

УДК 616.28-072:616.283.1-089.843
<https://doi.org/10.18692/1810-4800-2023-6-82-87>

Биофизические аспекты слухового восприятия у пациентов с кохлеарными имплантами

В. И. Пудов¹, О. В. Зонтова¹

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи, Санкт-Петербург, 190013, Россия

В последние годы достигнут огромный прогресс в проектировании и эксплуатации кохлеарных имплантов. В опубликованной литературе отмечается, что качество восприятия звука среди пользователей кохлеарных имплантов сильно ограничено. Обычно пациенты испытывают трудности в сложных ситуациях, таких как восприятие речи в шумных условиях или в ситуации с несколькими говорящими. Существует множество факторов, как технических, так и физиологических, которые затрудняют слуховое восприятие у пациентов с кохлеарными имплантами. Основными характеристиками слухового восприятия являются высота и громкость воспринимаемых звуков. В настоящей статье представлен анализ литературных данных относительно особенностей слухового восприятия у пользователей кохлеарных имплантов (СИ). Существующие исследования показывают, что качество звука у пользователей СИ ограничено в первую очередь искажением высоты тона и сжатием динамического диапазона. Важнейшей характеристикой слухового восприятия является дифференциальный порог по частоте, который составляет в пределах два полутона, в то время как участники с нормальным слухом обнаруживают разницу в один полутоном. Низкая разрешающая способность по частоте определяет низкую разборчивость речи. Новые исследования должны быть направлены на разработку перспективных методов повышения качества восприятия звука у пользователей СИ.

Ключевые слова: кохлеарная имплантация, восприятие высоты, восприятие громкости, дифференциальный порог по частоте, распознавание речи.

Для цитирования: Пудов В. И., Зонтова О. В. Биофизические аспекты слухового восприятия у пациентов с кохлеарными имплантами. *Российская оториноларингология*. 2023;22(6):82–87. <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2023-6-82-87>

Biophysical aspects of auditory perception in patients with cochlear implants

V. I. Pudov¹, O. V. Zontova¹

¹ Saint Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech, Saint Petersburg, 190013, Russia

In recent years, huge progress has been made in the design and operation of cochlear implants. The published literature notes that the quality of sound perception among cochlear implant users is severely limited. Usually, patients experience difficulties in difficult situations, such as speech perception in noisy environments or in a situation with several speakers. There are many factors, both technical and physiological, that complicate auditory perception in patients with cochlear implants. The main characteristics of auditory perception are the height and volume of perceived sounds. This article presents an analysis of the literature data on the features of auditory perception in patients with cochlear implants (CI). Existing studies show that the sound quality of CI users is limited primarily by pitch distortion and dynamic range compression. The most important characteristic of auditory perception is the frequency differential threshold, which is within two semitones, while participants with normal hearing detect a difference of one semitone. Low frequency resolution determines low speech intelligibility. New research should be aimed at developing promising methods to improve the quality of sound perception among CI users.

Keywords: cochlear implantation, pitch perception, loudness perception, frequency differential threshold, speech recognition.

For citation: Pudov V. I., Zontova O. V. Biophysical aspects of auditory perception in patients with cochlear implants. *Russian Otorhinology*. 2023;22(6):82-87. <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2023-6-82-87>

В настоящее время кохлеарная имплантация (КИ) достаточно успешно используется в реабилитации лиц с тяжелой степенью тугоухости и полной глухотой, которым не помогают даже самые современные слуховые аппараты. Тем не менее результаты кохлеарной имплантации варьируют в достаточно широких пределах. Наилучшие результаты достигаются у взрослых пациентов с постлингвальной глухотой и у глухих детей с врожденной глухотой, проимплантированных в раннем возрасте. С возрастом пластичность мозга у детей снижается и эффективность кохлеарной имплантации уменьшается. Это может объяснить, почему глухие дети, имплантированные до трех-четырехлетнего возраста, обычно имеют гораздо лучшие результаты, чем глухие дети, имплантированные в более позднем возрасте [1–3].

В последние годы отмечается значительный прогресс в совершенствовании систем кохлеарной имплантации. Тем не менее остается много возможностей для их улучшения [4]. Как отмечают большинство авторов, даже пациенты с наилучшими результатами все еще имеют трудности слухового восприятия в сложных акустических условиях, таких как речь в шуме или в ситуации с одновременно несколькими говорящими [5]. Одну из самых больших проблем для прослушивания у пациентов с кохлеарными имплантатами представляет восприятие музыки [6]. Тем не менее основное предназначение кохлеарной имплантации – это обеспечить как можно более полноценное восприятие разговорной речи.

Речевой сигнал кроме обычных акустических признаков, которые вызывают определенные субъективные ощущения (громкости, высоты, тембра), передает закодированную смысловую информацию. Речевой диапазон характеризуется следующими акустическими параметрами: ча-

стотный диапазон 100–7000 Гц, средний уровень разговорной речи 60–70 дБ, динамический диапазон 35–45 дБ и достаточно небольшие временные интервалы – от нескольких десятков до сотен миллисекунд [7].

Вполне естественно предположить, что способность слухового восприятию устной речи не может быть одинаковой при акустической и электрической стимуляции слуховой системы ввиду разных точек воздействия на рецепторы внутреннего уха в первом случае и на нейроны спирального ганглия во втором случае. Попробуем ответить на некоторые вопросы особенностей слухового восприятия у пациентов с кохлеарными имплантатами на основании представлений классической психоакустики. Важнейшей характеристикой слухового восприятия является способность слуховой системы человека в определении высоты, громкости и длительности звука [7].

Первостепенное значение для слуховой системы имеет восприятие высоты звука. Все современные многоканальные системы КИ передают информацию о высоте звука, используя тонопические карты расположения электродов вдоль базилярной мембраны улитки. Благодаря использованию полосовых фильтров входной акустический сигнал разделяется на несколько частотных каналов, каждый из которых передает определенную полосу частот на свой электрод (рис.), соответственно: низкочастотные сигналы подаются на апикальные, а высокочастотные на базальные электроды в соответствии с тонопической организацией улитки. При этом апикальные нервные волокна (дендриты клеток спирального ганглия) воспринимают и передают низкочастотную, а базальные высокочастотную информацию в центральные отделы слуховой системы, где и возникает полный спектр слуховых ощущений.

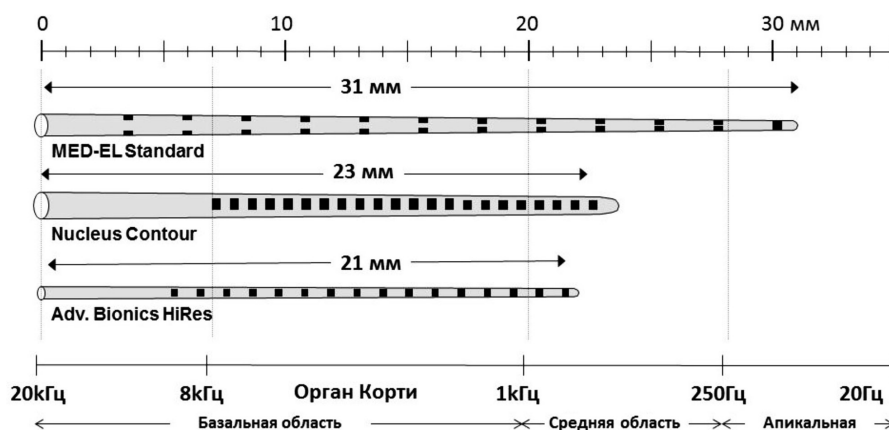


Рис. Расположение электродов (Med-El Standard, Nucleus Contour, Advanced Bionics HiRes) на частотной оси вдоль развернутой улитки

Fig. Electrode location (Med-El Standard, Nucleus Contour, Advanced Bionics HiRes) on the frequency axis along the uncoiled cochlea

Центральные частоты полосовых фильтров рассчитываются таким образом, чтобы стимуляция каждого отдельного электрода вдоль всей электродной решетки максимально приближалась к естественной тонотопической организации улитки. Однако на практике трудно достичь полного соответствия тонотопике улитки. В разных системах КИ электродная решетка имеет разную длину активной ее части и разную глубину введения в улитку. Но даже самая большая электродная решетка не может обеспечить правильное тонотопическое распределение частот для всех электродов. Так, при длине базилярной мембраны 33 мм [8], перекрывающей восприятие частот от 20 до 20 000 Гц, очень трудно обеспечить тонотопическое распределение частотного диапазона импланта 100–8000 Гц вдоль всей длины электродной решетки. Большинство электродных решеток не достигают самых верхушечных завитков улитки, где тонотопически представлены низкие частоты, что препятствует их полноценному восприятию. В настоящее время ни одна электродная решетка не может быть вставлена глубже, чем на 30 мм от круглого окна, а в большинстве случаев глубина введения составляет в среднем около 20 мм, что затрудняет восприятие частот ниже 750 Гц [9]. Тем не менее известно, что пользователи КИ хорошо воспринимают все звуки в этом низкочастотном диапазоне. Согласно современным представлениям высота звука определяется не только тонотопической организацией улитки – «теория места», но и «временной теорией», которая базируется на анализе временной структуры периодических (повторяющихся) звуковых сигналов (периодичность или частота повторения). При нормальном слухе синхронизация возбуждения слухового нерва с различными циклами звуковой волны обеспечивает информацию о высоте на частотах примерно до 5000 Гц. При электрическом слухе у пользователей СИ высота низкочастотного звука передается с изменением частоты стимуляции только на частотах до 300 Гц [10]. Апикулярная область улитки имеет важное значение в восприятии интонации высказывания и тембра голоса, что повышает качество восприятия речи в целом. Как было установлено у пациентов, которым имплантировали электродную решетку длиной 31,5 мм, распознавание речи было лучше, чем у пациентов с 28-миллиметровой решеткой. Более глубокое введение электродов улучшает распознавание речи вплоть до угла введения 600°, после чего распознавание не изменяется [11].

В отличие от низкочастотного слуха восприятие высоких частот определяется исходя из «теории места» в соответствии с тонотопической организацией улитки или так называемой функцией Гринвуда [12]. Однако чаще всего запрограмми-

рованная центральная частота полосового фильтра и теоретическая частота (рассчитанная в зависимости от расположения вдоль базилярной мембраны) не совпадают, особенно в базальных завитках улитки, что приводит к неточному восприятию высоты тона [11]. Это физическое несоответствие усугубляется сочетанием различий в размерах улитки, длине электродной решетки и глубине ее введения. Эффект несоответствия больше всего проявляется на высоких частотах, которые искусственно переносятся в еще более высокочастотную область улитки и приводят к тому, что речь окружающих, по словам взрослых позднооглохших пациентов, воспринимается «как у Буратино». Однако через некоторый период происходит адаптация к новым слуховым ощущениям и восприятие речи становится вполне естественным. По данным Рейсс с соавт. [13], высота тона электрода может также меняться со временем, иногда на целые две октавы, в течение первых лет использования имплантата. Вероятно, при этом в центральных отделах происходит перестройка в соответствии с новой тонотопикой улитки [14], (также, как и у пациентов с диплокузисом). Таким образом, мозг воспринимает информацию о высоте звука как за счет тонотопической организации улитки (теория места – частотный анализ), так и за счет информации о периоде звуковой волны (временной анализ). Самостоятельно каждая теория, по-видимому, не может объяснить восприятие высоты полностью, так как та и другая информация передается по одним и тем же нервным волокнам.

Другой чрезвычайно важной характеристикой слухового восприятия является способность различения звуков по высоте. Способность различения двух разных тонов, различающихся по частоте, определяет разрешающую способность слуха и называется дифференциальным порогом по частоте. В многочисленных исследованиях установлено, что человек с нормальным слухом способен различить по высоте два звука, различающихся по всего на 0,2%. При сенсоневральной тугоухости дифференциальный порог повышается до 1% [15, 16], а у пациентов с кохлеарными имплантами – больше 6% [10]. Другие авторы отмечают, что пороги различения частоты чистого тона при кохлеарной имплантации варьировали от 1,5 до 9,9% [17].

Как пишут некоторые авторы, даже в многоканальных системах кохлеарной имплантации различение частоты является достаточно сложной задачей, что отражается на качестве слухового восприятия особенно в сложных акустических условиях [18]. Ввиду отсутствия механизма частотной селективности, обусловленного функцией НВК (наружных волосковых клеток), а также за счет широкой области растекания электриче-

ского тока различие высоты у пациентов с КИ значительно хуже, чем у людей с нормальным слухом. L. Wagner с соавт. [18] изучили влияние различий в частотах относительно частотных полос отдельных электродов на распознавание чистого тона. Средняя частота правильного принятия решения относительно разницы высоты тона составила около 60% для пользователей КИ и около 90% для группы с нормальным слухом. Как ранее нами было установлено, у пользователей КИ способность различения по частоте составляла в пределах два полутона, в то время как участники с нормальным слухом обнаруживают разницу в один полутон [19, 20]. Различия в два полутона можно различить даже в пределах одного электрода. R. Kang с соавт. [21] сообщили, что дифференциальный порог по частоте у пользователей КИ варьировал от одного до восьми полутонов. Низкую разрешающую способность по частоте у пользователей КИ отмечают и другие авторы [18].

Второй важной характеристикой слухового восприятия является громкость звука. Громкость – это субъективное ощущение, позволяющее слуховой системе оценивать звуки по определенной шкале в зависимости от их интенсивности – от самой малой (звуковое давление $2 \cdot 10^{-5}$ Н/м²) до очень большой (звуковое давление 20 Н/м²) интенсивности, что соответствует динамическому диапазону 120 дБ. Динамический диапазон и дифференциальный порог по интенсивности определяют число градаций различений громкости, чем меньше этих градаций, тем хуже восприятие разговорной речи. При сенсоневральной тугоухости динамический диапазон уменьшается в соответствии с потерей слуха. У пациентов с КИ динамический диапазон определяется свойствами слухового нерва, и для единичного волокна он составляет всего около 6 дБ, но, учитывая, что каждый отдельный электрод стимулирует группу нервных окончаний, динамический диапазон достигает 20 дБ по значению электрического тока [22]. Для того чтобы иметь возможность передавать широкий динамический диапазон звуков в КИ, используется компрессия динамического диапазона, что обеспечивает восприятие всех окружающих звуков – от самых тихих до самых громких. Однако компрессия звукового сигнала снижает градации различения громкости, что, в свою очередь, должно отразиться на восприятии речи. Дифференциальный порог по интенсивности определяет значение минимального различения по громкости двух звуковых сигналов. У людей с нормальным слухом он составляет порядка 1 дБ, при сенсоневральной тугоухости уменьшается до 0,6–0,8 дБ, а у паци-

ентов с КИ, наоборот, увеличивается, что в свою очередь, сказывается на слуховом восприятии сложных акустических сигналов. Так, по мнению Loizou с соавт. [23], компрессия динамического диапазона по-разному отражается на восприятии различного речевого материала (гласные, согласные и предложения). По результатам этой работы сжатие больше всего влияет на распознавание гласных и меньше всего влияет на распознавание согласных. В то же время сжатие умеренно отражается на распознавании предложений. Таким образом, динамический диапазон по громкости существенно не влияет на способность восприятия устной речи.

Заключение

Кохлеарная имплантация – уникальная технология в реабилитации больных с тяжелой степенью тугоухости и полной глухотой. Тем не менее некоторые пациенты испытывают трудности в сложных акустических ситуациях, таких как восприятие речи в шумных условиях или в ситуации с несколькими говорящими. В опубликованной литературе отмечается, что качество восприятия речи у пользователей КИ существенно ограничено искажением высоты и сжатием динамического диапазона [22]. Из-за относительно низкого разрешения по частоте ухудшается различение просодики речи, что также отражается на качестве восприятия речи [17]. Turgeon с соавт. [24] впервые продемонстрировали взаимосвязь между восприятием высоты звука и уровнем распознавания речи у пользователей КИ. Авторы показали, что у пользователей КИ с высоким распознаванием речи порог различения по частоте составляет менее 10%, в то время как у пользователей с низким распознаванием он составляет около 20%.

В дальнейших исследованиях была установлена высокая корреляционная связь разборчивости речи с частотной разрешающей способностью слуха у пользователей КИ [25].

Таким образом, с одной стороны, дифференциальный порог по частоте можно использовать как простой нелингвистический тест для оценки результатов КИ, что особенно важно у детей с низким словарным запасом. С другой стороны, совершенствование технологий КИ должно быть направлено на повышение разрешающей способности по частоте. Ну и наконец можно предположить, что слуховая тренировка, направленная на повышение частотной разрешающей способности слуха, будет способствовать улучшению качества восприятия устной речи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Dorman M. F., Spahr A. J. Speech perception by adults with multichannel implants. In: Waltzman S. B., Roland J. T., Jr. (Eds.). Cochlear Implants, second ed. Thieme Medical Publishers, New York, 2006. P. 193-204.
2. Sharma S. D., Cushing S. L., Papsin B. C., Gordon K. A. Hearing and speech benefits of cochlear implantation in children: A review of the literature. *J. Pediatr. Otorhinolaryngol.* 2020;133:109984. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2020.109984>
3. Wilson B., Dorman M. Cochlear implants: A remarkable past and a brilliant future. *Hearing Research.* 2008;242:3-21.
4. Dorman M. F., Wilson B. S. The design and function of cochlear implants. *Am. Sci.* 2004;92:436-445.
5. Pralus A., Hermann R., Cholvy F., Aguera P., Moulin A. Rapid Assessment of Non-Verbal Auditory Perception in Normal-Hearing Participants and Cochlear Implant Users. *J. Clin. Med.* 2021;10(10):2093. <https://doi.org/10.3390/jcm10102093>
6. Limb Ch. J., Alexis Roy A. T. Technological, biological, and acoustical constraints to music perception in cochlear implant users. *Hearing Research.* 2014;308:13-16. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2013.04.009>
7. Алдошина И. А., Приттс Р. Музыкальная акустика. СПб.: Композитор, 2006. 720 с.
Aldoshina I. A., Pritts R. Musical acoustics. Saint Petersburg: Composer, 2006. 720 p. (In Russ.)
8. Wright A., Davis A., Bredberg G., Ulehlova L., Spencer H. Hair cell distributions in the normal human cochlea. *Acta Otolaryngol.* 1987. Suppl. 444:1-48.
9. Ketten D. R., Skinner M. W., Wang G., Vannier M. W., Gates G. A., Neely J.G. In vivo measures of cochlear length and insertion depth of nucleus cochlear implant electrode arrays. *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.* 1998. Suppl. 175:1-16.
10. Zeng F.-G., Tang Q., Lu T. Abnormal Pitch Perception Produced by Cochlear Implant Stimulation. *PLoS ONE.* 2014; 9(2):8: e88662. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088662>
11. Canfarotta M., Dillon M., Brown K., Pillsbury H., Dedmon M., O'Connell B. Insertion Depth and Cochlear Implant Speech Recognition Outcomes: A Comparative Study of 28- and 31.5-mm Lateral Wall Arrays. *Otol Neurotol.* 2022. Feb 1;43(2):183-189. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000003416>. PMID: 34772886.
12. Stakhovskaya O., Sridhar D., Bonham B. H., Leake P. A. Frequency map for the human cochlear spiral ganglion: implications for cochlear implants. *J Assoc Res Otolaryngol.* 2007;8:220-233. <https://doi.org/10.1007/s10162-007-0076-9>.
13. Reiss L. A., Turner C. W., Erenberg S. R., Gantz B. J. Changes in pitch with a cochlear implant over time. *J Assoc Res Otolaryngol.* 2007;8(2):241-257. <https://doi.org/10.1007/s10162-007-0077-8>.
14. Glennon E., Svirsky M. A., Froemke R. C. Auditory cortical plasticity in cochlear implant users. *Neurobiol.* 2020;60: 108-114.
15. Freyman R. L., Nelson D. A. Frequency Discrimination as a Function of Signal Frequency and Level in Normal-Hearing and Hearing-Impaired Listeners. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research.* December. 1991;34(6):1371-1386.
16. Бобошко М. Ю., Бердникова И. П., Салахбеков М. А., Мальцева Н. В. Психоакустические методы в диагностике центральных нарушений слуха при сенсоневральной тугоухости. *Российская оториноларингология.* 2017;2:9-16. <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2017-2-9-16>
Boboshko M. Yu., Berdnikova I. P., Salakhbekov M. A., Maltseva N. V. Psychoacoustic methods in diagnosis of central auditory disorders in patients with sensorineural hearing loss. *Rossiiskaya otorinolaringologiya.* 2017;2:9-16. (In Russ.) <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2017-2-9-16>
17. Goldworthy R. Correlations Between Pitch and Phoneme Perception in Cochlear Implant Users and Their Normal Hearing Peers. *J Assoc Res Otolaryngol.* 2015 Dec;16(6):797-809. <https://doi.org/10.1007/s10162-015-0541-9>
18. Wagner L., Altindal R., Plontke S. K. et al. Pure tone discrimination with cochlear implants and filter-band spread. *Sci Rep.* 2021;11:20236. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99799-4>
19. Пудов В. И., Стефанович М. А. Восприятие музыки пользователями кохлеарных имплантов. *Российская оториноларингология.* 2010;2(45):114-119.
Pudov V. I., Stefanovich M. A. Perception of music by cochlear implant users. *Russian Otorhinology.* 2010;2(45):114-119 (In Russ.)
20. Стефанович М. А., Пудов В. И. Особенности слуховых ощущений при электродном протезировании. Lambert, 2013. 126 с.
Stefanovich M. A., Pudov V. I. Features of auditory sensations during electrode prosthetics. Lambert, 2013. 126 p. (In Russ.)
21. Kang R., Nimmons G. L., Drennan W., Longnion J., Ruffin C., Nie K. et al. Development and validation of the university of washington clinical assessment of music perception test. *Ear Hear.* 2009;30:411-418. <https://doi.org/10.1097/AUD.0b013e3181a61bc0>
22. Meredith T., Nicole T., Charles J. Assessment and improvement of sound quality in cochlear implant users. *Laryngoscope Investigative Otolaryngology (LIO).* 2017;2(3):119-124. <https://doi.org/10.1002/lio2.71>
23. Loizou P., Dorman M. Fitzke J. The Effect of Reduced Dynamic Range on Speech Understanding: Implications for Patients with Cochlear Implants. *Ear and Hearing.* 2000;21(1):25-31.
24. Turgeon C., Champoux F., Lepore F., Ellemberg D. Deficits in auditory frequency discrimination and speech recognition in cochlear implant users. *Cochlear Implants Int.* 2015. Mar;16(2):88-94. <https://doi.org/10.1179/1754762814Y.0000000091>. PMID: 25117940
25. Zhang F., Underwood G., McGuire K., Liang C., Moore D., Jie Fu Q.. Frequency change detection and speech perception in cochlear implant users. *Hearing Research.* 2019;379:12-20.

Информация об авторах

Пудов Виктор Иванович – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник отдела диагностики и реабилитации нарушений слуха, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи (Россия, 190013, Санкт-Петербург, Бронницкая ул., д. 9); e-mail: v_pudov@mail.ru

Зонтова Ольга Викторовна – сурдопедагог, младший научный сотрудник отдела диагностики и реабилитации нарушений слуха, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи (Россия, 190013, Санкт-Петербург, Бронницкая ул., д. 9); e-mail: ozontova@yandex.ru

Information about authors

Viktor I. Pudov – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Department of Diagnostics and Rehabilitation of Hearing Impairments, Saint Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech (9, Bronnitskaya str., Saint Petersburg, Russia, 190013); e-mail: v_pudov@mail.ru

Olga V. Zontova – Speech Therapist, Senior Researcher Associate of the Department of Diagnostics and Rehabilitation of Hearing Impairments, Saint Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech (9, Bronnitskaya str., Saint Petersburg, Russia, 190013); e-mail: ozontova@yandex.ru

Статья поступила 19.04.2023

Принята в печать 25.10.2023