

УДК 621.396.2

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.50.3.023](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.50.3.023)

Методы определения отношения сигнал-шум в системах радиосвязи

Д.С. Калистратов¹, Д.Г. Митрофанов²

¹Независимый исследователь, Тула, Российская федерация

²Военная академия войсковой противовоздушной обороны Вооруженных Сил Российской Федерации имени Маршала Советского Союза А.М. Василевского, Смоленск, Российская федерация

Резюме. В работе затрагивается вопрос беспроводной передачи информации посредством радиосвязи. Указывается, что ключевым параметром качества радиоканала является отношение сигнал-шум на входе приемного устройства. Подчеркивается важность обеспечения высокого отношения сигнал-шум в радиопередающих и радиоприемных устройствах и системах. Проводится аналитический обзор и сравнительный анализ распространенных методов определения отношения сигнал-шум на входе приемного устройства. Рассматриваются теоретические и практические методы определения отношения сигнал-шум, в частности, метод комплексной огибающей, метод спектрального анализа, а также метод расчета потерь в свободном пространстве. Выявляются их преимущества и недостатки. Описываются математический и методологический аппарат рассматриваемых методов. Дается краткое описание алгоритмов измерения отношения сигнал-шум в указанных методах. Приводятся сведения о проведенных экспериментальных исследованиях методов. Описываются исходные данные и результаты эксперимента. Представляются результаты сравнительного анализа теоретических и практических методов по критерию точности оценки отношения сигнал-шум на входе приемного устройства. Анализируются основные причины и факторы, снижающие точность теоретической оценки отношения сигнал-шум по сравнению с практическим измерением. Предлагаются возможные пути увеличения значения отношения сигнал-шум в теоретических методах.

Ключевые слова: беспроводная связь, радиосигнал, отношение сигнал-шум, метод комплексной огибающей, метод спектрального анализа, метод расчета потерь.

Для цитирования: Калистратов Д.С., Митрофанов Д.Г. Методы определения отношения сигнал-шум в системах радиосвязи. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1977> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.023

Methods of determining the signal-to-noise ratio in radio communication systems

D.S. Kalistratov¹, D.G. Mitrofanov²

¹Independent researcher, Tula, the Russian Federation

²Military Academy of Military Air Defense of the Armed Forces of the Russian Federation named after Marshal of the Soviet Union A.M. Vasilevsky, Smolensk, the Russian Federation

Abstract. The issue of wireless transmission of information via radio communication is raised. It is indicated that the key parameter of the radio channel quality is the signal-to-noise ratio at the input of the receiving device. The importance of ensuring a high signal-to-noise ratio in radio transmitting and receiving devices and systems is emphasized. An analytical review and comparative analysis of common methods for determining the signal-to-noise ratio at the input of the receiving device is carried out. Theoretical and practical methods for determining the signal-to-noise ratio are considered, in particular, the method of complex envelope, the method of spectral analysis, as well as the method of calculating

losses in free space. Their advantages and disadvantages are revealed. The mathematical and methodological apparatus of the considered methods is described. A brief description of the algorithms for measuring the signal-to-noise ratio in these methods is given. Information about the conducted experimental studies of the methods is provided. The initial data and the results of the experiment are described. The results of a comparative analysis of theoretical and practical methods are presented according to the criterion of accuracy in estimating the signal-to-noise ratio at the input of the receiving device. The main reasons and factors that reduce the accuracy of the theoretical assessment of the signal-to-noise ratio compared with the practical measurement are analyzed. Possible ways to increase the value of the signal-to-noise ratio in theoretical methods are proposed.

Keywords: wireless communication, radio signal, signal-to-noise ratio, complex envelope method, spectral analysis method, loss calculation method.

For citation: Kalistratov D.S., Mitrofanov D.G. Methods of determining the signal-to-noise ratio in radio communication systems. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(3). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1977> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.023

Введение

Радиосвязь является одним из самых удобных и востребованных типов передачи информации [1, 2]. Темы математического моделирования [3] и расчета радиоканалов [4, 5] прослеживаются во многих современных научных работах. Между тем, одним из важнейших параметров качества радиоканала в беспроводных системах связи является отношение сигнал-шум на входе приемного устройства [6, 7]. От отношения сигнал-шум в значительной мере зависят такие характеристики радиоканала, как максимальное расстояние передачи, стабильность соединения, скорость обмена данными, а также степень искажения принимаемой информации. В этой связи значительный интерес представляет аналитический обзор и сравнительный анализ наиболее распространенных методов определения отношения сигнал-шум на входе приемного устройства.

Материалы и методы

Метод комплексной огибающей. Метод является практическим и применяется на этапе пусконаладочных работ. Суть метода заключается в определении отношения сигнал-шум через выделение огибающей амплитуды низкочастотного сигнала [8]. Для получения функции амплитуды $A(t)$ используется понятие комплексной огибающей. Под комплексной огибающей понимают комплексную функцию $Z(t)$ действительного аргумента t , описывающую амплитуду и фазу сигнала путем исключения множителя с частотой. Отношение сигнал-шум вычисляется по средним значениям амплитуд сигнала и шума. Для выделения амплитуд сигнала и шума используется детектор огибающей.

Поясним понятие комплексной огибающей. Введем в рассмотрение комплексную функцию $z(t)$ действительного аргумента t :

$$z(t) = A(t) \cos(\omega(t)t + \varphi(t)) + jA(t) \sin(\omega(t)t + \varphi(t)), \quad (1)$$

где $A(t)$ – амплитуда; $\omega(t)$ – круговая частота; $\varphi(t)$ – фаза; t – время. Предположим, что полезный сигнал расположен в ее действительной части. Используя формулу Эйлера для комплексной экспоненты, перепишем данную функцию в виде:

$$z(t) = A(t)e^{j\varphi(t)}e^{j\omega(t)t}. \quad (2)$$

Тогда выражение комплексной огибающей примет вид:

$$Z(t) = A(t)e^{j\varphi(t)}. \quad (3)$$

Алгоритм определения отношения сигнал-шум состоит в следующем. Сначала измеряется уровень амплитуды полезного сигнала A_1 . Далее измеряется уровень

амплитуды шума A_2 при отсутствии полезного сигнала. После этого вычисляется отношение сигнал-шум. Формула для вычисления отношения сигнал-шум:

$$SNR = 20 \lg(A_1/A_2), \quad (4)$$

где A_1 – средняя амплитуда сигнала; A_2 – средняя амплитуда шума.

Для нахождения значений A_1 и A_2 применяются специальные устройства – шумомеры со встроенными детекторами огибающей (Рисунок 1). Связь считается хорошей, если отношение сигнал-шум на входе приемного устройства превышает отметку в 40 дБ.

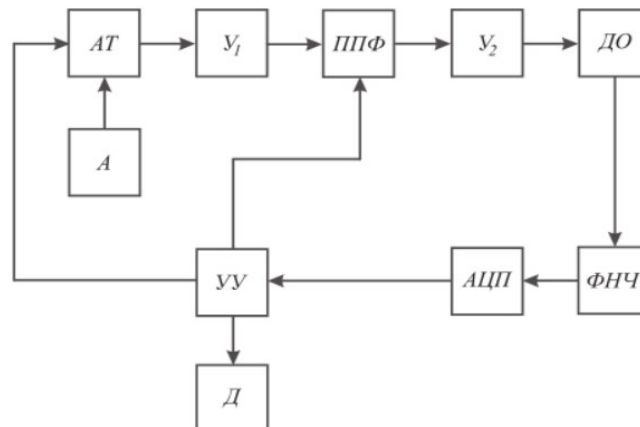


Рисунок 1 – Структурная схема шумомера для реализации метода комплексной огибающей
Figure 1 – Structure of a noise meter for the implementation of the complex envelope method

На схеме использованы следующие обозначения: A – антенна; AT – аттенюатор; U_1, U_2 – усилители; $ППФ$ – перестраиваемый полосовой фильтр; $ДО$ – детектор огибающей; $ФНЧ$ – фильтр низких частот; $АЦП$ – аналогово-цифровой преобразователь; $УУ$ – управляющее устройство; $Д$ – дисплей.

Основным преимуществом метода комплексной огибающей является точность измерений. Основной недостаток – невозможность определения отношения сигнал-шум на этапе проектирования и в условиях эксплуатации. Указанный недостаток обусловлен тем, что при измерении уровня шума необходимо в обязательном порядке отключать полезный сигнал.

Метод спектрального анализа. Метод является практическим и применяется на этапе пусконаладочных работ. Суть метода заключается в использовании спектрального анализатора в качестве шумомера [9]. Отношение сигнал-шум вычисляется по спектрограммам, формируемым спектральным анализатором. Способ вычисления (по пиковому или среднему значению) зависит от типа модуляции и ширины частотного диапазона полезного сигнала.

На сегодняшний день существует 2 основных типа спектрометров: цифровые и аналоговые. Цифровые спектрометры работают на основе преобразования Фурье и используются для анализа низкочастотных сигналов. Аналоговые спектрометры работают на основе сканирования частотного диапазона и используются для анализа высокочастотных сигналов.

Структурная схема типового аналогового спектрометра содержит перестраиваемый гетеродин и частотный смеситель (Рисунок 2). Главная отличительная особенность аналогового спектрометра заключается в том, что за счет переноса входного сигнала на промежуточную частоту обеспечивается расширение динамического диапазона измерений по частоте. Для подсчета средней мощности используется детектор огибающей и аналогово-цифровой преобразователь.

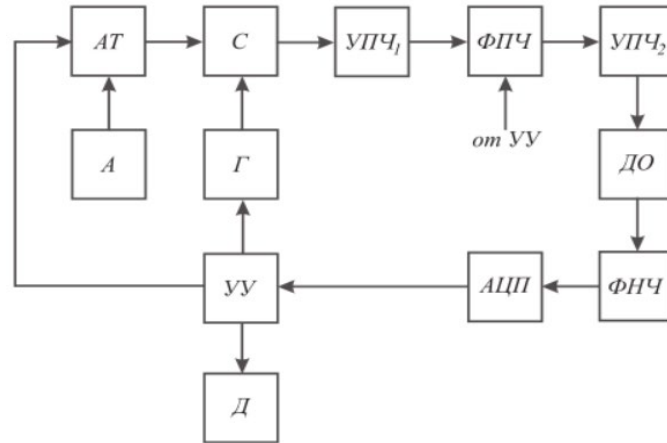


Рисунок 2 – Структурная схема шумомера для реализации метода спектрального анализа
Figure 2 – Structure of a noise meter for the implementation of the spectral analysis method

На схеме использованы следующие обозначения: A – антенна; AT – аттенюатор; Γ – гетеродин; C – смеситель; $УПЧ_1$, $УПЧ_2$ – усилители промежуточной частоты; $\Phi П Ч$ – фильтр промежуточной частоты; $Д О$ – детектор огибающей; $\Phi Н Ч$ – фильтр низких частот; $А Ц П$ – аналогово-цифровой преобразователь; $У У$ – управляющее устройство; $Д$ – дисплей.

Аналоговые спектрометры формируют на выходе график спектральной плотности мощности. Под спектральной плотностью мощности понимается распределение мощности сигнала по его частотам. Единица измерения – Вт/Гц. Плотность мощности показывает мощность, приходящуюся на отдельно взятую гармонику. Для того, чтобы подсчитать мощность некоторого частотного диапазона следует взять интеграл по частоте.

В большинстве спектрометров используется не абсолютная, а относительная шкала измерения (Рисунок 3). При этом уровень сигнала измеряется не в дБ, а в дБм (имеется в виду дБмВт). Единица измерения дБм – это относительная размерная величина, которая показывает уровень мощности сигнала относительно опорной мощности, равной 1 милливатт (мВт).



Рисунок 3 – Пояснение к определению отношения сигнал-шум с помощью спектрометра
Figure 3 – Explanation of the determination of the signal-to-noise ratio using a spectrometer

Алгоритм определения отношения сигнал-шум методом спектрального анализа заключается в следующем. Сначала измеряется мощность полезного сигнала P_1 . Далее замеряется мощность шума P_2 при отсутствии полезного сигнала. После этого вычисляется отношение сигнал-шум. Формула для вычисления отношения сигнал-шум:

$$SNR = 10 \lg(P_1/P_2), \quad (5)$$

где P_1 – мощность сигнала; P_2 – мощность шума. Если используются пиковые значения мощностей, то в качестве P_1 и P_2 принимаются значения максимумов мощности. Если используются средние значения, то мощности P_1 и P_2 вычисляются через интегральные зависимости по всему принимаемому частотному диапазону.

Если спектрометр показывает на выходе не абсолютные, а относительные значения мощности, то используется тот же алгоритм и те же расчетные формулы. Множители опорных мощностей P_0 при этом сокращаются. Для повышения достоверности результата следует проводить несколько измерений уровня сигнала и шума, а итоговое отношение сигнал-шум вычислять как среднее выборочное.

Пиковые значения мощностей следует использовать при амплитудной, фазовой и амплитудной квадратурной цифровой модуляции, когда спектр сигнала представляется единственной гармоникой и характеризуется точечным значением в частотном диапазоне. Средние значения мощностей следует использовать для амплитудной и частотной аналоговой модуляции, а также для частотной цифровой модуляции, когда спектр сигнала описывается несколькими гармониками и занимает некоторый отрезок частотного диапазона.

Основным преимуществом метода спектрального анализа, как и в случае с методом комплексной огибающей, является точность измерений. Основной недостаток – невозможность определения отношения сигнал-шум на этапе проектирования и в условиях эксплуатации. Данный недостаток обусловлен тем, что при получении спектра шума необходимо в обязательном порядке отключать полезный сигнал.

Метод оценки потерь. Метод является теоретическим и применяется на этапе проектирования. Суть метода состоит в определении отношения сигнал-шум через формулу потерь в свободном пространстве [10]. В рассмотрение вводятся полезный сигнал и наиболее влияющая внешняя помеха. Метод учитывает ослабление сигнала в зависимости от частоты и расстояния передачи. Мощность сигнала на передающей антенне и расстояние передачи считаются известными. Мощность помехи на входе приемного устройства считается известной.

Метод основан на понятии потери мощности в свободном пространстве, под которой понимается ослабление сигнала, выраженное в децибелах. Расчетная зависимость потери мощности получена экспериментальным путем и применяется преимущественно к высокочастотным сигналам. Подчеркнем, что формула потери в свободном пространстве показывает лишь затухание полезного сигнала, но не отношение сигнал-шум. Однако при известном значении мощности помехи на основе указанной формулы можно вычислить отношение сигнал-шум.

Алгоритм метода оценки потерь выглядит следующим образом. Сначала при известных значениях несущей частоты F и расстояния D вычисляется величина потери мощности L для полезного сигнала. Далее при известных значениях начальной мощности сигнала на передающей антенне и известной потере мощности сигнала L находится мощность сигнала на приемной антенне P_1 . Абсолютная мощность помехи P_2 принимается известной. После этого, по абсолютным значениям мощностей P_1, P_2 вычисляется отношение сигнал-шум. Формула определения отношения сигнал-шум:

$$\begin{aligned} SNR &= 10\lg(P_1/P_2), \\ L &= -(33 + 20(\lg F + \lg D)), \\ P_1 &= f(L), \end{aligned} \quad (6)$$

где P_1 – абсолютное значение мощности полезного сигнала на входе приемного устройства; P_2 – предполагаемое абсолютное значение мощности помехи на входе приемного устройства; L – величина потерь в свободном пространстве для полезного сигнала в децибелах; F – частота полезного сигнала в мегагерцах; D – расстояние между передатчиком и приемником в километрах.

Основным преимуществом метода оценки потерь является простота использования и возможность применения уже на этапе проектирования. Основной недостаток – низкая точность расчетной оценки отношения сигнал-шум, вызванная теоретической основой метода и приближенным характером расчетных формул.

Экспериментальные исследования

Сравнительный анализ теоретических и практических методов по критерию точности определения отношения сигнал-шум был проведен экспериментальным путем. Для проведения эксперимента использовалось два опытных образца приемопередатчика с одинаковой конструкцией, но разным программным обеспечением (Рисунок 4, Таблица 1). Первый опытный образец выполнял роль передатчика, второй – роль приемника. В качестве управляющего устройства использовалась отладочная плата F103RC-51 с МК F103RCT6 на борту. В качестве модулей беспроводной связи были выбраны модули NRF24L01. Источником помехи выступал WiFi-роутер. В качестве шумомера использовался спектральный анализатор SA-4400M. Тип модуляции сигнала – частотная цифровая модуляция (FSK).

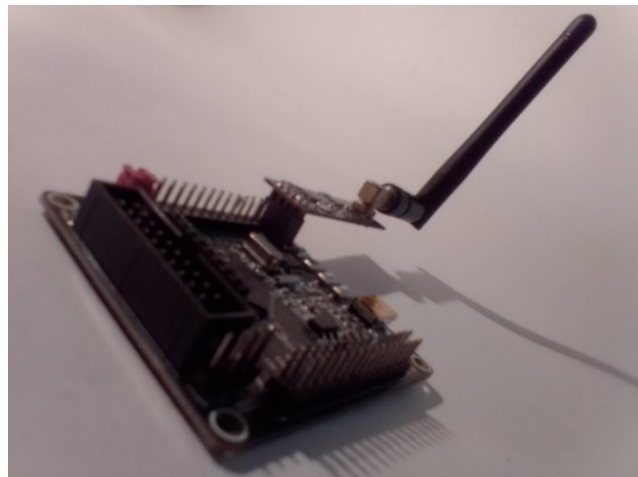


Рисунок 4 – Экспериментальный образец беспроводного приемопередатчика

Figure 4 – An experimental sample of a wireless transceiver

Таблица 1 – Параметры эксперимента
Table 1 – Experiment parameters

Параметр	Значение
Частота полезного сигнала	2,416 ГГц
Частота помехи	2,4 ГГц
Расстояние между передатчиком и приемником	10 м
Мощность передатчика	1 мВт

В ходе эксперимента сравнивались теоретический метод оценки потерь и практический метод спектрального анализа. Эксперимент проводился при равных условиях. Мощность шума в обоих методах была выдержана одинаковой. Таким образом, задача эксперимента состояла в том, чтобы оценить погрешность теоретической формулы расчета потерь по сравнению с практическим измерением. Различия в точности определения сигнал-шум выглядят небольшими при измерении в децибелах, но являются значительными в процентном отношении.

Результаты

По результатам эксперимента было установлено, что приближенная формула расчета потерь дает погрешность в оценке отношения сигнал-шум, равную 22,7 % по сравнению с практическим измерением (Таблица 2). Если принять измеренное шумомером значение SNR за истинное, то это означает, что теоретический метод расчета потерь имеет погрешность в оценке отношения сигнал-шум, равную 22,7 %.

Таблица 2 – Результаты эксперимента
Table 2 – Experimental results

Метод	Значение SNR
Метод оценки потерь	40,6 дБ
Метод спектрального анализа	38,8 дБ

Обсуждение

Проведенный эксперимент наглядно продемонстрировал преимущество практических методов над теоретическими в точности определения отношения сигнал-шум. По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод, что низкая точность расчетной оценки отношения сигнал-шум в теоретических методах обусловлена приближенным характером формул, а также отсутствием учета таких факторов как: тип модуляции сигнала, наличие шумов и помех, учет свойств среды распространения сигнала, наличие возможных препятствий на пути распространения сигнала. Возможный путь к повышению точности расчетной оценки отношения сигнал-шум состоит в усложнении математического аппарата с целью учета как можно большего количества влияющих факторов.

Заключение

В ходе исследований был проведен аналитический обзор и сравнительный анализ теоретических и практических методов определения отношения сигнал-шум на входе приемных устройств. Рассмотрены, в частности, метод комплексной огибающей, метод спектрального анализа, а также метод оценки потерь в свободном пространстве. Выявлено, что основным преимуществом теоретических методов является простота использования и возможность применения уже на этапе проектирования системы связи. Основным преимуществом практических методов, в свою очередь, является высокая точность измерения отношения сигнал-шум.

Экспериментально подтверждено, что практические методы обладают преимуществом перед теоретическими в точности определения отношения сигнал-шум более чем на 20 %. Сделан вывод, что одним из возможных путей увеличения расчетной точности оценки отношения сигнал-шум в теоретических методах является усложнение математической модели распространения сигнала с целью учета таких влияющих факторов, как тип модуляции сигнала, наличие шумов и помех, учет свойств среды

распространения сигнала, а также наличие возможных препятствий на пути распространения сигнала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Калистратов Д.С. О передаче видеоизображений по радиоканалу с различными типами цифровой модуляции сигнала. *Актуальная наука*. 2018;(10):36–39. Kalistratov D.S. On the Transfer of Videos on a Radio Channel with Different Types of Digital Signal Modulation. *Actual Science*. 2018;(10):36–39. (In Russ.).
2. Cardoso F.D., Lipovac V., Correia L.M. Wireless Technologies for the Connectivity of the Future. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2021;2021. <https://doi.org/10.1186/s13638-021-01980-w>
3. Вершинин А.С., Шарова Д.Н., Майков Д.Ю. и др. *Математическое моделирование систем беспроводной связи*. Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та; 2014. 163 с.
4. Cho K., Yoon D. On the General BER Expression of One- and Two-Dimensional Amplitude Modulations. *IEEE Transactions on Communications*. 2002;50(7):1074–1080. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2002.800818>
5. Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Овчинников В.В. Новые возможности систем широкополосной когнитивной связи, работающих в ионосферных КВ-радиоканалах с внутримодовой дисперсией. *Радиотехника*. 2022;86(11):162–177. Ivanov D.V., Ivanov V.A., Ryabova N.V., Ovchinnikov V.V. New Capabilities of Wideband Cognitive Communication Systems Operating Over Ionospheric HF Radio Channels with Intramode Dispersion. *Radioengineering*. 2022;86(11):162–177. (In Russ.).
6. Salah M.B.B., Samet A. Moment-Based Joint Estimation of Ricean K -Factor and SNR Over Linearly-Modulated Wireless SIMO Channels. *Wireless Personal Communications*. 2016;91:903–918. <https://doi.org/10.1007/s11277-016-3503-6>
7. Rojas A.J., Garcés H.O. Signal-to-Noise Ratio Based Fault Detection and Identification. *Frontiers in Control Engineering*. 2022;3. <https://doi.org/10.3389/fcteg.2022.806558>
8. Ромашов В.В., Жиганова Е.А. Метод комплексной огибающей в спектральном анализе нелинейного устройства. *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2011;(1):25–28. Romashov V.V., Zhiganova E.A. Method Complex Envelope in the Spectral Analysis of the Nonlinear Device. *Radio Engineering and Telecommunication Systems*. 2011;(1):25–28. (In Russ.).
9. Benz A.O., Grigis P.C., Hungerbühler V., et al. A Broadband FFT Spectrometer for Radio and Millimeter Astronomy. *Astronomy & Astrophysics*. 2005;442(2):767–773. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053568>
10. Africa A.D.M., Bulda L.R., Rosario E.D., Marasigan M.Z., Navarro I. Radio Wave Propagation: Simulation of Free Space Propagation Path Loss. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2020;8(2):281–287. <https://doi.org/10.30534/IJETER/2020/07822020>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Калистратов Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, независимый исследователь, Тула, Российская Федерация.
e-mail: kalistratow@list.ru

Dmitry S. Kalistratov, Candidate of Engineering Sciences, Independent researcher, Tula, the Russian Federation.

Митрофанов Дмитрий Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, Военная академия войсковой противовоздушной обороны Вооруженных Сил Российской Федерации имени Маршала Советского Союза А.М. Василевского, Смоленск, Российская Федерация.
e-mail: mdgvapvo@yandex.ru

Dmitry G. Mitrofanov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Military Academy of Military Air Defense of the Armed Forces of the Russian Federation named after Marshal of the Soviet Union A.M. Vasilevsky, Smolensk, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 29.05.2025; одобрена после рецензирования 08.07.2025; принята к публикации 27.07.2025.

The article was submitted 29.05.2025; approved after reviewing 08.07.2025; accepted for publication 27.07.2025.