

## Раздел I. Системы управления и моделирования

УДК 004.067

DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-6-13

**Ю.А. Брюхомицкий**

### **ИММУНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕКСТОНЕЗАВИСИМОЙ ГОЛОСОВОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ**

*Предлагается иммунологическая модель клональной селекции с положительным отбором, которая основана на принципах массово-параллельной обработки данных, наблюдаемых в искусственной иммунной системе. Модель предназначена для текстонезависимой идентификации личности по голосу. В отличие от известных парольных систем идентификации голоса, предлагаемая модель реализует децентрализованное распознавание голосовых данных путем их сопоставления с детекторами, моделирующими иммунокомпетентные клетки иммунной системы. Исходные голосовые признаки формируются в линейном предсказателе речи и представляются кепстральными коэффициентами. Последовательность кепстральных коэффициентов расчленяется далее на равные временные участки – морфемы, представляющие собой абстрактные языковые единицы, объединяющие фонемы. Морфемы несут индивидуальную окраску воспроизводимых голосом последовательных временных участков речи, что позволяет продуктивно использовать их в качестве идентификационных признаков голоса. Сопоставление голосовых морфем с детекторами осуществляется по принципу позитивной селекции на основе меры близости Евклида. Принятие моделью идентификационного решения «свой-чужой» реализуется на основе статистического подхода по частоте срабатывания детекторов. Предлагаемая модель реализует идентификацию личности говорящего в темпе поступления его голосовых данных. При этом идентификация личности инвариантна языку, объему и содержанию речи. Преимущество модели – полная защищенность от атак воспроизведения. Эффективная реализация модели, точность и скорость идентификации обусловлены возможностью организации высокоскоростного анализа больших объемов голосовых данных, что в перспективе согласуется с темпами разработки и применения вычислительных систем высокой производительности.*

*Текстонезависимая голосовая идентификация личности; линейный предсказатель речевого сигнала; кепстральный анализ; искусственные иммунные системы; модель клональной селекции с положительным отбором.*

**Yu.A. Bryuhomitsky**

### **AN IMMUNOLOGICAL MODEL OF TEXT-INDEPENDENT VOICE IDENTIFICATION**

*An immunological model of clonal selection with positive selection based on the principles of mass-parallel data processing used in artificial immune systems, is proposed. The model is designed for text-independent identification of a person by voice. In contrast to known password-based voice identification systems, the proposed model implements decentralized recognition of voice data by matching it with detectors that simulate immunocompetent cells of the immune system. The initial voice features are generated in a linear speech predictor and are represented by cepstral coefficients. The sequence of cepstral coefficients is further divided into equal time sections - morphemes, which are abstract linguistic units that unify phonemes. Morphemes carry the individual coloring of consecutive temporal segments of speech reproduced by the voice, allowing*

*them to be used productively as voice identifiers. The matching of voice morphemes with detectors is carried out according to the principle of positive selection based on the Euclidean proximity measure. The model's "friend-or-foe" identification decision making is implemented on the basis of a statistical approach in terms of the frequency of detector response. The proposed model implements the identification of the speaker's personality at the rate of receipt of his voice data. At the same time, personality identification is invariant to the language, volume and content of speech. The advantage of the model is complete protection against replay attacks. The effective realization of the model, the accuracy and speed of identification are due to the possibility of organizing high-speed analysis of large volumes of voice data, which in the long term corresponds to the pace of development and application of high-performance computing systems.*

*Text-independent voice identification; linear predictor of speech signal; cepstral analysis; artificial immune systems; clonal selection model with positive selection.*

**Введение.** В широком спектре биометрических систем идентификации личности различной модальности особое место занимает голосовая идентификация. Это обусловлено тем, что голос невозможно украсть, трудно подделать, и главное, процесс идентификации может осуществляться удаленно через системы связи.

Большинство систем идентификации личности по голосу основано на использовании голосового пароля [1–5]. Как следствие, они оказываются уязвимыми для простых атак воспроизведения пароля. Известны также системы текстонезависимой идентификации голоса личности, независимо от состава речи и языка [6, 9], которые исключают возможность атаки воспроизведения пароля.

**Постановка задачи.** В данной работе текстонезависимую систему голосовой идентификации личности предлагается строить с использованием принципов построения и функционирования искусственных иммунных систем (ИИС) [10–12]. Решение поставленной задачи реализуется путем использования иммунологической модели, в которой реализуется децентрализованная идентификация голоса, основанная на сопоставлении его идентификационных признаков с предварительно созданными детекторами.

Идентификацию личности по голосу в большинстве случаев целесообразно проводить в режиме верификации, когда анализируемые голосовые данные делятся два класса: «свой» или «чужой». Ранее была представлена реализация подобной системы текстонезависимой идентификации с использованием иммунологической модели отрицательного отбора [13, 14]. Однако в этой модели число детекторов, необходимых для идентификации голоса определяется размером области «чужой», которая в большинстве приложений достаточно велика, что сказывается на общей эффективности реализации системы. В большинстве приложений голосовой идентификации область «свой» как правило, существенно меньше области «чужой», что делает целесообразным замену иммунологической модели отрицательного отбора иммунологической моделью клональной селекции (МКС) [15], в которой число детекторов, необходимых для идентификации голоса, определяется размером области «свой».

Как и другие обучаемые модели распознавания образов, предлагаемая МКС содержит две фазы: обучения и распознавания.

Предназначение фазы обучения в МКС состоит в генерации начальной популяции детекторов в метрике голосовых идентификационных признаков с последующим отбором тех из них, которые в пространстве признаков в наибольшей степени соответствуют голосу «своего». Отобранные детекторы подвергаются затем операциям клонирования и гипермутации, что позволяет увеличить популяцию полезных детекторов для распознавания «своего». Итогом фазы обучения является созданная популяция детекторов «своего», которая размещается в памяти МКС.

Предназначение фазы распознавания состоит в сопоставлении предъявляемых голосовых идентификационных признаков с популяцией детекторов иммунной памяти. Установленный при этом уровень близости позволяет принять решения, кому принадлежит анализируемый голос: «своему» или «чужому». Принятие такого решения реализуется на основе статистического подхода, который контролирует частоту выполнения условия критической близости между «своим» и «чужим».

**Решение поставленной задачи.** На стадии предварительной обработки исходный речевой сигнал подвергается фильтрации на предмет выявления и удаления пауз и шипящих звуков, не обладающих информативностью с точки зрения идентификации его носителя.

Отфильтрованный речевой сигнал  $s(n), n = 0, 1, \dots$  с помощью линейного предсказателя речи [16, 17] представляется комбинацией его предыдущих отсчетов:

$$s(n) = - \sum_{i=1}^{N_{LP}} a_{LP}(i) \cdot s(n-i) + e(n),$$

где  $a_{LP}$  – коэффициенты линейного предсказания;  $N_{LP}$  – число коэффициентов линейного предсказания;  $e(n)$  – функция ошибки модели.

Полученные коэффициенты линейного предсказания  $a_{LP}$  позволяют вычислить соответствующие им кепстральные коэффициенты [18, 19]

$$C_{LP} = -a_{LP}(i) - \sum_{j=1}^{i-1} \left(1 - \frac{j}{i}\right) \cdot a_{LP}(j) \cdot C_{LP}(i-j).$$

При этом число  $N_C$  кепстральных коэффициентов  $C_{LP}$  выбирается равным числу  $N_{LP}$  коэффициентов линейного предсказания  $a_{LP}$ .

Для определения принадлежности речевого сигнала  $s(n)$  «своему» или «чужому» он разбивается на равные временные участки – морфемы  $\{\mathbf{s}_i\}_{i=1}^r$ , по  $r$  отсчетов сигнала в каждом участке. Морфемы представляют собой абстрактные языковые единицы, объединяющие составляющие их фонемы. Для отдельной личности морфемы несут индивидуальную окраску воспроизводимого голосом участков текста, что позволяет продуктивно использовать их в качестве идентификационных признаков голоса.

Каждая морфема может быть представлена  $r$ -мерным вектором в Евклидовом признаковом пространстве  $E^r$ :

$$\mathbf{s}_i = s_1, s_2, \dots, s_r, \quad i = 1, 2, \dots, r.$$

При этом речевой сигнал  $s(n)$  – будет представлен последовательностью векторов признаков  $\mathbf{s}_i$ :

$$s(n) \equiv \{\mathbf{s}_i\}_{i=1}^{\infty} = \mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots.$$

Число  $N_{LP}$  кепстральных коэффициентов  $C_{LP}$  определяет размерность голосовых векторов признаков. Диапазон изменения кепстральных коэффициентов  $(C_{LP})_{min}$  и  $(C_{LP})_{max}$  соответствует рабочему подпространству  $E_p^r \subset E^r$ , в котором распределены векторы признаков  $\mathbf{s}_i$ .

В режиме идентификации голоса последовательность  $\{\mathbf{s}_i\}_{i=1}^{\infty}$ , ограниченная  $N_s$  элементами представляет голосовой эталон  $\mathbf{S}$  данной личности:

$$\mathbf{S} = \{\mathbf{s}_i\}_{i=1}^{N_s} = \mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_{N_s}, \quad i = 1, 2, \dots, r, \quad j = 1, 2, \dots, N_s.$$

Последующее решение задачи текстонезависимой голосовой идентификации личности строится с применением аппарата ИИС [10–12].

Обучение ИИС распознавания голоса с использованием МКС осуществляется по следующему алгоритму.

1. На основе случайной генерации с равномерным законом распределения создается первоначальная популяция детекторов  $\mathbf{D}_k^\lambda = \mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_{N_d}$ ,  $k = 1, 2, \dots, N_d, \lambda = 0$ . При этом детекторы представлены  $r$ -мерными векторами в формате векторов признаков  $\mathbf{s}_i: \mathbf{d}_i = d_1, d_2, \dots, d_r, i = 1, 2, \dots, r$ .

2. Для каждой пары  $\mathbf{d}_k \in \mathbf{D}_k^\lambda$  и  $\mathbf{s}_j \in \mathbf{S}$  вычисляется степень близости, которая моделирует свойство аффинности (родственности) клеток иммунной системы, представленными антителами и антигенами, и отражает комплементарность их компонентов. Мерой близости (аффинности)  $a_{kj}$  является Евклидово расстояние между векторами  $\mathbf{d}_k$  и  $\mathbf{s}_j$ :

$$a_{kj}(\mathbf{d}_k, \mathbf{s}_j) = \sqrt{\sum_{p=1}^N (d_{kp} - s_{jp})^2}, \quad p = 1, 2, \dots, N, \quad N = N_d \cdot N_s.$$

Результат сопоставления всех пар  $\mathbf{d}_k \in \mathbf{D}_k^\lambda$  и  $\mathbf{s}_j \in \mathbf{S}$  образует матрицу взаимной аффинности  $\mathbf{A}$ , содержащая  $N = N_d \cdot N_s$  элементов  $a_{kj}$ :

$$\mathbf{A} \| a_{kj}(\mathbf{d}_k, \mathbf{s}_j) \| = \left\| \begin{array}{cccc} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N_s} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N_s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N_d 1} & a_{N_d 2} & \dots & a_{N_d N_s} \end{array} \right\|, \quad k = 1, 2, \dots, N_d \quad j = 1, 2, \dots, N_s.$$

3. В столбцах матрицы  $\mathbf{A}$  отбирается  $l$  из  $N_d$  детекторов  $\mathbf{d}_k$ , с наибольшей взаимной аффинностью  $a_{kj}(\mathbf{d}_k, \mathbf{s}_j)$ ,  $k = 1, 2, \dots, l, j = 1, 2, \dots, N_s$  и подвергаются клонированию:

$$C[\mathbf{d}_k] = \mathbf{d}_k^c, \quad k = 1, 2, \dots, l \quad c = 1, 2, \dots, q.$$

Количество образуемых клонов  $q_k$  каждого из  $l$  детекторов  $\mathbf{d}_k^c$  пропорционально степени их взаимной аффинности  $a_{kj}(\mathbf{d}_k, \mathbf{s}_j)$ :

$$q_k \propto k_c \cdot a_{kj}(\mathbf{d}_k, \mathbf{s}_j),$$

где  $k_c$  коэффициент пропорциональности при клонировании.

Общее же количество образованных клонов остается равным  $N_d$ :

$$\sum_{k=1}^l q_k = \left[ \sum_{k=1}^l k_c \cdot a_{kj}(\mathbf{d}_k, \mathbf{s}_j) \right] = N_d.$$

В результате все детекторы популяции  $\mathbf{D}_k^\lambda$  заменяются их клонами  $\mathbf{d}_k^c: \mathbf{D}_k^\lambda \rightarrow \mathbf{D}_k^{\lambda c}$  при выполнении условия

$$k_c = N_d / \sum_{k=1}^l a_{kj}(\mathbf{d}_k, \mathbf{s}_j).$$

Операции клонирования детекторов позволяют повысить вероятность покрытия ими всей области распределения биометрических голосовых векторов признаков  $\mathbf{s}_i$

4. Образованные клоны  $\mathbf{d}_k^c$  популяции  $\mathbf{D}_k^{\lambda c}$  подвергаются операции гипермутации:

$$G[\mathbf{d}_k^c] = \mathbf{d}_k^{cG}, \quad k = 1, 2, \dots, l \quad c = 1, 2, \dots, q.$$

Операция гипермутации сводится к изменению  $m$  компонент векторов детекторов  $\mathbf{d}_k^c$  на случайные величины в диапазоне  $0 < \xi < \delta$ . При этом гипермутация  $G$  клонов  $\mathbf{d}_k^c$  осуществляется обратно пропорционально взаимной аффинности  $a_{kj}(\mathbf{d}_k, \mathbf{s}_j)$ :

$$G \propto k_m / a_{kj}(\mathbf{d}_k, \mathbf{s}_j),$$

где  $k_m$  – коэффициент гипермутации клонов  $\mathbf{d}_k^{cG}$  определяемый из условия:  $m = 1$  при  $\max_{k=1,2,\dots,l} a_{kj}(\mathbf{d}_k, \mathbf{s}_j)$ .

Детекторы  $\mathbf{d}_k^{CGM}$  заменяют популяцию  $\mathbf{D}_k^{\lambda c}$  на  $\mathbf{D}_k^{\lambda CG}$ .

Операция гипермутации позволяет сузить область поиска новых эффективных детекторов.

5. Определяется степень взаимной аффинности для каждой пары детектора  $\mathbf{d}_k^{CG} \in \mathbf{D}_k^{\lambda CG}$  и морфемы  $\mathbf{s}_j \in \mathbf{S}_j$

$$a_{kj}(\mathbf{d}_k^{CG}, \mathbf{s}_j) = \sqrt{\sum_{p=1}^N (d_{kp}^{CG} - s_{jp})^2}, \quad p = 1, 2, \dots, N.$$

Набор степеней взаимной аффинности всех пар  $a_{kj}(\mathbf{d}_k^{CG}, \mathbf{s}_j)$  образуют матрицу взаимной аффинности  $\mathbf{A}$ , содержащую  $N = N_d \cdot N_s$  элементов  $a_{ij}$ :

$$\mathbf{A} \| a_{kj}(\mathbf{d}_k^{CG}, \mathbf{s}_j) \|, \quad k = 1, 2, \dots, N_d \quad j = 1, 2, \dots, N_s.$$

6. Из матрицы  $\mathbf{A}$  отбираются элементы с наибольшей взаимной аффинностью  $a_{kj}(\mathbf{d}_k^{CG}, \mathbf{s}_j)$ ,  $k = 1, 2, \dots, l$ ,  $j = 1, 2, \dots, N_s$ , которые образуют популяцию детекторов памяти  $\mathbf{D}^M$ .

7. Проверяется условие достижения максимального размера популяции детекторов памяти  $\mathbf{D}^M = \mathbf{D}_{\max}^M$ . При выполнении этого условия, – переход на шаг 9, иначе следующий шаг.

8. Детекторы  $(N_d - l)$  популяции  $\mathbf{D}_k^{\lambda CG}$ , которые обладают наименьшей аффинностью  $a_{kj}(\mathbf{d}_k, \mathbf{y}_j)$  заменяются новыми путем генерации новой популяции  $\mathbf{D}_k^{\lambda} = \mathbf{d}_1, \mathbf{d}_1, \dots, \mathbf{d}_{N_d}$ ,  $\lambda = \lambda + 1$ ,  $k = 1, 2, \dots, (N_d - l)$ , представленных векторами в формате векторов  $\mathbf{s}_j$ . Генерация детекторов осуществляется с равномерным законом распределения в соответствующем диапазоне.

9. Останов, конец алгоритма.

Распознавание голоса личности в предлагаемой модели осуществляется путем сопоставления элементов  $\mathbf{s}_j$  анализируемой последовательности голосовых признаков  $\mathbf{S}_j$  с детекторами  $\mathbf{d}_k^M$  памяти  $\mathbf{D}^M$ ,  $k = 1, 2, \dots, N_M$ .

Сопоставление реализуется между векторами  $\mathbf{s}_j$  и  $\mathbf{d}_k^M$  на основе меры близости Евклида:

$$\nabla(\mathbf{s}_j, \mathbf{d}_k^M) = \sqrt{\sum_{v=1}^p (s_{jv} - d_{kv})^2}.$$

Задается критический уровень близости  $\nabla(\mathbf{s}_j, \mathbf{d}_k^M) = \nabla^*$ , который, исходя из допустимых ошибок первого рода, определяет границу «свой/чужой». В процессе сопоставления пар  $\mathbf{s}_j$  и  $\mathbf{d}_k^M$  уровень близости  $\nabla(\mathbf{s}_j, \mathbf{d}_k^M) < \nabla^*$  свидетельствует о том, что элемент  $\mathbf{s}_j$  последовательности голосовых признаков  $\mathbf{S}_j$ , принадлежит «чужому».

В голосовой биометрии наблюдаются значительные случайные вариации элементов  $\mathbf{s}_j$  анализируемой последовательности  $\mathbf{S}_j$  голосовых признаков конкретной личности. Кроме того, размеры последовательностей  $\mathbf{S}_j$  анализируемых голосовых признаков могут быть достаточно большими. Эти обстоятельства оправдывают применение статистического подхода в решающем правиле принятия решения «свой»-«чужой» [20, 21]. Реализацию такого подхода предлагается путем статистической оценки частоты  $f$  выполнения условия  $\nabla(\mathbf{y}_j, \mathbf{d}_k^M) < \nabla^*$  о принадлежности голосовых признаков  $\mathbf{S}_j$  «чужому». Пороговое значение частоты  $f_{\Pi}$  определяет статистическую вероятность принадлежности голоса «своему» или «чужому»:

$$f = f_{\Pi} \approx \hat{F} = n_{\nabla}^+ / n_{\nabla},$$

где  $n_{\nabla}^+$  число выполнений условия  $\nabla(\mathbf{s}_j, \mathbf{d}_k^M) < \nabla^*$  в  $n_{\nabla}$  операциях сопоставлений.

Принятие текущего идентификационного решения об отнесении анализируемой последовательности голосовых признаков  $\mathbf{S}_j$  «своему» или «чужому» осуществляется по правилу:

$$\mathbf{S}_j \equiv \begin{cases} \mathbf{S}_j^c, & \text{если } f \geq f_n; \\ \mathbf{S}_j^a, & \text{если } f < f_n, \end{cases}$$

где  $\mathbf{S}_j^c$  – последовательность голосовых признаков «своего»;  $\mathbf{S}_j^a$  – последовательность голосовых признаков «чужого».

**Заключение.** Голосовые системы идентификации, основанные на предъявлении голосового пароля, просты в реализации, но весьма уязвимы атакам воспроизведения пароля. Предлагаемая иммунологическая модель текстонезависимой идентификации личности по голосу лишена этого недостатка. После накопления статистических данных голоса она позволяет в реальном масштабе времени непрерывно идентифицировать личность говорящего в темпе поступления его голосовых данных. При этом модель полностью защищена от атак воспроизведения.

Предложенная иммунологическая модель, реализует свойственные иммунной системе массово-распределенные вычисления и ориентирована на применение вычислительных систем высокой производительности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Kenny P., Ouellet P., Dehak N., et al.* A study of interspeaker variability in speaker verification // IEEE Trans. Audio Speech Language Processing. – 2008. – Vol. 16, Issue 5. – P. 980-988.
2. *Zhang Sh.-X., Mak M.-W.* A new adaptation approach to high-level speaker-model creation in speaker verification // Speech Communication. – 2009. – Vol. 51. – P. 534-550.
3. *Первушин Е.А.* Обзор основных методов распознавания дикторов // Математические структуры и моделирование. – 2011. – Вып. 24. – С. 41-54.
4. *Гришин В.М., Калашиников Д.М.* Речевой фрагментатор для нейросетевого биометрического вокодера // Пенза-2012: Тр. научно-технической конференции кластера пензенских предприятий, обеспечивающих безопасность информационных технологий. – <http://пнизи.рф/activity/science/ВПТ/Т8-р73.pdf>.
5. *Lei Y., Hansen J.H.L.* Mismatch modeling and compensation for robust speaker verification // Speech Communication. – 2011. – Vol. 53. – P. 257-268.
6. *Макаревич О.Б., Бабенко Л.К., Федоров В.М., Юрков П.Ю.* Текстонезависимая аутентификация/идентификация по голосу в системах управления доступом // X Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы информационной безопасности в системе высшей школы». – М.: МИФИ, 2003. – С. 28-29.
7. *Можаров Г.П., Чеботарев Р.С.* Текстонезависимый метод идентификации человека по его голосу // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – № 11. – С. 168-178.
8. *Клименко Н.С.* Разработка структуры текстонезависимой системы идентификации диктора // Искусственный интеллект. – 2012. – № 4. – С. 161-171.
9. *Bimbot F. et al.* A Tutorial on Text-Independent Speaker Verification // EURASIP Journal on Applied Signal Processing. – 2004. – No. 4. – P. 430-451.
10. *Dasgupta D.* Artificial Immune Systems and Their Applications, Ed., Springer-Verlag, 1999.
11. *De Castro L.N., Timmis, J.I.* Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach, London: Springer-Verlag, 2000. – 357 p.
12. Искусственные иммунные системы и их применение / под ред. Д. Дасгупты: пер. с англ. А.А. Романюхи. – М.: Физматлит, 2006. – 344 с.
13. *Брюхомицкий Ю.А., Федоров В.М.* Метод текстонезависимой идентификации личности по голосу // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 8 (202). – С. 173-181.
14. *Брюхомицкий Ю.А., Федоров В.М.* Иммунологический подход к идентификации личности по голосу // Специальная связь и безопасность информации» (ССБИ – 2019): Матер. III международной научно-практической конференции. Краснодар, 18 февраля 2019 г. – Краснодар: Изд-во: Краснодарский ЦНТИ – филиал ФГБУ «РЭА» Минэнерго России. – С. 24-30.

15. Брюхомицкий Ю.А. Текстонезависимая идентификация личности по динамическим биометрическим параметрам на основе иммунной модели клональной селекции // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 5 (199). – С. 142-151.
16. Маркел Дж., Грэй А.Х. Линейное предсказание речи: пер с англ. / под ред. Ю.Н. Прохорова, В.С. Звездина. – М.: Связь, 1980. – 308 с.
17. Литвинцева А.В., Оболонин М.А. Использование линейного предсказателя речи в программной модели низкоскоростного вокодера для передачи речи по гидроакустическому каналу связи // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=9158> (дата обращения: 04.04.2022).
18. Anden J., Mallat S. Multiscale Scattering for Audio Classification // Proceedings of the 12th International Society for Music Information Retrieval Conference, ISMIR 2011, Miami, Florida, USA, October 24-28, 2011.
19. Mallat S. Group Invariant Scattering // Communications in Pure and Applied Mathematics. – 2012. – Vol. 65, No. 10.
20. Брюхомицкий Ю.А. Иммунологический метод верификации рукописи с использованием векторного представления данных // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 9 (182). – С. 50-57.
21. Брюхомицкий Ю.А. Иммунологический подход к идентификации личности по динамическим биометрическим параметрам // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 5 (190). – С. 56-66.

## REFERENCES

1. Kenny P., Ouellet P., Dehak N., et al. A study of interspeaker variability in speaker verification, *IEEE Trans. Audio Speech Language Processing*, 2008, Vol. 16, Issue 5, pp. 980-988.
2. Zhang Sh.-X., Mak M.-W. A new adaptation approach to high-level speaker-model creation in speaker verification, *Speech Communication*, 2009, Vol. 51, pp. 534-550.
3. Pervushin E.A. Obzor osnovnykh metodov raspoznavaniya diktorov [Overview of the main methods of speaker recognition], *Matematicheskie struktury i modelirovanie* [Mathematical structures and modeling], 2011, Issue 24, pp. 41-54.
4. Grishin V.M., Kalashnikov D.M. Rechevoy fragmentator dlya neyrosetevogo biometricheskogo vokodera [Speech fragmentator for neural network biometric vocoder], *Penza-2012: Tr. nauchno-tekhnicheskoy konferentsii klastera penzenskikh predpriyatiy, obespechivayushchikh bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy* [Penza-2012: Proceedings of the scientific and technical conference of the cluster of Penza enterprises providing information technology security]. Available at: <http://pniei.rf/activity/science/БИТ/Т8-p73.pdf>.
5. Lei Y., Hansen J.H.L. Mismatch modeling and compensation for robust speaker verification *Speech Communication*, 2011, Vol. 53, pp. 257-268.
6. Makarevich O.B., Babenko L.K., Fedorov V.M., Yurkov P.Yu. Tekstonezavisimaya autentifikatsiya/identifikatsiya po golosu v sistemakh upravleniya dostupom [Text-independent authentication/voice identification in access control systems], *X Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Problemy informatsionnoy bezopasnosti v sisteme vysshey shkoly»* [X All-Russian scientific and practical conference "Problems of information security in the higher school system"]. Moscow: MIFI, 2003, pp. 28-29.
7. Mozharov G.P., Chebotarev R.S. Tekstonezavisimyy metod identifikatsii cheloveka po ego golosu [Text-independent method of identifying a person by his voice], *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2012, No. 11, pp. 168-178.
8. Klimenko N.S. Razrabotka struktury tekstonezavisimoy sistemy identifikatsii diktora [Development of the structure of a text-independent speaker identification system], *Iskusstvennyy intellekt* [Artificial Intelligence], 2012, No. 4, pp. 161-171.
9. Bimbot F. et al. A Tutorial on Text-Independent Speaker Verification, *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2004, No. 4, pp. 430-451.
10. Dasgupta D. Artificial Immune Systems and Their Applications, Ed., Springer-Verlag, 1999.
11. De Castro L.N., Timmis, J.I. Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach, London: Springer-Verlag, 2000, 357 p.
12. Iskusstvennye immunnnye sistemy i ikh primeneniye [Artificial immune systems and their application], ed. by D. Dasgupty: transl. from engl. by A.A. Romanyukhi. Moscow: Fizmatlit, 2006, 344 p.

13. *Bryukhomitskiy Yu.A., Federov V.M.* Metod tekstonezavisimoy identifikatsii lichnosti po golosu [The method of text-independent identification of a person by voice], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 8 (202), pp. 173-181.
14. *Bryukhomitskiy Yu.A., Federov V.M.* Immunologicheskiy podkhod k identifikatsii lichnosti po golosu [Immunological approach to voice identification], *Spetsial'naya svyaz' i bezopasnost' informatsii»* (SSBI – 2019): Mater. III mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Krasnodar, 18 fevralya 2019 g. [Special communication and information security" (SSBI – 2019): Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference. Krasnodar, February 18, 2019]. Krasnodar: Izd-vo: Krasnodarskiy TSNTI – filial FGBU «REA» Minenergo Rossii, 2019, pp. 24-30.
15. *Bryukhomitskiy Yu.A.* Tekstonezavisimaya identifikatsiya lichnosti po dinamicheskim biometricheskim parametram na osnove immunnoy modeli klonal'noy selektsii [Text-independent identification of a person by dynamic biometric parameters based on the immune model of clonal selection], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 5 (199), pp. 142-151.
16. *Markel Dzh., Grey A.Kh.* Lineynoe predskazanie rechi [Linear prediction of speech]: transl. from engl. by, ed. by Yu.N. Prokhorova, V.S. Zvezdina. Moscow: Svyaz', 1980, 308 p.
17. *Litvintseva A.V., Obolonin M.A.* Ispol'zovanie lineynogo predskazatelya rechi v programmnoy modeli nizkoskorostnogo vokodera dlya peredachi rechi po gidroakusticheskomu kanalu svyazi [Using a linear speech predictor in a software model of a low-speed vocoder for speech transmission over a hydroacoustic communication channel], *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2013, No. 3. Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=9158> (accessed 04 April 2022).
18. *Anden J., Mallat S.* Multiscale Scattering for Audio Classification, *Proceedings of the 12th International Society for Music Information Retrieval Conference, ISMIR 2011, Miami, Florida, USA, October 24-28, 2011.*
19. *Mallat S.* Group Invariant Scattering, *Communications in Pure and Applied Mathematics*, 2012, Vol. 65, No. 10.
20. *Bryukhomitskiy Yu.A.* Immunologicheskiy metod verifikatsii rukopisi s ispol'zovaniem vektornogo predstavleniya dannykh [Immunological method of manuscript verification using vector representation of data], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 9 (182), pp. 50-57.
21. *Bryukhomitskiy Yu.A.* Immunologicheskiy podkhod k identifikatsii lichnosti po dinamicheskim biometricheskim parametram [Immunological approach to identity identification by dynamic biometric parameters] *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 5 (190), pp. 56-66.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

**Брюхомицкий Юрий Анатольевич** – Южный федеральный университет; e-mail: [bryuhomitskiy@sfedu.ru](mailto:bryuhomitskiy@sfedu.ru); г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371905; Кафедра безопасности информационных технологий; к.т.н.; доцент; с.н.с.

**Bryukhomitsky Yuriy Anatol'evich** – Southern Federal University; e-mail: [bryuhomitskiy@sfedu.ru](mailto:bryuhomitskiy@sfedu.ru); Taganrog, Russia; phone: +78634371905; the department of information technology security; cand. of eng. sc.; associate professor; senior researcher.