keystroke Dynamics for Continuous Access Control Based on Pre-Trained Language Models. In: *2024 IEEE International Workshop on Information Forensics and Security (WIFS), 02–05 December 2024, Rome, Italy*. IEEE; 2024. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/WIFS61860.2024.10810697>
12. Putra S.R., Chowanda A. Keystroke Dynamics on Multi-Session and Uncontrolled Settings Using CNN Bi-LSTM. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2025;103(2):506–516. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15762286>
13. Ермишева Ю.Д., Омельченко Т.А. Отдельные результаты применения программного средства аутентификации по клавиатурному почерку. *НБИ технологии*. 2023;17(1):11–16. <https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2023.1.2>
Ermisheva Yu.D., Omelchenko T.A. Separate Results of the Application of the Software Authentication Tool by Keystroke Dynamics. *NBI Technologies*. 2023;17(1):11–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2023.1.2>
14. Кауров А.В. Метод идентификации субъектов путем использования алгоритма клавиатурного подчерка. *Символ науки*. 2022;(7–2):6–7.
15. Sharma A., Jureček M., Stamp M. Keystroke Dynamics for User Identification. arXiv. URL: <https://arxiv.org/abs/2307.05529> [Accessed 12th August 2025].
16. Линник Е.А., Трифонов Г.И., Федорова Е.В., Митрофанова С.В. Способ защиты автоматизированного рабочего места и система для его реализации. *Воздушно-космические силы. Теория и практика*. 2022;(24):53–62.
Linnik E.A., Triphonov G.I., Fedorova E.V., Mitrophanova S.V. The Method of the Automated Workplace Protection and the System of Its Implementation. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika*. 2022;(24):53–62. (In Russ.).
17. Senerath D., Tharinda S., Vishvajith M., Rasnayaka S., Wickramanayake S., Meedeniya D. BehaveFormer: A Framework with Spatio-Temporal Dual Attention Transformers for IMU-Enhanced Keystroke Dynamics. In: *2023 IEEE International Joint Conference on Biometrics (IJCB), 25–28 September 2023, Ljubljana, Slovenia*. IEEE; 2023. P. 1–9. <https://doi.org/10.1109/IJCB57857.2023.10448997>
18. Wahab A., Hou D., Cheng N., Huntley P., Devlen Ch. Impact of Data Breadth and Depth on Performance of Siamese Neural Network Model: Experiments with Three Keystroke Dynamic Datasets. arXiv. URL: <https://arxiv.org/abs/2501.07600> [Accessed 18th August 2025].
19. Шкляр Е.В. Алгоритм формирования списка слов с заданным распределением биграмм для регистрации биометрических контрольных шаблонов клавиатурного почерка. *Безопасность информационных технологий*. 2025;32(3):74–89.
Shklyar E.V. An Algorithm for Generating Word Lists with a Specified Bigram Distribution for Keystroke Dynamics Biometric Template Registration. *IT Security (Russia)*. 2025;32(3):74–89. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шкляр Евгений Вадимович, старший преподаватель кафедры информационной безопасности, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова-Ленина, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

e-mail: evgeniy.shklyar@yandex.ru

ORCID: [0000-0002-1894-8065](https://orcid.org/0000-0002-1894-8065)

Evgeniy V. Shklyar, Senior Lecturer, Information Security Department, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin), Saint Petersburg, the Russian Federation.

Шульженко Анастасия Дмитриевна, кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им В.И. Ульянова-Ленина, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

e-mail: anastasija_dmitrievna@mail.ru
ORCID: [0000-0002-5950-7039](https://orcid.org/0000-0002-5950-7039)

*Статья поступила в редакцию 15.09.2025; одобрена после рецензирования 11.11.2025;
принята к публикации 30.12.2025.*

*The article was submitted 15.09.2025; approved after reviewing 11.11.2025;
accepted for publication 30.12.2025.*