

Научная статья

УДК 621.3.038.615

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-64-71

Магнитный группирователь с поворотом на 540 градусов*

Шамиль Бахадирович Лачынов^{1,2}, Николай Александрович Винокуров^{1,2}

Владимир Георгиевич Ческидов¹

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера,
Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Россия

proton7956@gmail.com

Аннотация

Получение коротких электронных пучков с высоким значением пикового тока необходимо для разных исследовательских и технологических применений. Такая процедура требует наличия особой магнитной группировочной системы. Настоящая статья представляет собой обзор разработки нового магнитного группирователя. Обзор состоит из описания схемы группирователя, результатов моделирования магнитного поля и расчета опорной траектории релятивистских электронов, а также конструкции поворотных магнитов. Группирователь обеспечивает сильную зависимость времени пролета от энергии частицы и, таким образом, способен группировать относительно длинные пучки в короткие. Другой его особенностью является то, что все электронно-оптические элементы данного устройства сделаны на постоянных магнитах.

Ключевые слова

короткие электронные пучки, электронно-оптические системы, фокусирующие магниты, постоянные магниты

Финансирование

This work was supported by grant 21-12-00207 of the Russian Science Foundation..

Для цитирования

Лачынов Ш. Б., Винокуров Н. А., Ческидов В. Г. Магнитный группирователь с поворотом на 540 градусов // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 3. С. 64–71. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-64-71

*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

The 540° Magnetic Buncher

Shamil B. Lachynov^{1,2}, Nikolay A. Vinokurov^{1,2}
Vladimir G. Cheskidov¹

¹Institute of Nuclear Physics named after G. I. Budkera,
Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk National Research State University,
Novosibirsk, Russian Federation
proton7956@gmail.com

Abstract

Generation of short electron bunches with high peak current is of great importance for different research and technological applications. Such generation requires a special bunching magnetic system. The paper is an overview of the development of a new magnetic buncher. It consists of the buncher scheme description, the results of magnetic field modeling and reference particle trajectory calculation for the relativistic electrons, and of the description of bending magnets. The buncher provides a strong dependence of the time of flight on the particle energy and thus is capable to bunch relatively long bunches to short ones. Another feature of the buncher is that all electron-optical elements has been made of permanent magnets.

Keywords

Short electron bunches, electron-optical systems, focusing magnets, permanent magnets

Funding

This work was supported by grant 21-12-00207 of the Russian Science Foundation.

For citation

Lachynov S. B., Vinokurov N. A., Cheskidov V. G. The 540° Magnetic Buncher. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 64–71 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-64-71

Введение

Для многих технологических и исследовательских целей требуется получение коротких (пикосекундных) электронных сгустков с большим (более 10 нКл) зарядом, т. е. пиковым током более 1 кА. При этом нормализованный эмиттанс электронного пучка должен быть невелик (менее 100 мм · мрад). Такие сгустки можно получать группировкой (продольным сжатием) электронных сгустков с меньшим пиковым током. Для преодоления кулоновского расталкивания группировку следует проводить при релятивистских энергиях электронов в специальной магнитной системе с сильной зависимостью времени пролета от энергии частиц – так называемом магнитном группирователе. Несколько лет назад в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН была предложена оригинальная схема эффективного магнитного группирователя с поворотом на 540 градусов [1; 2], но дальнейших работ в этом направлении не проводилось.

Схема проектируемого группирователя изображена на рис. 1. Группирующее устройство состоит из двух тридцатиградусных магнитов с параллельными краями и двух магнитных зеркал. Проходя последовательно через первый магнит с параллельными краями, большое магнитное зеркало, малое магнитное зеркало, снова большое магнитное зеркало и второй магнит с параллельными краями, электроны совершают поворот на $30 + 120 + 240 + 120 + 30 = 540^\circ$. Радиусы траектории в поворотных магнитах и расстояния между магнитами подобраны таким образом, что поворот является ахроматическим. Это значит, что горизонтальный угол и координата электрона, выходящего из последнего поворотного магнита, не зависят (в линейном приближении) от отклонения энергии этого электрона от расчетной энергии (т. е. энергии опорной частицы). Расчет траектории, продольной дисперсии и поперечной фокусировки частиц описан в статье [3]. Группирователь предполагается установить в канал инжекции электронов с кинетической энергией около 1,5 МэВ на установке «Новосибирский лазер на свободных электронах» [4]. Тридцатиградусные магниты уже существуют, поэтому в данной работе представлены только конструкция и результаты расчета поля магнитных зеркал.

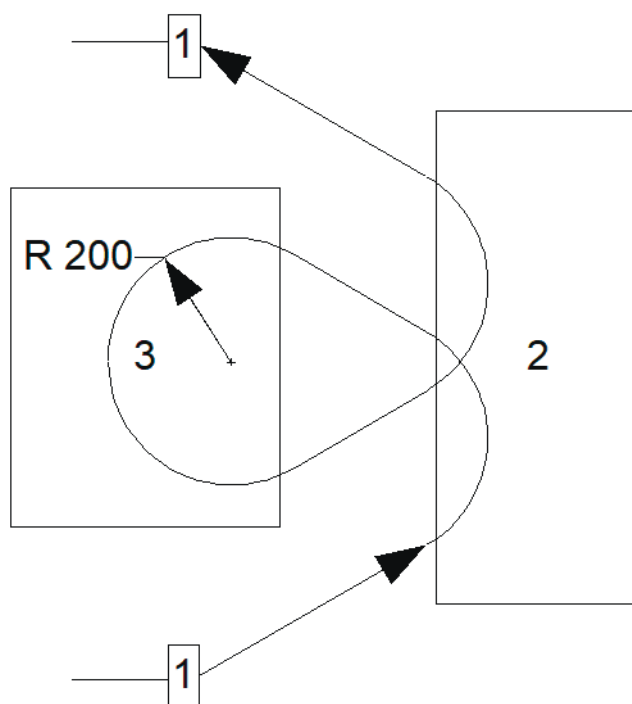


Рис. 1. Схема группирующей магнитной системы с поворотом на 540 градусов:
1 – тридцатиградусные магниты; 2 – большое магнитное зеркало; 3 – малое магнитное зеркало.
Опорная траектория электронов показана сплошной кривой

Fig. 1. Scheme of 540° buncher:

1 – 30° bending magnets; 2 – large magnetic mirror; 3 – small magnetic mirror

Расчет и оптимизация магнитной системы

Для получения высокой стабильности магнитного поля и удешевления системы в конструкции магнитных зеркал использованы постоянные магниты из сплава неодим-железо-бор, имеющие остаточную индукцию B_r около 13 кГс и энергетическое произведение $(BH)_{\max}$ около 40 МГс·Э. При таких параметрах магнитов для минимизации их количества (полного объема магнитного материала) надо получить индукцию в магнитах около 7 кГс. При этом необходимое поле в рабочем зазоре магнитов гораздо меньше (около 300 Гс). Поэтому для получения достаточно большой индукции в постоянных магнитах железный магнитопровод должен обеспечить концентрацию магнитного потока, проходящего через рабочий зазор, в объеме, занятом постоянными магнитами. При разработке геометрии магнитопроводов были выбраны стандартные плитки магнитного материала с размерами $40 \times 40 \times 20$ мм³ с намагниченностью вдоль коротких ребер. Большое и малое магнитные зеркала различаются только некоторыми размерами и величиной поля в рабочем зазоре.

Схема магнитного зеркала показана на рис. 2. Для приближенного расчета поля в рабочем зазоре и минимизации объема магнитного материала был использован аналитический расчет [5]:

$$B = \frac{B_r S}{2\pi CG},$$

где S – суммарная площадь плиток магнитного материала в верхней половине магнита и предполагается, что высота этих плиток равна высоте g зазора между железными полюсом и экра-

ном, находящимся под нулевым потенциалом, C – эквивалентная емкость одного (например, верхнего) полюса. Для расчетов магнитного поля обычно используют не эквивалентную емкость C , а магнитную проводимость $4\pi C$. Последняя равна отношению магнитного потока, вытекающего из полюса в отсутствие постоянных магнитов при заданном скалярном магнитном потенциале, к величине потенциала. Эта величина зависит от формы магнитопроводов и довольно легко оценивается. Следующий этап работы состоял в расчете поля при помощи CST-Studio, программного пакета, реализующего функции системы автоматизированного проектирования и электромагнитного моделирования. При этом оптимизировались размеры элементов магнитопровода для получения нужного поля в рабочих зазорах обоих магнитных зеркал при использовании минимального объема магнитного материала.

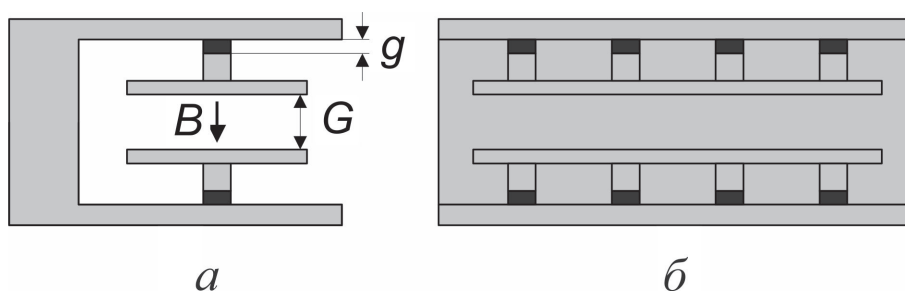


Рис. 2. Схема магнитного зеркала:

a – вид сбоку, b – вид спереди. Черным цветом показаны плитки магнитного материала, серым – железные магнитопроводы, а стрелкой – направление вектора поля в рабочем зазоре

Fig. 2. Scheme of a magnetic mirror: (a) side view and (b) front view. Tiles of the magnetic material are in black, the iron magnetic cores are in gray, and the arrow shows the direction of the field vector in the working gap.

Кроме того, оптимизировалось расположение плиток постоянных магнитов для получения необходимой однородности поля в рабочем зазоре. Один из результатов расчетов показан на рис. 3. При рабочем зазоре $G = 84$ мм характерные значения B поля в медианной плоскости составляют примерно 330 и 220 Гс для малого и большого магнитных зеркал соответственно. Зависимость поля от расстояния до края магнита будет использована для уточнения формы траектории, показанной на рис. 1.

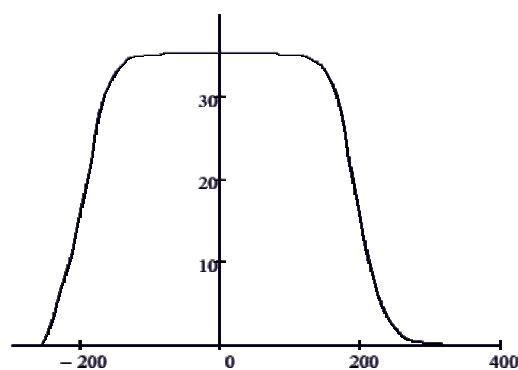


Рис. 3. Рассчитанная зависимость индукции (мТл) в медианной плоскости малого магнитного зеркала от координаты (мм), поперек края магнита

Fig. 3. Calculated dependence of the induction (mT) in the median plane of a large magnetic mirror on the coordinate (mm) across the edge of the magnet

После оптимизации параметров магнитных зеркал был разработан технический проект и полные комплекты чертежей магнитных зеркал (рис. 4, 5) и вакуумной камеры (рис. 6) группирователя и начато изготовление магнитных зеркал и вакуумной камеры в экспериментальном производстве Института ядерной физики СО РАН.

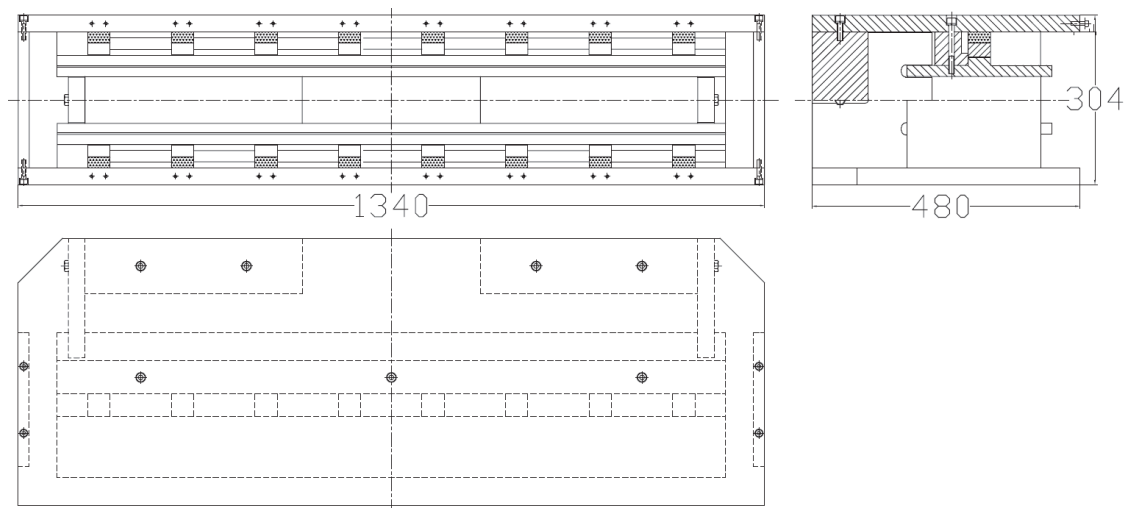


Рис. 4. Общий вид большого магнитного зеркала
Fig. 4. The general view of large the magnetic mirror

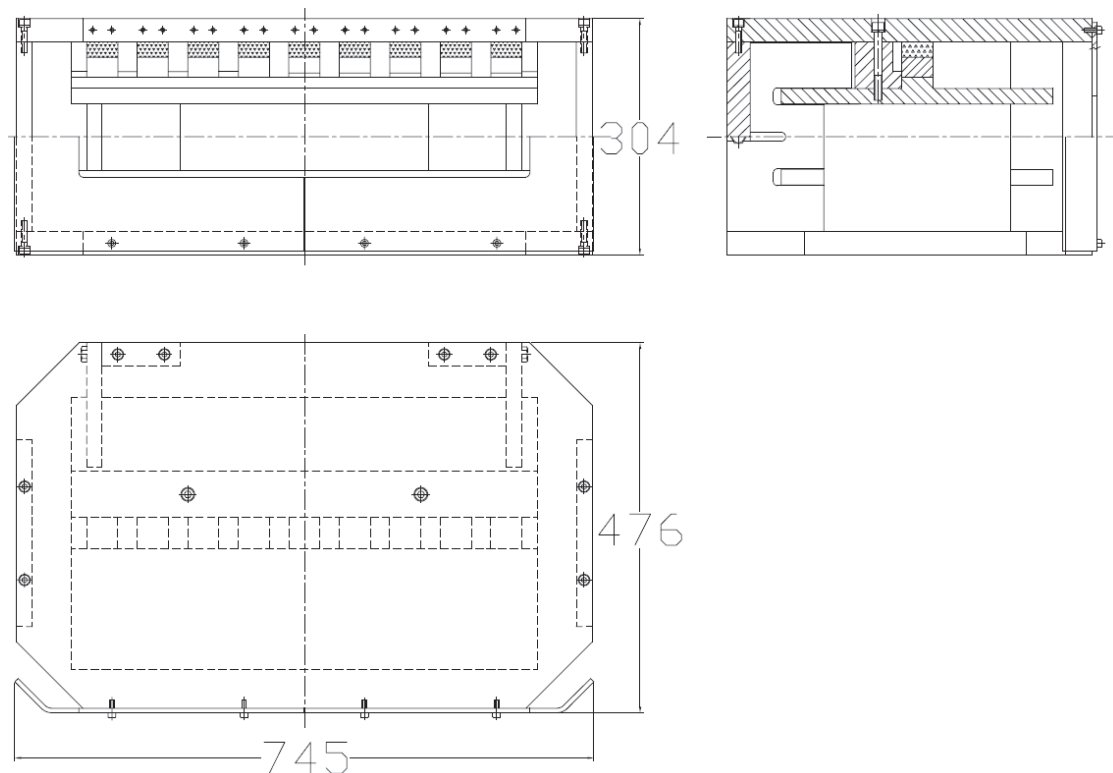


Рис. 5. Общий вид малого магнитного зеркала
Fig. 5. The general view of small the magnetic mirror

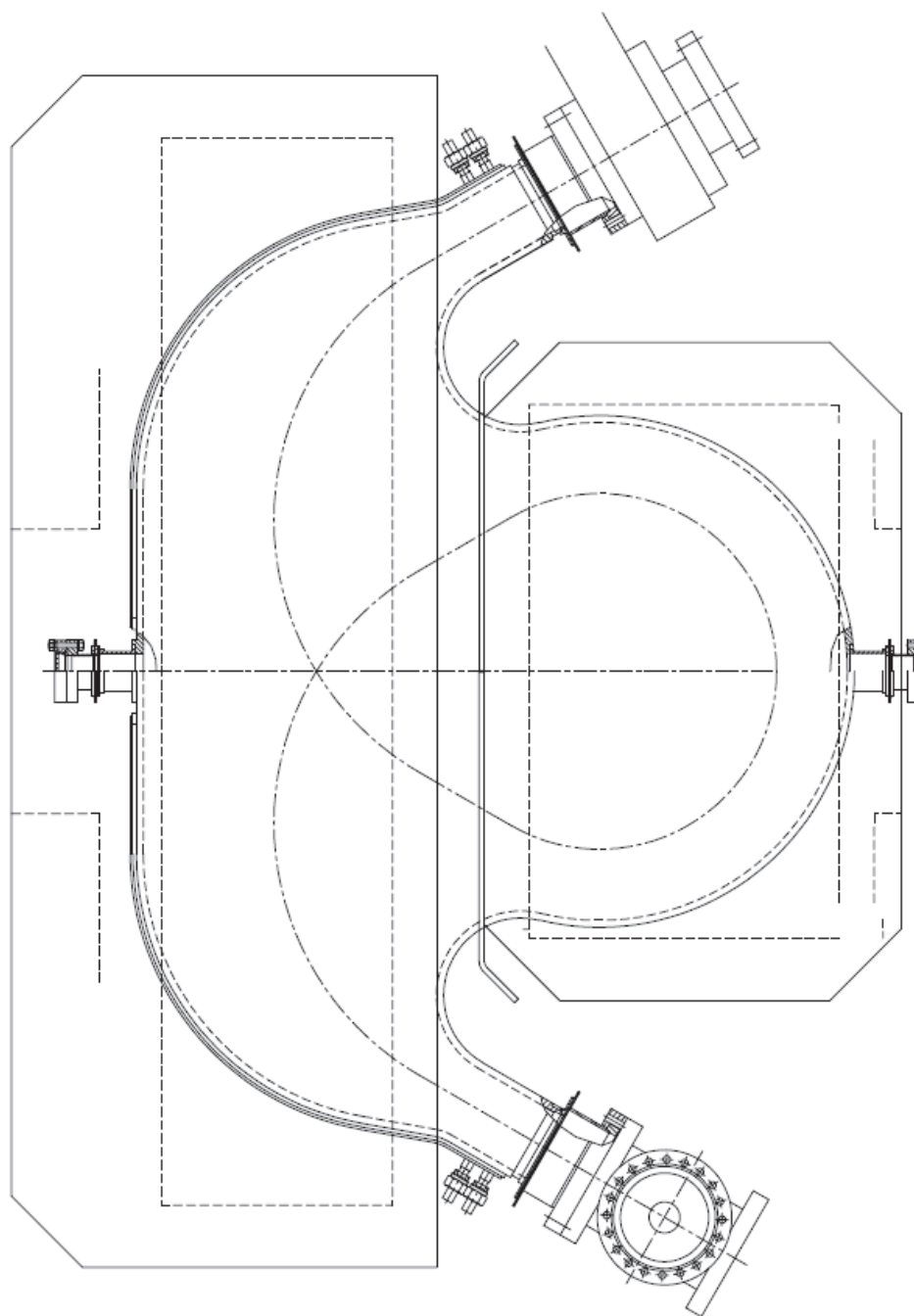


Рис. 6. Общий вид вакуумной камеры. Показаны положения магнитных зеркал (большое – шестиугольник слева, малое – восьмиугольник справа) и расчетная траектория (штрихпунктирная петля)

Fig. 6. The general view of the vacuum chamber. The magnetic mirrors positioning (large magnetic mirror – the hexagon from the left, the small magnetic mirror – the octagon from the right) and the particle reference trajectory (the dotted line) are depicted

Применение постоянных магнитов позволило существенно удешевить магнитные зеркала, так как отпала необходимость использования дорогостоящих источников постоянного тока

с высокой стабильностью и изготовления медных обмоток. Кроме того, вес магнитных зеркал на постоянных магнитах значительно меньше, чем для электромагнитного варианта.

Заключение

В настоящей статье был приведен обзор результатов проектирования магнитного группирователя для установки «Новосибирский лазер на свободных электронах». Дальнейшая работа будет направлена на проведение измерения фактических значений магнитного поля при введении группирующей системы в эксплуатацию, а также на изучение влияния пространственного заряда на длину электронного сгустка.

Список литературы

1. **Skrinsky A.** Electron cooling and electron nuclei colliders, in Proc. APS / DPF / DPB Summer Study on the Future of Particle Physics (Snowmass 2001), Snowmass, Colorado, June 2001, paper T903, eConf C010630 (2001) T903
2. **Vinokurov N. A., Parkhomchuk V. V., Skrinsky A. N.** RF Accelerator for Electron Cooling of Ultrarelativistic Hadrons, in proceedings of 12th Workshop on Beam Cooling, 2019. P. 26. URL: <https://accelconf.web.cern.ch/cool2019/papers/tuy01.pdf>
3. **Lachynov S. B., Vinokurov N. A.** Developing of 540° magnetic buncher // JINST. 2023. Vol. 18. P. 06011.
4. **Винокуров Н. А., Шевченко О. А.** Лазеры на свободных электронах и их разработка в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН // УФН. 2018. Т. 188, № 5. С. 493.
5. **Lachynov S. B., Vinokurov N. A., Getmanov Y. V.** Development of a 540° Magnetic Buncher Based on Permanent Magnets // Phys. Part. Nuclei Lett. 2023. Vol. 20. P. 822–824

References

1. **Skrinsky A.** Electron cooling and electron nuclei colliders, in Proc. APS / DPF / DPB Summer Study on the Future of Particle Physics (Snowmass 2001), Snowmass, Colorado, June 2001, paper T903, eConf C010630 (2001) T903
2. **Vinokurov N. A., Parkhomchuk V. V., Skrinsky A. N.** RF Accelerator for Electron Cooling of Ultrarelativistic Hadrons, in proceedings of 12th Workshop on Beam Cooling, 2019. P. 26. URL: <https://accelconf.web.cern.ch/cool2019/papers/tuy01.pdf>
3. **Lachynov S. B., Vinokurov N. A.** Developing of 540° magnetic buncher. JINST, 2023, vol. 18, p. 06011.
4. **Vinokurov N. A., Shevchenko O. A.** Free electron lasers and their development at the Budker Institute of Nuclear Physics, *SB RAS, Phys. Usp.*, 2018, vol. 61, pp. 435–448.
5. **Lachynov S. B., Vinokurov N. A., Getmanov Y. V.** Development of a 540° Magnetic Buncher Based on Permanent Magnets. *Phys. Part. Nuclei Lett.*, 2023, vol. 20, pp. 822–824.

Сведения об авторах

Лачынов Шамиль Бахадирович, аспирант, инженер-исследователь, ассистент

Винокуров Николай Александрович, профессор, заведующий лабораторией

Ческидов Владимир Георгиевич, старший научный сотрудник

Information about the Authors

Shamil B. Lachynov, Postgraduate Student, Researcher-Engineer, Assistant Lecturer

Nikolay A. Vinokurov, Head of the Laboratory

Vladimir G. Tscheskidov, Senior Researcher

*Статья поступила в редакцию 13.09.2023; одобрена после рецензирования 02.10.2023;
принята к публикации 25.04.2024*

*The article was submitted 13.09.2023; approved after reviewing 02.10.2023;
accepted for publication 25.04.2024*