

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ИЗМЕРЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВЕКТОРА СКОРОСТИ РАДИОВЫСОТОМЕРНЫХ СИСТЕМ, АДАПТИВНЫХ К ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

А. В. Васильева

Уральское проектно-конструкторское бюро «Деталь», Каменск-Уральский, Россия  
niokr@upkb.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Современный этап развития авиации характеризуется устойчивой тенденцией к повышению требований к тактико-техническим характеристикам летательных аппаратов, в том числе к системам маршрутной навигации. Естественное следствие такой тенденции – повышение роли и значения радиолокационных датчиков навигационной информации. К таковым относятся радиовысотомерные системы (РВС), обеспечивающие измерение высоты и составляющих вектора скорости в связанной системе координат. В настоящее время актуальной задачей является повышение точности измерения параметров движения летательных аппаратов над неоднородными сложными поверхностями. *Материалы и методы.* Рассмотрены следующие способы решения поставленной задачи: адаптация алгоритмов оценки составляющих вектора скорости РВС к подстилающей поверхности путем изменения частоты следования зондирующих импульсов в зависимости от значения высоты полета летательного аппарата; адаптация алгоритмов оценки составляющих вектора скорости РВС к подстилающей поверхности путем изменения конфигурации антенной системы; адаптация алгоритмов оценки составляющих вектора скорости РВС к подстилающей поверхности путем изменения несущей частоты. *Результаты и выводы.* Применение рассмотренных способов позволит существенно повысить тактико-технические характеристики как существующих РВС, так и новых разработок, сократит сроки их отработки.

**Ключевые слова:** радиовысотомерная система; радионавигация; точностные характеристики

**Для цитирования:** Васильева А. В. Исследование алгоритмов измерения составляющих вектора скорости радиовысотомерных систем, адаптивных к подстилающей поверхности // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 3. С. 112–117. doi: 10.21685/2307-4205-2024-3-12

## INVESTIGATION OF ALGORITHMS FOR MEASURING THE COMPONENTS OF THE VELOCITY VECTOR OF RADIO ALTIMETER SYSTEMS ADAPTIVE TO THE UNDERLYING SURFACE

A.V. Vasilieva

Ural design bureau "Detal", Kamensk-Uralsky, Russia  
niokr@upkb.ru

**Abstract.** *Background.* The current stage of aviation development is characterized by a steady tendency to increase requirements for the tactical and technical characteristics of aircraft, including navigation systems. A natural consequence of this tendency is the increasing role and importance of radar sensors of navigation information. These include radio altimeter systems (RAS), which measure the altitude and components of the velocity vector in a linked coordinate system. At present, an urgent task is to improve the accuracy of RAS characteristics over heterogeneous complex surfaces. *Materials and methods.* Considers the following methods for solving the problem: adaptation of algorithms for estimating the components of the RAS velocity vector to the underlying surface by changing the pulses time depending on the value of the aircraft flight altitude; adaptation of algorithms for estimating the components of the RAS velocity vector to the underlying surface by changing the antenna system configuration; adaptation of algorithms for estimating the components of the RAS velocity vector to the underlying surface by switching the RAS frequency. *Results and conclusions.* Methods usage will significantly improve the tactical and technical characteristics of both existing RAS and new developments, and will reduce the time of development.

**Keywords:** radio altimeter system; radio navigation; accuracy characteristics

**For citation:** Vasilieva A.V. Investigation of algorithms for measuring the components of the velocity vector of radio altimeter systems adaptive to the underlying surface. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(3):112–117. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-3-12

Достигнутый уровень развития авиации отличается высокими показателями эффективности решения целевых задач, эксплуатационными характеристиками, в частности, предъявляются жесткие требования по внешним воздействующим факторам в ожидаемых условиях эксплуатации, требования к точности, надежности и отказобезопасности систем, а также требования к массогабаритным характеристикам и энергопотреблению.

Возникающие требования оказывают непосредственное влияние на всю совокупность тактико-технических характеристик (ТТХ), предъявляемых в том числе к навигационным системам; вызывают необходимость переоценки существующих возможностей и создания новых методов решения существующих задач. Естественное следствие такой тенденции – повышение роли и значения радионавигационных средств.

В данной статье приведены результаты исследования алгоритмов измерения составляющих вектора скорости радиовысотомерных систем (РВС), адаптивных к подстилающей поверхности. Рассмотренные далее способы направлены на обеспечение точностных характеристик РВС над сложными поверхностями.

Первый способ – адаптация алгоритма оценки составляющих вектора скорости РВС к подстилающей поверхности путем изменения частоты следования зондирующих импульсов в зависимости от значения высоты полета летательного аппарата (ЛА).

При полете ЛА над неоднородной поверхностью (поверхность, сочетающая в себе участки с разной рассеивающей способностью) происходит искажение формы взаимно корреляционных функций (ВКФ). При этом в аппроксимируемую область попадает как узкая (соответствует пролету над поверхностью с широкой диаграммой обратного рассеяния (ДОР)), так и широкая часть (соответствует пролету над поверхностью с узкой ДОР) ВКФ.

Моделирование работы скоростного канала над неоднородными поверхностями подтвердило (рис. 1), что полет над поверхностью с чередующимися участками суши и водной поверхности на интервале накопления ВКФ приводит к искажению формы ВКФ и некорректной их аппроксимации.

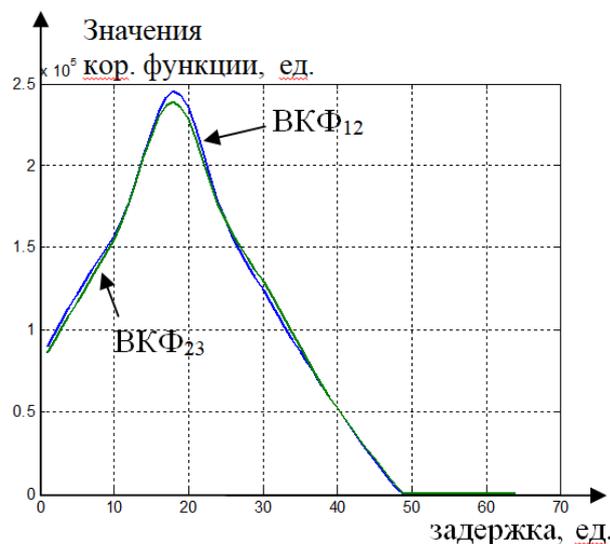


Рис. 1. Результаты моделирования работы РВС над неоднородной поверхностью

Для устранения вышеописанного явления необходимо осуществлять аппроксимацию искаженной ВКФ только по узкой части. Это возможно путем увеличения частоты следования импульсов зондирующего сигнала, в связи с чем предложен алгоритм обработки сигнала с изменением дискрета ВКФ в зависимости от высоты полета ЛА (блок-схема приведена на рис. 2). Следует отметить, что дискрет ВКФ определяется средним периодом повторения импульса  $T_{cp}$  и количеством импульсов с фазами 0 и  $\pi/2$ , принятых 1-й, 2-й и 3-й антеннами [1].

Для подтверждения эффективности предложенного решения проведен анализ алгоритма обработки сигнала с изменением периода повторения зондирующего сигнала в зависимости от высоты полета ЛА над неоднородной поверхностью посредством моделирования работы РВС. Разработанный алгоритм позволяет уменьшить флуктуации измеряемых параметров  $V_x$ ,  $V_z$  в 2,5 раза, а также исключить их постоянное смещение над неоднородной поверхностью.

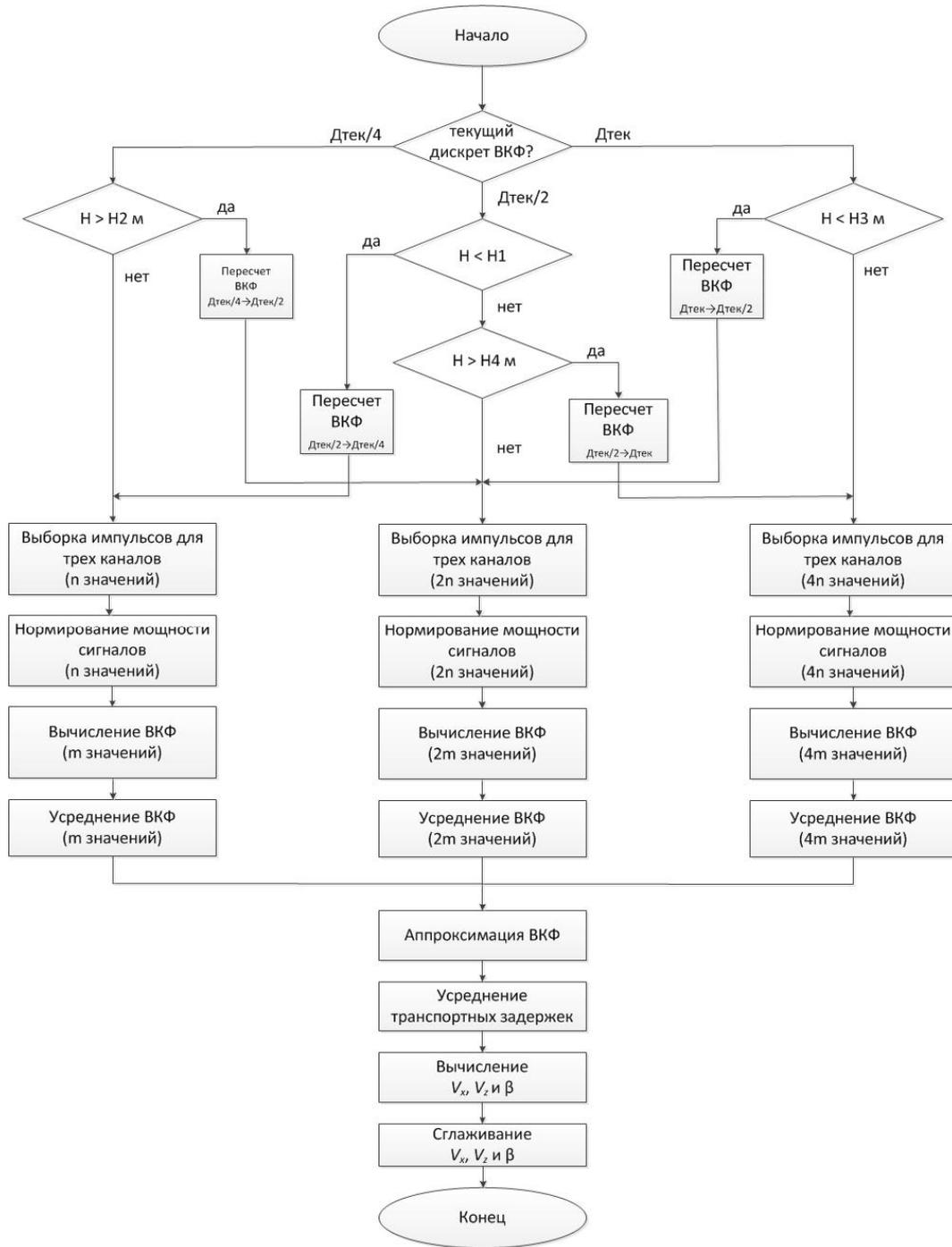


Рис. 2. Блок-схема алгоритма обработки сигнала с изменением дискрета ВКФ

Второй способ – адаптация алгоритма оценки составляющих вектора скорости РВС к подстилающей поверхности путем изменения конфигурации антенной системы (АС).

Максимальные погрешности измерения поперечной составляющей вектора скорости  $V_z$  возникают при полете над поверхностями с узкой ДОР, поскольку ВКФ при этом расширяется, а крутизна дискриминационной характеристики снижается [2]. При использовании АС, представленной на рис. 3, появляется возможность снижения погрешности поперечной составляющей вектора скорости над такими поверхностями путем увеличения поперечного разноса антенн, сигналы которых сравниваются. Действительно, при построении ВКФ пар антенн № 1, 5 и № 2, 3 поперечный параметр антенны  $Z_0$  увеличивается в три раза, во столько же раз уменьшается погрешность определения  $V_z$ .

Следует отметить, что при полете над поверхностью с широкой ДОР для получения оценок составляющих вектора скорости целесообразно использовать одну из троек, образующих равнобед-

ренный треугольник (геометрия идентична классическому построению АС, представленному в работе [3]), в основании которого две рядом расположенные антенны, например, антенны № 1, 3, 4.

Поскольку предлагаемая АС содержит дополнительные приемные антенны, то появляется возможность уменьшить погрешность измерения составляющих вектора скорости: при построении ВКФ двух комбинаций антенн № 1, 3, 4 и № 2, 4, 5 получаем две независимые оценки.

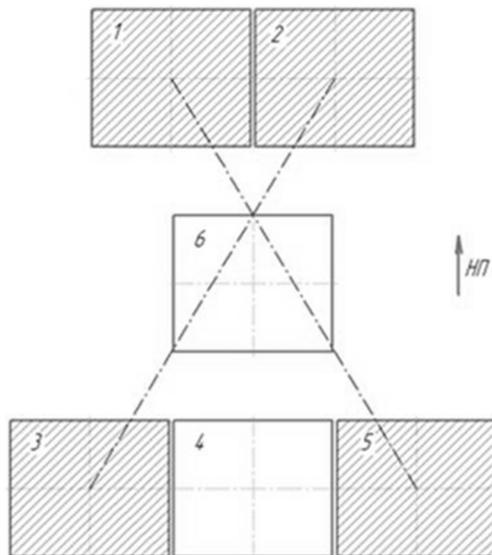


Рис. 3. Геометрия АС

В силу симметричного расположения названных выше троек антенн возможные медленно меняющиеся погрешности боковой составляющей скорости, вызванные взаимным влиянием антенн (отклонение оси ДНА, увеличение расстояния между фазовыми центрами), противоположны по знаку и компенсируются при усреднении полученных двух оценок [4].

Для оценки эффективности применения в РВС предлагаемой конфигурации АС было проведено моделирование РВС над поверхностями с различной отражающей способностью. В связи с необходимостью использования разных комбинаций антенн АС разработан алгоритм переключения в зависимости от ширины ДОР подстилающей поверхности [5].

По результатам моделирования:

- подтверждены теоретические постулаты: над поверхностью с широкой ДОР эффективно использовать АС с обычной поперечной базой (рис. 3: антенны № 1, 3 и 4), над поверхностью с узкой ДОР – АС с расширенной поперечной базой (антенны № 1, 2, 3 и 5). Увеличение поперечной базы АС в три раза дает возможность уменьшения погрешности измерения параметра  $V_z$  над поверхностями с узкой ДОР также в 3 раза;

- подтверждена эффективность использования двух независимых оценок составляющих вектора скорости для двух комбинаций антенн (рис. 3: антенны № 1, 3, 4 и № 2, 4, 5) над поверхностью с широкой ДОР – погрешность измерения поперечной составляющей вектора скорости  $V_z$  уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз;

- разработан и проверен алгоритм переключения комбинации антенн в предлагаемой АС в зависимости от ширины ДОР поверхности.

На данную АС получен патент № 2601441 на изобретение «Антенное устройство радиовысотомерной системы с повышенной точностью измерения поперечной составляющей скорости», зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 12 октября 2016 г.

Третий способ – адаптация алгоритмов оценки составляющих вектора скорости РВС к подстилающей поверхности путем переключения несущей частоты

Как акцентировано ранее, максимальные погрешности измерения поперечной составляющей вектора скорости  $V_z$  возникают при полете ЛА над поверхностью с узкой ДОР:

$$\varphi(\beta) = \frac{8\pi\Delta_z^2 X_0 Z_0}{\lambda^2} \sin(2\beta). \quad (1)$$

В свою очередь, крутизна дискриминационной характеристики  $S$  является первой производной по углу сноса:

$$S = \frac{d\varphi}{d\beta} = \frac{16\pi\Delta_3^2 X_0 Z_0}{\lambda^2} \cos(2\beta). \quad (2)$$

При малых углах сноса  $\cos(2\beta) \approx 1$ , поэтому в выражении (2) можно опустить  $\cos(2\beta)$ :

$$S = \frac{16\pi\Delta_3^2 X_0 Z_0}{\lambda^2}. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что крутизна дискриминационной характеристики  $S$  падает пропорционально квадрату эффективной ширины ДНА  $\Delta_3$ , что и является причиной увеличения погрешности измерения поперечной составляющей вектора скорости  $V_z$  над поверхностью с узкой ДОР.

Крутизна дискриминационной характеристики оказывает влияние на погрешность измерения угла сноса: так, при малой крутизне малейшее расхождение максимумов ВКФ, вызванное, например, их искажением, приводит к значительному изменению угла сноса. При большой крутизне то же самое изменение угла сноса требует существенного расхождения максимумов ВКФ, которое уже не может быть вызвано их искажением [6, 7].

Следовательно, для снижения погрешности измерения параметра  $V_z$  необходимо повышать крутизну дискриминационной характеристики. В соответствии с выражением (3) крутизна дискриминационной характеристики растет:

- прямо пропорционально: продольному параметру АС  $X_0$ ; поперечному параметру АС  $Z_0$ ;
- обратно пропорционально: квадрату длины волны  $\lambda$ .

Следует отметить, что уменьшение длины волны  $\lambda$  в два раза для снижения погрешности измерения параметра  $V_z$  над гладкой поверхностью эквивалентно расширению поперечной базы АС  $Z_0$  в 4 раза. Уменьшение длины волны над поверхностью с узкой ДОР приводит к сужению ВКФ и, в свою очередь, повышает точность определения максимума ВКФ, что благоприятно и для измерения продольной составляющей вектора скорости  $V_x$ . Таким образом, для повышения точности измерения составляющих вектора скорости РВС над поверхностью с узкой ДОР целесообразно уменьшать длину волны.

Для подтверждения эффективности предложенного решения было проведено моделирование РВС над поверхностью с узкой ДОР в разных частотных диапазонах.

Результаты моделирования подтвердили, что уменьшение длины волны в 2(3) раза обеспечивает погрешности измерения составляющих вектора скорости над поверхностями с узкой ДОР соответственно в 2(3) раза меньше по сравнению со штатной длиной волны  $\lambda$ .

Предложенный способ адаптации к подстилающей поверхности путем переключения несущей частоты ( $\lambda$  и  $\lambda/3$ ) реализован в программном обеспечении РВС. Эффективность подтверждена в ходе проведения автономных летных испытаний (АЛИ) РВС.

По результатам АЛИ, сравнение корреляционных характеристик над различными типами подстилающих поверхностей показало, что:

- над поверхностью с узкой ДОР (водная поверхность, ширина ДОР порядка 7 град.) корректно осуществлялось измерение параметров с длиной волны  $\lambda/3$ ;
- над поверхностью с широкой ДОР (лесной массив, ширина ДОР порядка 30 град.) корректно осуществлялось измерение параметров с длиной волны  $\lambda$ .

На данный способ адаптации алгоритма измерения скорости РВС к подстилающей поверхности путем переключения несущей частоты получен патент № 2672098 на изобретение «Радиовысомерная система с адаптацией к гладкой водной поверхности».

Использование приведенных результатов позволило существенно повысить ТТХ РВС, сократить сроки их отработки и приступить к разработке нового поколения бортовых измерителей параметров движения, удовлетворяющих требованиям систем маршрутной навигации, обусловленным современными реалиями.

### Список литературы

1. Васильева А. В., Калмыков Н. Н., Мельников С. А., Соловьев В. В. Модель коррелированных сигналов для имитатора скорости корреляционного измерителя // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2016. № 4. С. 33–38.

2. Васильева А. В. Повышение точностных характеристик скоростного канала радиовысотометрической системы конфигурированием антенной системы // Радиолокация, навигация и связь : сб. тр. XXIII Междунар. конф. Воронеж, 2017. С. 657–663.
3. Боркус М. К., Черный А. Е. Корреляционные измерители путевой скорости и угла сноса летательных аппаратов. М. : Сов. радио, 1973. 169 с.
4. Рабинович С. Г. Погрешности измерений. М. : Энергия, 1978.
5. Васильева А. В., Седов Д. П. Малогабаритный радиовысотометр с расширенными функциональными возможностями. М., 2021. 22 с.
6. Пономарев Л. И., Калмыков Н. Н., Кац М. И. [и др.]. Результаты отработки алгоритмов функционирования и перспективы применения комбинированных радиолокационных измерителей в составе бортового комплекса управления полетом летательного аппарата // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2011. Вып. 14. С. 116–119.
7. Маковецкий П. В., Васильев В. Г. Отражения радиолокационных сигналов. Л., 1975. 50 с.

### References

1. Vasil'eva A.V., Kalmykov N.N., Mel'nikov S.A., Solov'ev V.V. A model of correlated signals for a speed simulator of a correlation meter. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz-Antey» = Bulletin of the East Kazakhstan Region Almaz-Antey Concern*. 2016;(4):33–38. (In Russ.)
2. Vasil'eva A.V. Improving the accuracy characteristics of the high-speed channel of the radio altimeter system by configuring the antenna system. *Radiolokatsiya, navigatsiya i svyaz': sb. tr. XXIII Mezhdunar. konf. = Radar, navigation and communications : proceedings of the XXIII International conference*. Voronezh, 2017:657–663. (In Russ.)
3. Borkus M.K., Chernyy A.E. *Korrelyatsionnye izmeriteli putevoy skorosti i ugla snosa letatel'nykh apparatov = Correlation meters of ground speed and angle of demolition of aircraft*. Moscow: Sov. radio, 1973:169. (In Russ.)
4. Rabinovich S.G. *Pogreshnosti izmereniy = Measurement errors*. Moscow: Energiya, 1978. (In Russ.)
5. Vasil'eva A.V., Sedov D.P. *Malogabaritnyy radiovysotomer s rasshirennyimi funktsional'nymi vozmozhnostyami = Small-sized radio altimeter with extended functionality*. Moscow, 2021:22. (In Russ.)
6. Ponomarev L.I., Kalmykov N.N., Kats M.I. et al. Results of working out algorithms for the functioning and prospects for the use of combined radar meters as part of the on-board flight control system of an aircraft. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika = Bulletin of the South Ural State University. Ser.: Computer technologies, management, radio electronics*. 2011;(14):116–119. (In Russ.)
7. Makovetskiy P.V., Vasil'ev V.G. *Otrazheniya radiolokatsionnykh signalov = Reflections of radar signals*. Leningrad, 1975:50. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Анна Валерьевна Васильева

ведущий инженер,  
Уральское проектно-конструкторское  
бюро «Деталь»  
(Россия, г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)  
E-mail: niokr@upkb.ru

#### Anna V. Vasilieva

Leading engineer,  
Ural design bureau "Detal"  
(8 Pionerskaya street, Kamensk-Uralsky, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /**

**The author declares no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 23.05.2024**

**Поступила после рецензирования / Revised 25.06.2024**

**Принята к публикации / Accepted 13.08.2024**