

Научная статья

УДК 616.13.002 + 616.61-002.2-008.64

doi: 10.34822/2304-9448-2022-1-25-30

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ШУМОВ КАК СПОСОБ ОЦЕНКИ ФУНКЦИИ ПОСТОЯННОГО СОСУДИСТОГО ДОСТУПА У БОЛЬНЫХ НА ГЕМОДИАЛИЗЕ

Павел Федорович Кравцов¹, Евгений Николаевич Николаев^{2,3},
Константин Витальевич Мазайшвили³, Василий Александрович Громов⁴,
Екатерина Игоревна Зворыкина⁵, Юрий Николаевич Бесчастнов⁶

¹Клиника Самарского государственного медицинского университета Минздрава России, Самара, Россия

^{2,3}Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

^{4,5,6}Высшая школа экономики, Москва, Россия

¹kravtsovpf@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1283-5342>

²jeka.nickolaev@yandex.ru³, <http://orcid.org/0000-0003-2306-6216>

³nmspl@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6761-2381>

⁴vgromov@hse.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5891-6597>

⁵y.zvorykina@gmail.com

⁶y.beschastnov@mail.ru

Аннотация. Цель – разработать алгоритм оценки спектрографических признаков дисфункции артериовенозной фистулы для гемодиализа. **Материалы и методы.** В исследовании приняли участие 44 пациента с нативной радиоцефальной фистулой, сформированной в дистальной трети предплечья. Всем пациентам проводили запись шума артериовенозной фистулы с использованием электронного стетоскопа. Сформированная база из 653 спектрограмм подверглась анализу по методу оценки величин энтропии и сложности. Для выявления закономерностей был применен алгоритм кластеризации Уишарта. **Результаты.** Разработанный алгоритм анализа аудиограмм, основанный на определении «хаотичности» и «сложности» звука, позволяет разделить шумы артериовенозной фистулы на три кластера, каждому из которых соответствует своя вероятность дисфункции. Данный алгоритм может использоваться при разработке индивидуальных мобильных устройств для постоянного мониторинга состояния артериовенозной фистулы.

Ключевые слова: кластеризация шумов, почечная недостаточность, сосудистый доступ, гемодиализ, стеноз, тромбоз

Финансирование: статья подготовлена в ходе проведения исследовательского проекта «Зеркальные лаборатории НИУ ВШЭ».

Шифр специальности: 3.1.9. Хирургия.

Для цитирования: Кравцов П. Ф., Николаев Е. Н., Мазайшвили К. В., Громов В. А., Зворыкина Е. И., Бесчастнов Ю. Н. Кластеризация шумов как способ оценки функции постоянного сосудистого доступа у больных на гемодиализе // Вестник СурГУ. Медицина. 2022. № 1 (51). С. 25–30. DOI 10.34822/2304-9448-2022-1-25-30.

ВВЕДЕНИЕ

Число пациентов с терминальной формой хронической почечной недостаточности (тХПН), требующих заместительной почечной терапии (ЗПТ), растет год от года [1]. В настоящее время более 5 млн пациентов в мире получают ЗПТ, при этом нуждаемость в ней практически в два раза выше и ежегодно неуклонно растет [2]. Особую, до конца не изученную роль в данном процессе играет пандемия COVID-19, поскольку острое поражение почек является одним из наиболее частых внелегочных проявлений ковидной инфекции [3]. По данным научной литературы, почечная недостаточность развивается у 31–46 % заболевших, из них 20 % требуется ЗПТ [4–5]. Наличие терминальной стадии ХБП в анамнезе у пациента с COVID-инфекцией расценивается как неблагоприятный прогностиче-

ский фактор развития осложнений. Смертность среди данной категории составляет 8 % среди амбулаторных и 42–88 % среди стационарных пациентов [6–7].

Около 89 % пациентов, получающих ЗПТ, используют метод программного гемодиализа (ПГД) [8], большинство из них проживают в странах с высоким и средним уровнем доходов, к которым относится и Россия [9], т. к. требуются значительные финансовые затраты как на материальное обеспечение самого сеанса ПГД, так и на постоянный медицинский контроль за сосудистым доступом у пациента. Наличие сосудистого доступа является необходимым условием для проведения ЗПТ, от которой зависит продолжительность жизни диализных пациентов [10]. Идеальный сосудистый доступ должен обеспечивать адекватный

объемный кровоток для проведения сеанса диализа; приводить к минимальному количеству инфекционных и геморрагических осложнений; функционировать на протяжении многих лет, минимально влиять на качество жизни пациента и при этом не должен вызывать развития и прогрессирования сердечной недостаточности. По большей части этим требованиям соответствует нативный дистальный сосудистый доступ – радиоцефальная артериовенозная фистула (АВФ) [11].

К сожалению, даже идеальная АВФ при определенных условиях может тромбироваться, поскольку два из трех компонентов триады Вирхова напрямую влияют на продолжительность ее функционирования. Первый – это травма сосудов из-за многократных пункций фистульной вены для осуществления забора и возврата крови для диализа. Второй – нарушение ламинарного кровотока. Зачастую в области анастомоза развивается гиперплазия интимы, приводящая к развитию стеноза [12–13]. Воздействовать на первый компонент не представляется возможным, а вот со стенозами различных локализаций вполне успешно можно бороться с помощью рентгенэндоваскулярных технологий – баллонной ангиопластики и селективного тромболитика. Таким образом, максимального срока работы АВФ можно достигнуть путем раннего

распознавания начинающегося стенозирования или тромбоза. Для выявления патологии АВФ наиболее распространенным в настоящее время является физикальное обследование: осмотр, пальпация и аускультация [14]. Данные методы используются для проверки наличия вибрации, связанной с нормальным кровотоком, а также для определения плавности и частоты пульсации сосуда. При аускультации наличие или отсутствие стеноза определяется с помощью разницы высоты, прерывистости и распространения звука [15]. К сожалению, оценка информации, получаемой при аускультации, очень субъективна и во многом зависит от уровня артериального давления, пульса, наличия сердечной недостаточности, расположения фистулы, объемной скорости кровотока. По-другому оценивать шумы не удается, так как пока нет четких объективных (цифровых) аускультативных признаков стенозирования АВФ. Именно цифровые параметры, способные подвергаться машинному анализу, могут стать основой системы круглосуточного мониторинга активности АВФ. Описанные в литературе способы математической обработки звуковых частот, генерируемых АВФ, основаны лишь на анализе высоких и низких частот [16–17]. Для цифровизации аудиограммы этого недостаточно – современные системы интерпретации звуков оперируют спектрограммами – изображения-

Original article

NOISE CLUSTERING AS A METHOD FOR ASSESSING THE FUNCTION OF PERMANENT VASCULAR ACCESS IN PATIENTS DURING HEMODIALYSIS

Pavel F. Kravtsov¹, Evgeniy N. Nikolaev^{2,3}, Konstantin V. Mazayshvili³, Vasily A. Gromov⁴, Ekaterina I. Zvorykina⁵, Yuri N. Beschastnov⁶

¹Clinics of the Samara State Medical University, Samara, Russia

^{2,3}Surgut State University, Surgut, Russia

^{4,5,6}Higher School of Economics, Moscow, Russia

¹kravtsovpf@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1283-5342>

²jeka.nikolaev@yandex.ru[✉], <http://orcid.org/0000-0003-2306-6216>

³nmspl@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6761-2381>

⁴vgromov@hse.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5891-6597>

⁵y.zvorykina@gmail.com

⁶y.beschastnov@mail.ru

Abstract. The study aims to develop an algorithm for assessing spectrographic features of arteriovenous fistula dysfunction for hemodialysis. **Materials and methods.** Forty-four patients with native radiocephalic fistula formed in the distal third of the forearm participated in the research. Using electronic stethoscope, the noise of arteriovenous fistula was recorded in all patients. 653 spectrograms were analyzed with the method of evaluating entropy and complexity value. The algorithm of Wishart clustering was applied to detect consistency. **Results.** The algorithm developed for audiograms analysis and based on evaluation of “chaotic” and “complex” sound makes it possible to divide arteriovenous fistula noise into three clusters. Each cluster complies with its possibility of dysfunction. The algorithm may be applied in developing individual mobile devices to monitor constantly the condition of arteriovenous fistula.

Keywords: noise clustering, kidney failure, vascular access, hemodialysis, stenosis, thrombosis

Funding: the article was prepared within the framework of the “HSE University Mirror Laboratories” research project.

Code: 3.1.9. Surgery.

For citation: Kravtsov P. F., Nikolaev E. N., Mazayshvili K. V., Gromov V. A., Zvorykina E. I., Beschastnov Yu. N. Noise Clustering as a Method for Assessing the Function of Permanent Vascular Access in Patients during Hemodialysis // Vestnik SurGU. Medicina. 2022. No. 1 (51). P. 25–30. DOI 10.34822/2304-9448-2022-1-25-30.

ми, показывающими зависимость спектральной плотности мощности сигнала от времени [18]. Графически спектрограмма представляет трехмерную картину: по горизонтальной оси представлено время, по вертикальной – частота звука, по третьей – амплитуда звуковых колебаний. В настоящее время рост производительности компьютерных систем позволяет производить постоянный мониторинг спектрограмм в режиме online.

Цель – разработать алгоритм оценки спектрографических признаков дисфункции артериовенозной фистулы для гемодиализа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании приняли участие 44 пациента (24 женщины и 20 мужчин), проходящих ЗПТ методом ПГД по поводу тХПН в Центре диализа Сургутской окружной клинической больницы и в отделении гемодиализа клиник Самарского государственного медицинского университета (г. Самара). Средний возраст пациентов составил 62 ($56,7 \pm 5,3$) года. Средний срок проведения ЗПТ методом ПГД – 43 ($34,3 \pm 8,7$) месяца. У всех пациентов ПГД осуществляли три раза в неделю через нативную радиоцефальную фистулу, сформированную в дистальной трети предплечья. Всем пациентам проводили запись шума АВФ на протяжении 10 секунд с использованием электронного стетоскопа Littmann Model 3200. Точка аускультации – фистульная вена на 2 см дистальнее артериовенозного анастомоза. Каждый пациент был аускультирован от 10 до 15 раз в различное время суток до и после сеанса ПГД. Клинически фистулы были оценены: как нормально функционирующие – 34; как потенциально проблемные – 5; как подлежащие реконструкции в ближайшее время – 5. Таким образом, задачей математического анализа спектрограмм стало выявление закономерностей, позволяющих разделить записи на вышеуказанные категории.

Сформированная из 653 спектрограмм база данных подверглась анализу по методу оценки энтропии и сложности, позволяющему отличить хаотический ряд, порожденный простой детерминированной системой, от чисто случайных рядов. Для выявления закономерностей был применен алгоритм кластеризации Уишарта [19].

В работе О. А. Rosso и соавт. [20] предложена методика, позволяющая отличить хаотический ряд, с одной стороны, от ряда, порожденного простой детерминированной системой, с другой – от набора случайных рядов: обычное или дробное броуновское движение, белый шум и т. д. Подход предполагает вычисление для данного временного ряда $T_i = \{x_i\}$ двух характеристик – энтропии и сложности. Результирующее положение этих двух показателей на соответствующей плоскости демонстрирует прямое отношение к верхней и нижней теоретической границе, следовательно, определяет тип ряда.

Алгоритм вычисления плоскости энтропийной сложности основан на построении распределения вероятностей для заданного ряда. Для построения указанного распределения используется концепция порядковых паттернов, описанная С. Vandt и соавт. [21]. Согласно концепции в соответствие каждому ряду ста-

вят точку на плоскости «энтропия – сложность», при этом положение этой точки относительно верхней и нижней теоретической границы указывает на тип наблюдаемого ряда [20]. Данный подход предполагает вычисление для данного временного ряда $T_i = \{x_i\}$ двух характеристик – энтропии и сложности. Первая представляет собой стандартную энтропию Шеннона, нормированную на максимальное значение:

$$S(P) = - \sum_{i=1}^N P_i \cdot \ln P_i,$$

$$H(P) = \frac{S(P)}{S_{max}}$$

где P – дискретное распределение вероятностей $P = \{P_i, i = 1, \dots, N\}$, N – число степеней свободы.

В дальнейшем будем считать, что единственным ограничивающим условием для P , представляющим состояние нашей системы, является $\sum_{i=1}^N P_i = 1$.

В случае, когда $S(P) = S_{min} = 0$, можно с полной уверенностью предсказать, какие возможные исходы i с вероятностью P_i действительно состоятся. Таким образом, знание о распределении вероятностей в этом случае максимально. Напротив, знание о нормальном распределении вероятностей P_e минимально в случае, когда $S_{max} = \ln N = S(P_e)$, где P_e – равномерное распределение, N – число степеней свободы.

MPR-сложность представляет собой произведение между количеством информации, хранящимся в системе, и ее неравновесностью $H(P)$ и вычисляется следующим образом: $C(P) = Q(P, P_e) \cdot H(P)$.

Здесь Q – это дивергенция Дженсона – Шеннона между рассматриваемым распределением P и равномерным распределением P_e , которая вычисляется следующим образом:

$$Q(P, P_e) = Q_0 \cdot \left(S\left(\frac{P+P_e}{2}\right) - S\left(\frac{P}{2}\right) - S\left(\frac{P_e}{2}\right) \right),$$

где Q_0 – константа нормализации, равная обратно максимально возможному значению $Q(P, P_e)$, вычисляемая по формуле:

$$Q_0 = -2 \left\{ \left(\frac{N+1}{N} \right) \ln(N+1) - 2 \ln(2N) + \ln N \right\}^{-1}.$$

Подчеркнем, что определенная выше статистическая сложность равна произведению двух нормализованных энтропий (энтропии Шеннона и дивергенции Дженсона – Шеннона), но это нетривиальная функция энтропии, поскольку она зависит от двух различных распределений вероятностей, соответствующих состоянию системы P и равномерному распределению P_e . В зависимости от размера ряда для каждого наблюдения появляется новый набор доступных состояний со своим соответствующим распределением вероятностей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Примененный подход позволил вычислить для каждой спектрограммы две характеристики – энтропию и сложность, положение которых на соответствующей плоскости относительно верхней и нижней теоретической границы определяет тип функционирующей АВФ. Результаты группировки представлены на рис. 1.

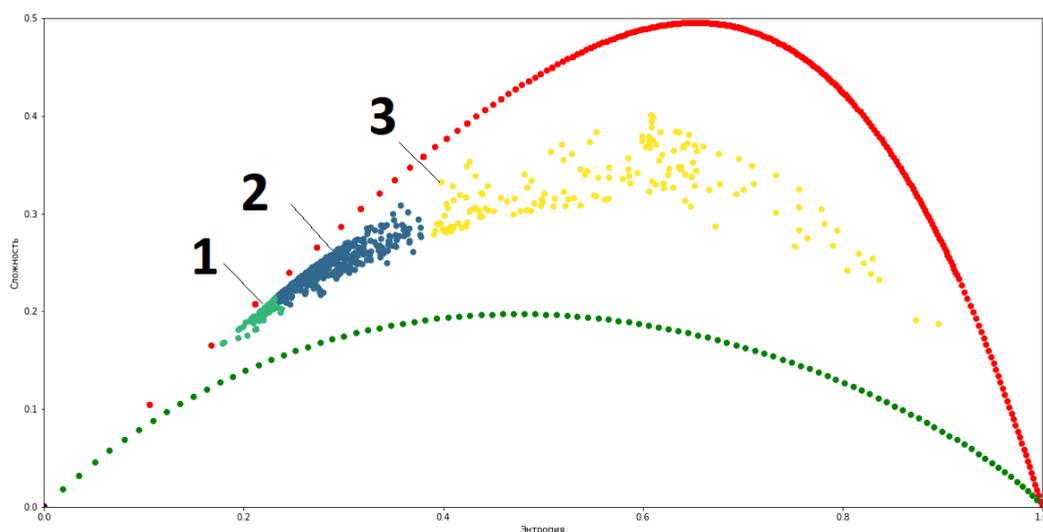


Рис. 1. Распределение графического отображения аудиограмм артериовенозной фистулы на плоскости «энтропия – сложность»:

- 1 – нормально функционирующие артериовенозные фистулы;
- 2 – потенциально «проблемные» артериовенозные фистулы;
- 3 – артериовенозные фистулы, подлежащие реконструкции (рис. авторов)

Алгоритм группировки результатов позволил выделить три кластера: первый – в области регулярных движений, соответствовал нормально функционирующим АФ; третий – в области хаотических движений и движений, близких к хаотическим, соответствовал фистулам, подлежащим реконструкции; второй – занимал промежуточное положение и соответствовал «потенциально проблемным» АФ.

Функционирующая АФ производит шум, который появляется в результате движения потоков крови на высокой скорости из артериального колена с высоким давлением в фистульную вену с более низким давлением. Чем больше нарушается ламинарность кровотока, тем более хаотичные и сложные шумы можно зафиксировать аускультативно [18]. При создании цифровой аудиозаписи эти параметры (хаотичность и сложность) вполне возможно представить в числовом виде и подвергнуть математическому анализу. В настоящее время специалистом, определяющим функциональное состояние АФ, является врач диализного центра, который наблюдает пациента 3 раза в неделю. В случае определения какой-либо патологии АФ врач функциональной диагностики выполняет пациенту ультразвуковое исследование. Дальнейшее решение о способе коррекции АФ принимает третий специалист – сосудистый хирург [22]. Столь растянутая диагностическая цепь очень часто становится причиной критической обструкции АФ и необходимости формирования нового сосудистого доступа [23]. Для раннего выявле-

ния стеноза и обструкции АФ требуется ежедневное наблюдение у соответствующих специалистов, что невозможно. Поэтому возникает потребность создания системы круглосуточного мониторинга функционирования АФ, которая в случае снижения уровня кровотоков по фистульной вене подаст сигнал пациенту о необходимости срочного обращения в диализный центр. Раннее обращение пациента с начинающимся тромбозом или стенозом АФ позволяет в полной мере применить технологию селективного тромболитика или баллонной ангиопластики для продления функционирования действующего сосудистого доступа [24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанный алгоритм анализа аудиограмм, основанный на определении параметров «хаотичность» и «сложность» звука, позволяет разделить шумы артериовенозной фистулы на три кластера, каждому из которых соответствует своя вероятность дисфункции.

2. Данный алгоритм может использоваться при разработке индивидуальных мобильных устройств для постоянного мониторинга состояния артериовенозной фистулы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

- Okpechi I. G., Nthite T., Swanepoel C. R. Health-Related Quality of Life in Patients on Hemodialysis and Peritoneal Dialysis // *Saudi J Kidney Dis Transpl.* 2013. Vol. 24, Is. 3. P. 519–526. DOI 10.4103/1319-2442.111036.
- Himmelfarb J., Vanholder R., Mehrotra R., Tonelli M. The Current and Future Landscape of Dialysis // *Nat Rev Nephrol.* 2020. Vol. 16, Is. 10. P. 573–585. DOI 10.1038/s41581-020-0315-4.
- Farouk S. S., Fiaccadori E., Cravedi P., Campbell K. N. COVID-19 and the Kidney: What We Think We Know so Far and What We Don't // *J Nephrol.* 2020. Vol. 33, Is. 6. P. 1213–1218. DOI 10.1007/s40620-020-00789-y.
- Chan L., Chaudhary K., Saha A., et al. Acute Kidney Injury in Hospitalized Patients with COVID-19 // *medRxiv.* 2020. DOI 10.1101/2020.05.04.20090944.
- Hirsch J. S., Ng J. H., Ross D. W. et al. Acute Kidney Injury in Patients Hospitalized with COVID-19 // *Kidney Int.* 2020. Vol. 98, Is. 1. P. 209–218. DOI 10.1016/j.kint.2020.05.006.
- Malberti F., Pecchini P., Marchi G., Foramitti M. When a Nephrology Ward Becomes a COVID-19 Ward: The Cremona Experience // *J Nephrol.* 2020. Vol. 33, Is. 4. P. 625–628. DOI 10.1007/s40620-020-00743-y.
- Alberici F., Delbarba E., Manenti C. et al. A Report from the Brescia Renal COVID Task Force on the Clinical Characteristics and Short-Term Outcome of Hemodialysis Patients with SARS-CoV-2 Infection // *Kidney Int.* 2020. Vol. 98, Is. 1. P. 20–26. DOI 10.1016/j.kint.2020.04.030.
- Pecoits-Filho R., Okpechi I. G., Donner J.-A. et al. Capturing and Monitoring Global Differences in Untreated and Treated End-Stage Kidney Disease, Kidney Replacement Therapy Modality, and Outcomes // *Kidney Int Suppl.* 2020. Vol. 10, Is. 1. P. e3–e9. DOI 10.1016/j.kisu.2019.11.001.
- Bello A. K., Levin A., Tonelli M. et al. Global Kidney Health Atlas: A Report by the International Society of Nephrology on the Current State of Organization and Structures for Kidney Care across the Globe. Brussels, Belgium : International Society of Nephrology, 2017. 182 p. URL: https://www.kidneycareuk.org/documents/52/ISN_Global_kidney_health_atlas.pdf
- Liyanage T., Ninomiya T., Jha V. et al. Worldwide Access to Treatment for End-Stage Kidney Disease: A Systematic Review // *The Lancet.* 2015. Vol. 385, Is. 9981. P. 1975–1982. DOI 10.1016/S0140-6736(14)61601-9.
- Калинин Р. Е., Сучков И. А., Егоров А. А. и др. Примеры нестандартных реконструкций сосудистого доступа у диализных пациентов // *Новости хирургии.* 2017. № 1. С. 87–92. DOI 10.18484/2305-0047.2017.1.87.
- Gottmann U., Sadick M., Kleinhuber K. et al. Central Vein Stenosis in a Dialysis Patient: A Case Report // *J Med Case Rep.* 2012. Vol. 6. P. 189. DOI 10.1186/1752-1947-6-189.
- Brahmbhatt A., Remuzzi A., Franzoni M., Misra S. The Molecular Mechanisms of Hemodialysis Vascular Access Failure // *Kidney Int.* 2016. Vol. 89, Is. 2. P. 303–316. DOI 10.1016/j.kint.2015.12.019.
- Ota K., Nishiura Y., Ishihara S. et al. Evaluation of Hemodialysis Arteriovenous Bruit by Deep Learning // *Sensors (Basel).* 2020. Vol. 20, Is. 17. P. 4852. DOI 10.3390/s20174852.
- Salman L., Beathard G. Interventional Nephrology: Physical Examination as a Tool for Surveillance for the Hemodialysis Arteriovenous Access // *Clin J Am Soc Nephrol.* 2013. Vol. 8, Is. 7. P. 1220–1227. DOI 10.2215/CJN.00740113.
- Kokorozashi N. Analysis of the Shunt Sound Frequency Characteristic Changes Associated with Shunt Stenosis // *Jpn Soc Dial Ther J.* 2010. Vol. 3. P. 287–295. (In Japanese).
- Todo A., Kadohaka T., Yoshioka M. et al. Frequency Analysis of Shunt Sounds in the Arteriovenous Fistula on Hemodialysis Patients // *Proceedings of the 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, and the 13th International Symposium on Advanced Intelligence Systems, Kobe, Japan, 20–24 November, 2012.* DOI 10.1109/SCIS-ISIS.2012.6505044.
- Wang H.-Y., Wu C.-H., Chen C.-Y., Lin B.-S. Novel Noninvasive Approach for Detecting Arteriovenous Fistula Stenosis // *IEEE Trans Biomed Eng.* 2014. Vol. 61, Is. 6. P. 1851–1857. DOI 10.1109/TBME.2014.2308906.

- Okpechi I. G., Nthite T., Swanepoel C. R. Health-Related Quality of Life in Patients on Hemodialysis and Peritoneal Dialysis // *Saudi J Kidney Dis Transpl.* 2013. Vol. 24, Is. 3. P. 519–526. DOI 10.4103/1319-2442.111036.
- Himmelfarb J., Vanholder R., Mehrotra R., Tonelli M. The Current and Future Landscape of Dialysis // *Nat Rev Nephrol.* 2020. Vol. 16, Is. 10. P. 573–585. DOI 10.1038/s41581-020-0315-4.
- Farouk S. S., Fiaccadori E., Cravedi P., Campbell K. N. COVID-19 and the Kidney: What We Think We Know so Far and What We Don't // *J Nephrol.* 2020. Vol. 33, Is. 6. P. 1213–1218. DOI 10.1007/s40620-020-00789-y.
- Chan L., Chaudhary K., Saha A., et al. Acute Kidney Injury in Hospitalized Patients with COVID-19 // *medRxiv.* 2020. DOI 10.1101/2020.05.04.20090944.
- Hirsch J. S., Ng J. H., Ross D. W. et al. Acute Kidney Injury in Patients Hospitalized with COVID-19 // *Kidney Int.* 2020. Vol. 98, Is. 1. P. 209–218. DOI 10.1016/j.kint.2020.05.006.
- Malberti F., Pecchini P., Marchi G., Foramitti M. When a Nephrology Ward Becomes a COVID-19 Ward: The Cremona Experience // *J Nephrol.* 2020. Vol. 33, Is. 4. P. 625–628. DOI 10.1007/s40620-020-00743-y.
- Alberici F., Delbarba E., Manenti C. et al. A Report from the Brescia Renal COVID Task Force on the Clinical Characteristics and Short-Term Outcome of Hemodialysis Patients with SARS-CoV-2 Infection // *Kidney Int.* 2020. Vol. 98, Is. 1. P. 20–26. DOI 10.1016/j.kint.2020.04.030.
- Pecoits-Filho R., Okpechi I. G., Donner J.-A. et al. Capturing and Monitoring Global Differences in Untreated and Treated End-Stage Kidney Disease, Kidney Replacement Therapy Modality, and Outcomes // *Kidney Int Suppl.* 2020. Vol. 10, Is. 1. P. e3–e9. DOI 10.1016/j.kisu.2019.11.001.
- Bello A. K., Levin A., Tonelli M. et al. Global Kidney Health Atlas: A Report by the International Society of Nephrology on the Current State of Organization and Structures for Kidney Care across the Globe. Brussels, Belgium : International Society of Nephrology, 2017. 182 p. URL: https://www.kidneycareuk.org/documents/52/ISN_Global_kidney_health_atlas.pdf
- Liyanage T., Ninomiya T., Jha V. et al. Worldwide Access to Treatment for End-Stage Kidney Disease: A Systematic Review // *The Lancet.* 2015. Vol. 385, Is. 9981. P. 1975–1982. DOI 10.1016/S0140-6736(14)61601-9.
- Kalinin R. E., Suchkov I. A., Egorov A. A. et al. Examples of Non-Standard Reconstructions in Hemodialysis Patients with Permanent Vascular Access // *Surgery News.* 2017. No. 1. P. 87–92. DOI 10.18484/2305-0047.2017.1.87. (In Russian).
- Gottmann U., Sadick M., Kleinhuber K. et al. Central Vein Stenosis in a Dialysis Patient: A Case Report // *J Med Case Rep.* 2012. Vol. 6. P. 189. DOI 10.1186/1752-1947-6-189.
- Brahmbhatt A., Remuzzi A., Franzoni M., Misra S. The Molecular Mechanisms of Hemodialysis Vascular Access Failure // *Kidney Int.* 2016. Vol. 89, Is. 2. P. 303–316. DOI 10.1016/j.kint.2015.12.019.
- Ota K., Nishiura Y., Ishihara S. et al. Evaluation of Hemodialysis Arteriovenous Bruit by Deep Learning // *Sensors (Basel).* 2020. Vol. 20, Is. 17. P. 4852. DOI 10.3390/s20174852.
- Salman L., Beathard G. Interventional Nephrology: Physical Examination as a Tool for Surveillance for the Hemodialysis Arteriovenous Access // *Clin J Am Soc Nephrol.* 2013. Vol. 8, Is. 7. P. 1220–1227. DOI 10.2215/CJN.00740113.
- Kokorozashi N. Analysis of the Shunt Sound Frequency Characteristic Changes Associated with Shunt Stenosis // *Jpn Soc Dial Ther J.* 2010. Vol. 3. P. 287–295. (In Japanese).
- Todo A., Kadohaka T., Yoshioka M. et al. Frequency Analysis of Shunt Sounds in the Arteriovenous Fistula on Hemodialysis Patient // *Proceedings of the 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, and the 13th International Symposium on Advanced Intelligence Systems, Kobe, Japan, 20–24 November, 2012.* DOI 10.1109/SCIS-ISIS.2012.6505044.
- Wang H.-Y., Wu C.-H., Chen C.-Y., Lin B.-S. Novel Noninvasive Approach for Detecting Arteriovenous Fistula Stenosis // *IEEE Trans Biomed Eng.* 2014. Vol. 61, Is. 6. P. 1851–1857. DOI 10.1109/TBME.2014.2308906.

19. Gromov V. A., Borisenko E. A. Predictive Clustering on Non-Successive Observations for Multi-Step Ahead Chaotic Time Series Prediction // *Neural Computing and Applications*. 2015. Vol. 26, No. 8. P. 1827–1838.
20. Rosso O. A., Carpi L. C., Saco P. M., Ravetti M. G. Causality and the Entropy–Complexity Plane: Robustness and Missing Ordinal Patterns // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2012. Vol. 391, Is. 1–2. P. 42–55.
21. Bandt C., Pompe B. Permutation Entropy: A Natural Complexity Measure for Time Series // *Physical Review Letters*. 2002. Vol. 88, Is. 17. P. 174102. DOI 10.1103/PhysRevLett.88.174102.
22. Корытцев В. К., Мельников М. А., Кравцов П. Ф. и др. Случай успешного лечения хронической сердечной недостаточности путем снижения объемного кровотока по артериовенозной фистуле спиральным корректором: клиническое наблюдение // *Нефрология и диализ*. 2016. Т. 18, № 1. С. 76–79.
23. Николаев Е. Н., Мазайшвили К. В., Лобанов Д. С. и др. Современное состояние проблемы тромбоза сосудистого доступа у больных на гемодиализе // *Вестник СурГУ. Медицина*. 2019. № 3. С. 8–14.
24. Liao M.-T., Chen M.-K., Hsieh M.-Y. et al. Drug-Coated Balloon versus Conventional Balloon Angioplasty of Hemodialysis Arteriovenous Fistula or Graft: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials // *PLoS One*. 2020. Vol. 15, Is. 4. P. e0231463. DOI 10.1371/journal.pone.0231463.eCollection2020.
19. Gromov V. A., Borisenko E. A. Predictive Clustering on Non-Successive Observations for Multi-Step Ahead Chaotic Time Series Prediction // *Neural Computing and Applications*. 2015. Vol. 26, No. 8. P. 1827–1838.
20. Rosso O. A., Carpi L. C., Saco P. M., Ravetti M. G. Causality and the Entropy–Complexity Plane: Robustness and Missing Ordinal Patterns // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2012. Vol. 391, Is. 1–2. P. 42–55.
21. Bandt C., Pompe B. Permutation Entropy: A Natural Complexity Measure for Time Series // *Physical Review Letters*. 2002. Vol. 88, Is. 17. P. 174102. DOI 10.1103/PhysRevLett.88.174102.
22. Koryttsev V. K., Melnikov M. A., Kravtsov P. F. et al. A Case of Successful Treatment of Chronic Heart Failure by Reducing the Blood Flow in for Arteriovenous Fistula with Spiral Corrector (A Case Report) // *Nephrology and Dialysis*. 2016. Vol. 18, No. 1. P. 76–79. (In Russian).
23. Nikolaev E. N., Mazayshvili K. V., Lobanov D. S. et al. Current State of Vascular Access Thrombosis in Patients with Hemodialysis // *Vestnik SurGU. Medicina*. 2019. No. 3. P. 8–14. (In Russian).
24. Liao M.-T., Chen M.-K., Hsieh M.-Y. et al. Drug-Coated Balloon versus Conventional Balloon Angioplasty of Hemodialysis Arteriovenous Fistula or Graft: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials // *PLoS One*. 2020. Vol. 15, Is. 4. P. e0231463. DOI 10.1371/journal.pone.0231463.eCollectio2020.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

П. Ф. Кравцов – кандидат медицинских наук, врач – сердечно-сосудистый хирург.

Е. Н. Николаев – аспирант.

К. В. Мазайшвили – доктор медицинских наук, профессор.

В. А. Громов – доктор физико-математических наук, профессор.

Е. И. Зворыкина – студент.

Ю. Н. Бесчастнов – стажер-исследователь.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

P. F. Kravtsov – Candidate of Sciences (Medicine), Cardiovascular Surgeon.

E. N. Nikolaev – Postgraduate.

K. V. Mazayshvili – Doctor of Sciences (Medicine), Professor.

V. A. Gromov – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor.

E. I. Zvorykina – Student.

Yu. N. Beschastnov – Research Assistant.