



Научная статья / Original Article

УДК 621.371.31

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188116>

EDN: <https://www.elibrary.ru/UWFSUI>

## ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ СТЕНДА ЦИФРО-НАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ В БЛИЖНЕЙ АЭРОДРОМНОЙ ЗОНЕ

А.А. Безуглов<sup>1</sup>, К.Ю. Гаврилов<sup>2✉</sup>, Е.В. Кудряшова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Филиал публичного акционерного общества «Объединенная авиастроительная корпорация» - оперативно-тактическая авиация,

<sup>2</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

<sup>3</sup>Публичное акционерное общество «Научно-производственное объединение «Алмаз»,  
имени академика А. А. Расплетина,

г. Москва, Россия

✉ [kongav3461@mail.ru](mailto:kongav3461@mail.ru)

---

**Цитирование:** Безуглов А.А., Гаврилов К.Ю., Кудряшова Е.В. Принципы разработки стенда цифро-натурного моделирования метеорологических радиолокационных комплексов обеспечения безопасности полетов в ближней аэродромной зоне // Труды МАИ: электрон. журнал. № 147. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188116>

---

**Аннотация.** Одним из эффективных путей сокращения сроков и стоимости разработки, ввода в эксплуатацию и испытаний метеорологических радиолокационных комплексов является использование стендов цифро-натурного моделирования. Учитывая сложность метеорологических радиолокационных комплексов и необходимость проведения многочисленных натурных экспериментов в различных условиях фоновой и метеорологической обстановки, использование стендов цифро-натурного моделирования позволяет существенно ускорить данные процессы. В работе предложена структура стенда цифро-натурного моделирования, который можно использовать как на этапе разработки метеорологических радиолокационных комплексов, так и для

проведения его испытаний на этапах сертификации и модернизации. Описаны структура предложенного стенда цифро-натурного моделирования, его назначение, основные решаемые им задачи и его составные части. Описано ядро имитационной модели стенда, включающей различные аппаратные и программные средства. С учетом типовых требований к подключению аппаратных модулей, разработана обобщенная структурная схема подключения аппаратных элементов к имитационной части метеорологических радиолокационных комплексов. При разработке стенда цифро-натурного моделирования важное значение имеет физико-математическая модель метеорологического радиолокационного комплекса. Исходные данные, влияющие на функционирование комплекса, можно разделить на две большие группы – погодные факторы и характеристики, и параметры самого комплекса. Погодные факторы определяют физическое состояние атмосферы в зоне обзора комплекса, характеризуемое совокупностью различных метеорологических явлений.

В работе рассмотрены модели гидрометеоров, включающие в себя модели скорости их перемещения, распределение капель по размерам, характеристики поглощения, отражения и рассеяния, приведена также методика вычисления удельной эффективной площади рассеяния гидрометеоров.

**Ключевые слова:** метеорологический радиолокационный комплекс; стенд цифро-натурного моделирования; безопасность полетов воздушных судов; ближняя аэродромная зона; модели метеорологических явлений.

---

## **PRINCIPLES OF DEVELOPMENT OF A DIGITAL-FIELD SIMULATION STAND FOR WEATHER RADAR SYSTEMS FOR FLIGHT SAFETY IN THE NEAR AIRFIELD AREA**

**A.A. Bezuglov<sup>1</sup>, K.Yu. Gavrilov<sup>2</sup>✉, E.V. Kudryashova<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Branch of Public Joint-Stock Company «United Aircraft Corporation»— Tactical Aviation Division,

<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University),

<sup>3</sup>Public Joint-Stock Company «Research and Production Corporation «Almaz»,

Named by Academician A.A. Raspletin

Moscow, Russia

✉ [kongav3461@mail.ru](mailto:kongav3461@mail.ru)

**Abstract.** One of the effective ways to reduce the time required for the development and testing of meteoradiolocation complexes (MRLC) is the use of digital-field modeling stands (DFMS). Given the complexity of the MRLC and the need to conduct numerous tests under different weather conditions and at different times of the year, the use of DFMS can significantly speed up these processes. The paper proposes the structure of the DFMS, which can be used both at the stage of development of the MRLC and for testing it at the stages of certification and modernization. The structure of the proposed DFMS, its purpose, and the main tasks of the DFMS and its components are described. The core of the DFMS simulation model, which includes various hardware and software tools, is described. Taking into account the typical requirements for connecting hardware modules, a structural diagram has been developed for connecting hardware elements to the simulation part of the MRLC. The physical and mathematical model of the MRLC is of great importance in the development of the DFMS. When developing a physico-mathematical model of the MRLC, the initial data affecting the functioning of the MRLC can be divided into two large groups – weather parameters and characteristics and parameters of the MRLC. Weather parameters determine the physical state of the atmosphere, characterized by a combination of various meteorological phenomena (MP).

In this paper, the models of MP in the form of hydrometeors are considered. Methods for calculating the velocity of movement, droplet size distribution, and absorption, reflection, and scattering characteristics are described for these models. A method for calculating the specific effective scattering area of hydrometeorological formations is also given.

**Keywords:** meteorological radar complex; digital field modeling stand; aircraft flight safety; near airfield area; models of meteorological phenomena.

---

## Введение

Необходимость сокращения сроков и стоимости разработки, ввода в эксплуатацию и испытаний новой техники обуславливает перспективность

использования различных методов имитации ее работы, в частности создание цифро-натурных моделей [4].

Стенды цифро-натурного моделирования (СЦНМ) объединяют в себе реальные аппаратные элементы наземного оборудования, обеспечивающего функционирование реальной аппаратуры (платформы для установки, блоки питания, антенны, устройства первичной обработки сигналов и т.д.) и вычислительную технику с программным обеспечением, на основе которой производится моделирование внешней обстановки для исследуемых элементов наземного и бортового оборудования [6].

Описываемый в работе СЦНМ предназначен для испытаний метеорологических радиолокационных комплексов (МРЛК) с целью верификации их тактико-технических характеристик и оценки достоверности и точности получаемой информации. Кроме того, помещение экспериментального образца МРЛК в вычислительную среду СЦНМ, позволит исследовать характеристики и поведение разрабатываемых аппаратных и программных модулей как при создании нового радиолокатора, так и при его модернизации.

Разрабатываемый СЦНМ относится к классу больших систем, является многоцелевым и требует разработки и использования различных аппаратно-программных моделей метеорологических явлений (МЯ) и соответствующих им радиолокационных сигналов [6].

Проведение натурных экспериментов для определения показателей качества функционирования наземных метеорологических радиолокационных комплексов (МРЛК) в различных условиях фоновой и метеорологической обстановки является дорогостоящим и длительным процессом. Для совершенствования существующих и отработки новых режимов функционирования МРЛК предложено использовать стенд цифро-натурного моделирования (СЦНМ).

Целью работы является разработка структурной схемы стенда цифро-натурного моделирования МРЛК, формулировка назначения и задач его составных частей, и разработка методики компьютерного моделирования метеорологических явлений и соответствующих им радиолокационных сигналов.

Определен перечень задач, решаемых с помощью стенда цифро-натурной отработки на различных этапах жизненного цикла МРЛК, сформулированы требования к СЦНМ и основные принципы его построения. Представлена структура СЦНМ и рассмотрены общие вопросы её реализации в классе распределенных систем моделирования, а именно: построение ядра имитационной модели, разработка алгоритма синхронизации распределенных моделей, подключение аппаратных моделей к имитационной части СЦНМ. Представлена физико-математическая модель, описывающая отражения от метеоявлений различных классов и рельефа местности, а также имитирующая работу МРЛК в целом.

### **Структурная схема СЦНМ и описание его работы**

На различных этапах жизненного цикла МРЛК на стенд цифро-натурного моделирования возлагаются следующие задачи [7, 14].

1. На этапе разработки МРЛК СЦНМ должен обеспечивать обоснование (уточнение) перечня и значений требуемых величин технических характеристик аппаратных и программных компонентов МРЛК. Кроме того, он должен служить основой для проведения исследований по оптимизации архитектуры МРЛК, согласованию интерфейсов различных устройств и протоколов их взаимодействия.

2. На этапе испытаний МРЛК СЦНМ должен обеспечивать планирование натуральных экспериментов, проводимых для уточнения и сертификации вновь разработанных моделей, заблаговременную подготовку технических служб, накопление и систематизацию результатов натуральных экспериментов.

3. На этапе эксплуатации МРЛКСЦНМ можно использовать как часть тренажерно-моделирующей системы, которая служит для обучения инженерного состава, отработки процедур применения метеорадиолокатора, совершенствования системы технической эксплуатации и определения направлений модернизации.

В основу построения СЦНМ положены принципы модульности и открытости архитектуры стенда, позволяющие постоянно модернизировать отдельные модели, не нарушая работоспособности стенда в целом [11, 16, 17].

На основе сформулированных требований, решаемых задач и архитектурных принципов разработана структура СЦНМ, представленная на рисунке 1.

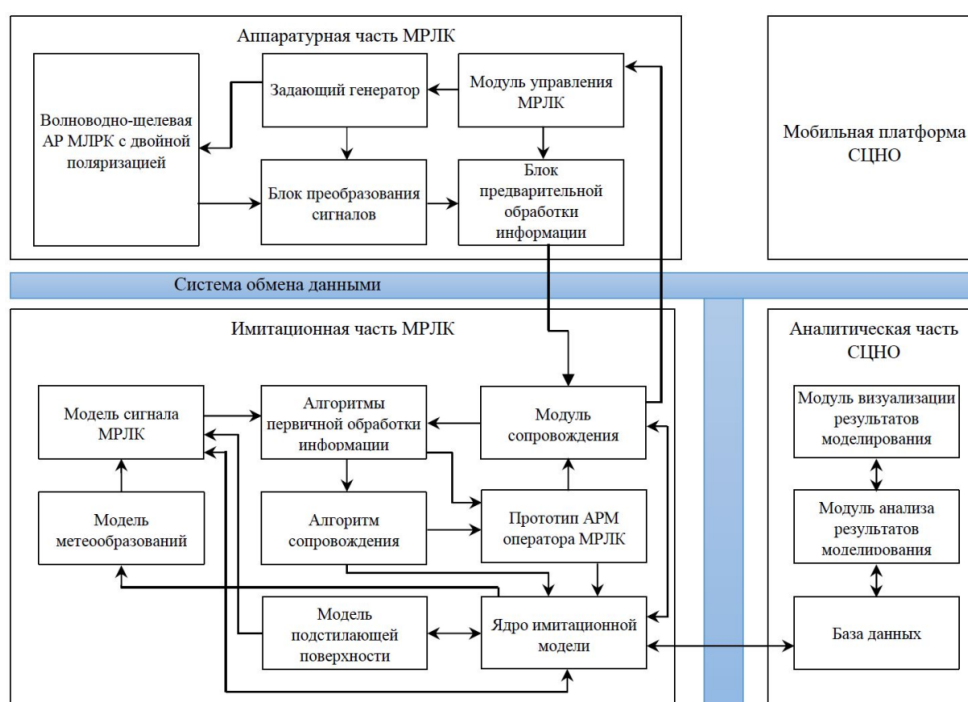


Рисунок 1 – Структура стенда цифро-натурного моделирования МРЛК

Согласно рисунку 1 СЦНМ можно разделить на четыре основные части [3, 7,19]:

- аппаратурная часть МРЛК, которая содержит реальные аппаратурные модули, входящие в состав экспериментального образца метеорадиолокатора;
- имитационная часть МРЛК, которая включает в себя набор программных и аппаратурных вычислительных модулей, объединенных в локальную вычислительную сеть и обеспечивающих имитацию функционирования отдельных алгоритмов в составе программного обеспечения МРЛК, а также формирование сигнальных и информационных потоков, необходимых для функционирования экспериментального образца МРЛК;

–аналитическая часть СЦНМ, представляющая собой набор программных модулей, обеспечивающих хранение исходных данных моделей, а также накопление и последующий анализ полученных результатов моделирования;

– мобильная платформа СЦНМ – совокупность аппаратурных средств, обеспечивающих размещение (на базе автомобиля, ж/д платформы и т.п.), перемещение, охлаждение, электропитание МРЛК и обслуживающей его локальной компьютерной сети.

Система обмена данными обеспечивает совместное функционирование физически удаленных моделей, организовывая передачу данных, сигналов синхронизации и команд управления.

Задачей аппаратурной части СЦНМ является проверка технических решений, принятых при построении МРЛК, связанных с формированием и высокочастотной обработкой сигнальных полей. В этой части стенда используются такие устройства как волноводно-щелевая решетка, задающий генератор, блок преобразования сигналов, блок предварительной обработки сигналов, блок управления процессами пространственного сканирования и др. На основе аппаратурной части МРЛК формируется банк данных эталонных сигналов, отраженных от различного типа атмосферных образований [7, 20].

На основе имитационной части МРЛК исследуются алгоритмы первичной обработки информации и сопровождения, алгоритмы работы автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора МРЛК, а также протоколы их взаимодействия, как между собой, так и с аппаратурными элементами МРЛК в составе СЦНМ. Программные компоненты имитационной части МРЛК решают следующие задачи: синхронизация и передача данных между аппаратурной и имитационной частями МРЛК; моделирование сигналов подстилающей поверхности на основе данных цифровых карт местности (типа подстилающей поверхности, высоты над уровнем моря); моделирование сигналов метеообразований, имитирующих динамику развития пространственных и структурных характеристик атмосферных образований различного типа (облаков, осадков, дымов и т.п.); моделирование процессов формирования, коррекции и экстраполяции расположения МЯ, наблюдаемых МРЛК; реализация

алгоритмов первичной обработки информации с целью обнаружения различных МЯ [1, 12].

Аналитическая часть СЦНМ решает задачи заполнения исходными данными моделирования и визуализации результатов моделирования с целью формирования оценок вариантов функционирования МРЛК в различных условиях. В состав аналитической части СЦНМ входят: база данных о правилах функционирования МРЛК, о типовых состояниях атмосферы и характеристиках сигналов, отраженных от различных МЯ, картографическая информация (цифровая карта местности) и т.д. [13].

Реализация представленного на рис.1 СЦНМ требует особого внимания к построению ядра имитационной модели, принципы работы которой рассмотрим более детально.

### Ядро имитационной модели СЦНМ

Анализ приведенных выше требований к СЦНМ определяет возможность реализации структуры имитационной части метеорологического радиолокационного комплекса в виде, представленном на рисунке 2, где под элементом структуры МРЛК понимается отдельная программа, предназначенная для решения некоторых специфических задач [6, 9].



Рисунок 2 – Структура имитационной части метеорологического радиолокационного комплекса

Поясним назначение составных элементов имитационной части МРЛК.

Администратор имитационной модели – это человек-оператор, выполняющий основные административные функции по подготовке к проведению имитационного моделирования.

Ядро имитационной модели – набор программных модулей, необходимых для имитации функционирования объекта моделирования.

Графические интерфейсы пользователей – программные модули, предоставляющие возможности включения пользователей в процесс моделирования, а также отображения и анализа результатов моделирования.

Частные модели СЦНМ представляют собой отдельно функционирующие, взаимодействующие между собой программы, имитирующие функционирование отдельных частей имитационной модели.

Распределенная база данных (БД) – составная часть распределенной БД СЦНМ, содержащая исходные данные, необходимые для функционирования реализуемой модели, а также обеспечивающая сохранение и последующее использование результатов моделирования [23, 24].

Ключевым моментом реализации разрабатываемого стенда цифронатурной моделирования является организация совместного функционирования аппаратурной и имитационной частей МРЛК в составе СЦНМ. С учетом типовых требований к подключению аппаратурных модулей [14], разработана структурная схема подключения аппаратурных элементов к имитационной части МРЛК, представленная на рисунке 3.

Перечень задач, решаемых при подключении аппаратурных модулей, представлен в таблице 1.

В основе построения имитационной модели работы МРЛК лежит физико-математическая модель комплекса, которую можно разделить на две части:

1) модель входных радиолокационных сигналов; 2) модели различных МЯ, определяющие вид и параметры входных радиолокационных сигналов [2, 26].

Далее рассмотрим принципы построения указанных моделей.

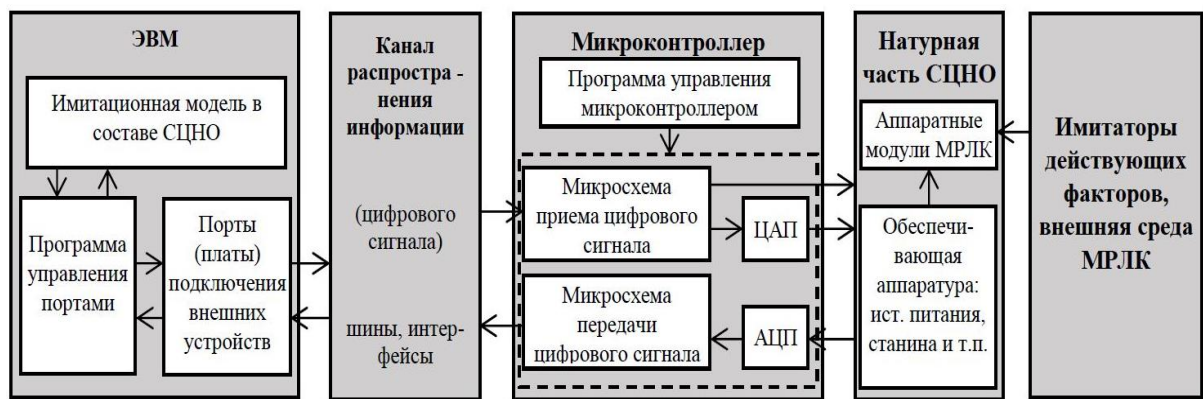


Рисунок 3 – Обобщенная структурная схема подключения аппаратных элементов к имитационной части МРЛК

Таблица 1

Задачи, решаемые аппаратурной частью МРЛК в составе СЦНМ

№ п/п	Решаемые задачи	Направление передачи информации	Основа для решения задачи	Вопросы, требующие исследования
1.	Преобразование данных из формата имитационной модели в формат данных потребителя	От ЭВМ к аппаратурной части МРЛК	Программа управления портами	Разработка программ управления компьютерными портами и интерфейсными платами
2.	Прием данных в формате передачи, преобразование их в цифровой формат (предварительная обработка, упаковка) и отправление в канал распространения информации	От ЭВМ к натурной части МРЛК	Компьютерные порты ввода-вывода, системные платы подключения внешних устройств	Анализ портов ввода-вывода, исследование технологий (интерфейсов) передачи данных
3.	Транспортирование информации (передача цифрового сигнала) от источника к потребителю с минимальными потерями качества	От ЭВМ к аппаратурной части МРЛК. От аппаратурной части МРЛК к ЭВМ.	Шины, интерфейсы передачи данных	Анализ технологий (интерфейсов) передачи данных, разработка предложений по их обоснованному выбору
4.	Прием цифрового сигнала из канала распространения, его преобразование в формат данных, обработка и формирование цифрового сигнала для передачи на аппаратурный модуль	От ЭВМ к аппаратурной части МРЛК	Микросхемы приема цифрового сигнала	Анализ существующих семейств микроконтроллеров, разработка предложений по выбору микроконтроллера для согласований аппаратурных модулей с каналами распространения информации. Разработка программного обеспечения микроконтроллера.
5.	Преобразование цифрового сигнала в аналоговый и передача его аппаратурной части МРЛК	От ЭВМ к аппаратурной части МРЛК	Цифро-аналоговые преобразователи	
6.	Прием аналогового сигнала от аппаратурного модуля, преобразование его в цифровой формат	От аппаратурной части МРЛК к ЭВМ	Аналогово-цифровые преобразователи	
7.	Формирование на основе цифрового сигнала структуры данных, их преобразование и упаковка для передачи в канал распространения информации	От аппаратурной части МРЛК к ЭВМ	Микросхемы передачи цифрового сигнала	
8.	Прием цифрового сигнала из канала распространения информации, его преобразование в формат передачи данных	От аппаратурной части МРЛК к ЭВМ	Компьютерные порты, системные платы подключения внешних устройств	Анализ компьютерных портов ввода-вывода. Исследование технологий передачи данных.
9.	Преобразование данных из формата передачи в формат имитационной модели	От аппаратурной части МРЛК к ЭВМ	Программы управления портами	Разработка программ управления портами

## Физико-математическая модель радиочастотной части МРЛК

Структура физико-математической модели МРЛК представлена на рисунке 4.

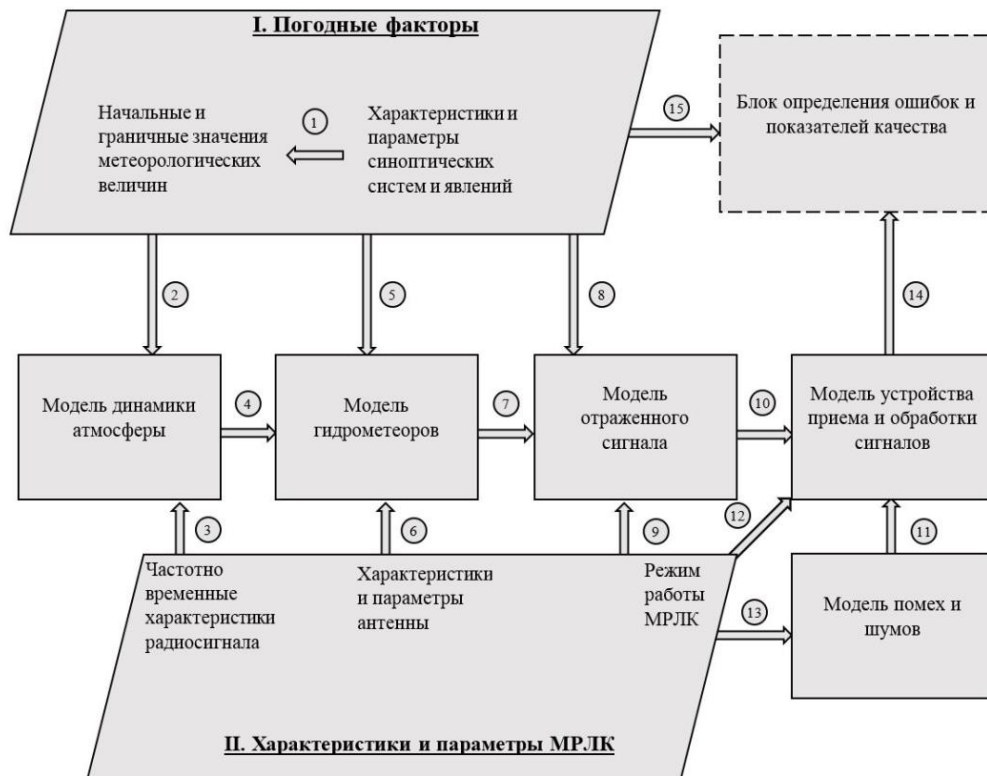


Рисунок 4 – Структура физико-математической модели МРЛК

Исходные данные, влияющие на функционирование МРЛК, можно разделить на две большие группы [10, 21, 22, 25].

1. **Погодные факторы** – физическое состояние атмосферы в зоне обзора МРЛК, характеризуемое совокупностью МЯ: вид осадков, туманы, метели, грозы, шквалы, пыльные бури, струйные течения, смерчи, обледенение, болтанка и др. Эти факторы обозначены как связь ① на рис. 4 и определяют начальные и граничные значения метеорологических величин (скорость ветра, характеристики турбулентности, температура, давление, влажность воздуха, границы облаков, видимость, количество осадков, и др.).

2. **Характеристики и параметры МРЛК:**

1) частотно-временные параметры излучаемого радиосигнала (длина волны  $\lambda$ , длительность импульса  $\tau$ , частота повторения импульсов –  $F_{\text{повт}}$ , средняя мощность излучения  $P_{\text{ср}}$  и др.;

2) характеристики и параметры антенны (диаграмма направленности антенны, поляризация излучаемого сигнала, параметры движения фазового центра антенны и др.);

3) режим работы МРЛК: форма зоны обзора, алгоритм сканирования, длительность накопления отраженных радиоимпульсов, алгоритмы обработки радиосигналов и данных и др.

### Модели метеорологических явлений и отраженных сигналов

Важнейшими составляющими элементами приведенной физико-математической модели являются модели МЯ, определяющие параметры отраженных радиолокационных сигналов. При этом модели МЯ основаны на динамических моделях атмосферы, получение которых возможно с использованием основных уравнений гидротермодинамики. Рассмотрим методику расчета основных параметров отраженных радиосигналов, зависящих от свойств и характеристик различных МЯ, представленных как совокупность гидрометеоров [18].

Основой современного вихреразрешающего моделирования динамики атмосферы является пространственная фильтрация системы трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса, что приводит к представлению полного вектора скорости  $V_n = [u_n \ v_n \ w_n]^T$  в виде суммы среднего (усредненного по пространству) значения  $\bar{V} = [\bar{u} \ \bar{v} \ \bar{w}]^T$  и случайных пульсаций скорости  $\tilde{V} = [\tilde{u} \ \tilde{v} \ \tilde{w}]^T$ , обусловленных турбулентностью (рисунок 5).



Рисунок 5 – Среднее (ламинарное) и случайное (турбулентное) течения

**Модель гидрометеоров** включает в себя следующие структурные элементы [2, 28].

1. Модель вектора скорости гидрометеоров  $V = [u \ v \ w]^T$  определяется тем, что частицы осадков, имеющие небольшую массу, быстро увлекаются

горизонтальными воздушными потоками (см. связь ④ на рисунке 4) и хорошо описывают их траекторию:

$$u = u_{\Pi} = \bar{u} + \tilde{u}, \quad v = v_{\Pi} = \bar{v} + \tilde{v},$$

где  $\bar{u}$  – средняя зональная составляющая результирующего вектора скорости ветра;  $\bar{v}$  – средняя меридиональная составляющая результирующего вектора скорости ветра.

Для вертикальной скорости  $w$  в первом приближении необходимо дополнительно учитывать установившуюся скорость падения  $w_t$  в спокойном воздухе:

$$w = w_{\Pi} - w_t = \bar{w} + \tilde{w} - w_t,$$

где  $\bar{w}$  – средняя вертикальная составляющая результирующего вектора скорости ветра.

Анализ экспериментальных данных для дождевых капель показал, что можно использовать аппроксимацию

$$w_t(D, \rho) = aD^b \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^c, \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр капли;  $\rho_0$  – плотность воздуха при давлении 760 мм рт. ст. и температуре 20°C;  $a, b$  и  $c$  – параметры.

2. Распределение капель по размерам принято характеризовать спектром капель  $N(D)dD$  – числом капель с диаметром значений между  $D$  и  $D + dD$  в единичном объеме воздуха. При этом для плотности распределения удельного числа капель широко используется экспоненциальное распределение Маршалла – Пальмера

$$N(D) = N_0 \exp(-\Lambda D), \quad (2)$$

где  $N_0$  и  $\Lambda$  – коэффициенты, зависящие от типа осадков и их интенсивности.

3. Характеристики поглощения, отражения и рассеяния зависят от типа и интенсивности осадков, водности облаков и длины волны радиосигнала, что отражено связями ⑤ и ⑥ на структурной схеме рис. 4.

Количественный анализ свойств отражения от жидких осадков основан на наблюдениях, показавших, что капли имеют форму сплющенного у полюсов эллипсоида вращения. Можно показать, что в этом случае при рэлеевском приближении эффективная площадь рассеяния (ЭПР) для горизонтально  $\sigma_H$  и вертикально  $\sigma_V$  поляризованных волн равна [9, 15]:

$$\sigma_{H,V} = \frac{\pi^5 D_e^6}{9\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{1 + (m^2 - 1)L_{H,V}} \right|^2, \quad (3)$$

где  $D_e = 2\sqrt[3]{b^2 a}$  – диаметр сферической капли эквивалентного объема;  $a$  и  $b$  – малая (вертикальная) и большая (горизонтальная) полуоси эллипсоида;  $m = n - j \cdot k$  – комплексный показатель преломления вещества частиц;  $n$  – действительный показатель преломления;  $k$  – коэффициент ослабления;

$$L_V = \frac{1}{e^2} \left( 1 - \sqrt{\frac{1-e^2}{e^2}} \arcsin e \right) = 1 - 2L_H, \quad (4)$$

где  $L_V$  – геометрический фактор, характеризующий форму капли;  $e = 1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2$  – эксцентриситет.

Геометрические характеристики моделей гидрометеоров положены в основу определения энергетических характеристик отраженных от них радиолокационных сигналов. Поскольку размеры капли осадков являются случайными, при построении энергетических соотношений для отраженного сигнала удобнее использовать удельную эффективную площадь рассеяния (УЭПР) [5, 18]:

$$\eta \equiv \frac{1}{\Delta V} \sum_{\Delta V} (\sigma_{H,V})_i, \quad (5)$$

усредненную в пределах объема  $\Delta V$ . При задании распределения капель по размерам УЭПР может быть рассчитана по формуле

$$\eta = \int_0^\infty \sigma_{H,V}(D_e) N(D_e) dD_e. \quad (6)$$

Аналогично для коэффициента ослабления  $k$  можно использовать оценку

$$k = \int_0^{\infty} \sigma_t(D)N(D) dD, \quad (7)$$

при

$$\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s = \sigma_a + \frac{2}{3}\sigma_{H,V} = \frac{\pi^2 D^3}{9\lambda} \left| \frac{m^2+2}{1+(m^2-1)L_{H,V}} \right|^2 \operatorname{Im}(-K_w) + \frac{2}{3}\sigma_{H,V}, \quad (8)$$

где  $\sigma_t$  – эффективная площадь полного ослабления сферических капель, учитывающая эффективную площадь рассеяния  $\sigma_a$  и эффективную площадь поглощения  $\sigma_s$ ;  $\operatorname{Im}$  – мнимая часть комплексного числа  $\left(-\frac{m^2-1}{m^2+2}\right)$ .

При этом в соотношении (8) используются следующие значения коэффициента  $K_w \equiv \frac{m^2-1}{m^2+2} \approx 0.92$  для воды и  $K_w \approx 0.2$  для снега.

Модель отраженного сигнала основывается на том, что эхосигнал является суммой большого количества элементарных отражателей, формируемых случайным образом движущимися гидрометеорами (связь 7 на рис. 4), распределенными в зоне обзора МРЛК. При этом адекватное описание случайного процесса возможно лишь с привлечением методов статистической теории. Наиболее распространенной и часто используемой моделью такого высокочастотного сигнала является узкополосный случайный процесс с амплитудой, имеющей распределение Рэлея [1]. Составляющие комплексной огибающей этого сигнала описываются нормальным случайным процессом с нулевым средним значением [24, 27]:

$$\dot{i}(t) = u_{re}(t) + ju_{im}(t), \quad u_{re}(t) \square \mathbf{N}(0, \sigma_0^2), \quad u_{im}(t) \square \mathbf{N}(0, \sigma_0^2).$$

Корреляционно-спектральные характеристики отраженного сигнала определяются пространственным распределением и интенсивностью осадков, характерных для заданной синоптической ситуации, а также характеристиками и параметрами МРЛК (связь 10 на рис. 4).

Модель устройства приема и обработки сигналов характеризуется входными процессами (связь 10, 11 на рис. 4) и определяется режимом работы МРЛК (связь 12 на рис. 4). Кроме полезных (информационных) отражений от

гидрометеоров на вход устройства приема и обработки поступают помехи и шумы.

Модель помех и шумов должна учитывать [2, 8, 10]:

- внутренний шум устройства приема и обработки, интенсивность (спектральная плотность мощности) которого зависит от коэффициента шума первых каскадов аналоговой части СВЧ-приемника;
- широкополосные помехи, обусловленные в основном отражениями от рельефа местности.

Корреляционно-спектральные характеристики отражений от земли определяются (связь 13 на рис 4) частотно-временными параметрами излучаемого радиосигнала, ориентацией в пространстве главного луча и боковых лепестков диаграммы направленности антенны, а также распределением удельной площади рассеивания по земной поверхности.

В первом приближении отражение от земли в режиме низкой частоты повторения импульсов можно аппроксимировать белым гауссовским шумом с нулевым средним, единственным параметром которого является интенсивность [10, 26].

На выходе модели устройства приема и обработки формируются измеренные значения метеорологических параметров (связь 14 на рис. 4), которые могут сравниваться в блоке определения ошибок и показателей качества с заданными модельными значениями (связь 15 на рис. 4) для определения характеристик точности и помехоустойчивости.

При проведении натуральных и модельных экспериментов в общем случае необходимо применять метод рационального планирования и последовательного ведения экспериментов.

Сущность рационального планирования и последовательного ведения экспериментов должна состоять в определении по ограниченному числу натуральных экспериментов доверительного интервала оценки параметра с уровнем доверительной вероятности не менее 0,9 и уточнения ширины этого доверительного интервала по результатам моделирования, показывая,

насколько физико-математическая модель соответствует объекту моделирования.

Эксперименты с физико-математическими моделями при проведении натурных испытаний метеорологического радиолокационного комплекса необходимо проводить последовательно до тех пор, пока не будет принято решение о соответствии или несоответствии комбинированной оценки параметров объекта испытаний требованиям, заданным в тактико-техническом задании [1, 10].

Представленная физико-математическая модель метеорологического радиолокационного комплекса может использоваться при постановке и решении задачи синтеза алгоритмов обработки отраженных радиосигналов на фоне помех. Разделение модели на блоки соответствует структурному и объектно-ориентированному подходам, используемым в современных системах программирования.

### **Заключение**

С целью сокращения сроков разработки и испытаний метеорадиолокационных комплексов в работе представлена разработка структурной схемы стенда цифро-натурного моделирования МРЛК. Для СЦНМ описаны его назначение, структура, основные решаемые задачи СЦНМ и его составных частей.

Подробно описано ядро имитационной модели СЦНМ, приведена структура ядра, включающего различные аппаратные и программные средства. Ключевым шагом реализации разрабатываемого стенда цифро-натурной моделирования является организация совместного функционирования аппаратной и имитационной частей МРЛК в составе СЦНМ. С учетом типовых требований к подключению аппаратных модулей, разработана структурная схема подключения аппаратных элементов к имитационной части МРЛК.

Описана физико-математическая модель МРЛК. Показано, что исходные данные, влияющие на функционирование МРЛК, можно разделить на две большие группы – погодные параметры и характеристики и параметры МРЛК.

Погодные параметры определяют физическое состояние атмосферы, характеризующее совокупностью различных метеорологических явлений.

Большое внимание уделено моделям метеорологических явлений. Рассмотрены модели гидрометеоров, включающие модели скорости их перемещения, распределение капель по размерам, характеристики поглощения, отражения и рассеяния, приведена также методика вычисления удельной эффективной площади рассеяния гидрометеорных образований.

Имитация фоновой и целевой обстановки и соответствующих отраженных радиолокационных сигналов при разработке СЦНМ является наиболее трудоемкой частью всей работы. Использование записей реальных радиолокационных сигналов, соответствующих отдельным режимам работы МРЛК, существенно упрощает процесс создания и сертификацию моделей и в ряде случаев повышает достоверность определения того или иного метеорологического явления. Для записей первичных сигналов, данных и сигналов в процессе натурного эксперимента при цифро-натурном методе испытаний МРЛК система регистрации стенда ЦНМ обеспечивает запись информации не менее 1 Гб при частоте поступления данных 30...50 МГц.

---

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

### **Список источников**

1. Аргучинцев В.К. Динамика атмосферы: учебн. пособие. Иркутск: Изд. Иркутского государственного университета, 2006. 124 с.
2. Билетов М.В., Тищенко А.И., Кузнецов И.Е. Радиолокационная метеорология. Ч. 1. Основы радиолокационной метеорологии / под ред. М.В. Билетова. М.: Воениздат, 2008. 332 с.
3. Моделирование радиолокатора с синтезированной апертурой при решении задач его внутреннего и внешнего проектирования / А.П. Брызгалов,

И.В. Ковальчук, А.В. Хныкин, И.А. Шевела, Р.Г. Юсупов // Труды МАИ: электрон. журнал. 2011. № 43. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24734>.

4. Безуглов А.А., Детков А.Н. Метеорологический радиолокационный комплекс обеспечения безопасности полётов авиации в Арктическом регионе. // Радиолокационные системы специального и гражданского назначения. В двух книгах. Кн. 1 / под ред. Ю.И. Белого. М.: Радиотехника, 2018. С. 194–202.

5. Радиолокационные измерения осадков / А.М. Боровиков, В.В. Костарев, И.П. Мазин и др. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 96 с.

6. Исаев С.А., Детков А.Н., Безуглов А.А. Цифро-натурный метод оценки характеристик метеорологических радиолокационных комплексов ближней аэродромной зоны // Автоматизация. Современные технологии. 2018. № 3. С. 116–120.

7. Борисов Ю.П., Цветков В.В. Математическое моделирование радиотехнических систем. М.: Радио и связь, 1985. 176 с.

8. Булыгин М.Л., Муллов К.Д. Формирователь зондирующего сигнала для радиолокатора с синтезированной апертурой // Труды МАИ: электрон. журнал. 2015. № 80. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57040>.

9. Брылёв Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминова Г.Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 232 с.

10. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения / пер. с англ. под ред. А.А. Черникова. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 562 с.

11. Моделирование в радиолокация / А.И. Леонов, В.Н. Васенев, Ю.И. Гайдуков и др. М.: Советское радио, 1979. 264 с.

12. Испытания РЛС (оценка характеристик) / А.И. Леонов, С.А. Леонов, Ф.В. Нагулино и др.; под ред. А.И. Леонова. М.: Радио и связь, 1990. 208 с.

13. Мельников В.М. Обработка информации в доплеровских МРЛ // Зарубежная радиоэлектроника. 1993. № 4. С. 35–43.

14. Синицын И.А., Артюх А.С. Моделирование систем и процессов: учебн. пособие. Воронеж: ВАИУ, 2010. 214 с.

15. Шупяцкий А.Б. Радиолокационные измерения интенсивности и некоторых других характеристик осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 118 с.
16. Короленко П.В., Рыжикова Ю.В. Моделирование и обработка случайных сигналов и структур. М.: МГУ, 2012. 67 с.
17. Ширяев А.Н. Вероятностно-статистические методы в теории принятия решений. М.: МЦНМО, 2011. 144 с.
18. Билетов М.В., Кузьменко В.П., Павлов Н.Ф. Радиометеорология. М.: Воениздат, 1984. 208 с.
19. Особенности проведения программы JSF и роль технологий имитационно-математического моделирования в ее реализации: (Аналитический обзор по материалам зарубежных информационных источников) / под общ. ред. Е.А. Федосова. М.: ГосНИИАС, 2002. 118 с.
20. Цимбал А.А., Аншина М.Л. Технологии создания распределенных систем. Для профессионалов. СПб.: Питер, 2003. 576 с.
21. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981. 640 с.
22. Облака и облачная атмосфера. Справочник / под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 646, [1] с.
23. Пригарин С.М. Методы численного моделирования случайных процессов и полей / отв. ред. Г.А. Михайлов. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2005. 258 с.
24. Рытов М.С., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. Случайные поля. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1978. 463 с.
25. Синицын И.А. Обоснование исходных данных для разработки имитационной модели отражений радиолокационных сигналов сантиметрового диапазона волн от различных метеорологических объектов / Промежуточный отчет по НИР. М., 2012.
26. Синицын И.А., Артюх А.С. Моделирование систем и процессов: учебн. пособие. Воронеж: ВАИУ, 2010.
27. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.

28. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели) / Седунов Ю.С., Авдюшин С.И., Е.П. Борисенков и др. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 508, [1] с.

## Reference

1. Arguchintsev V.K. *Dinamika atmosfery: uchebn. Posobie* [Dynamics of the atmosphere], textbook, Irkutsk, Izd. Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta, 2006, 124 p.
2. Biletov M.V., Tishchenko A.I., Kuznetsov I.E. *Radiolokatsionnaya meteorologiya. Ch. 1. Osnovy radiolokatsionnoi meteorologii* [Radar meteorology. Pt. 1. Fundamentals of radar meteorology], ed. by Biletov M.V. Moscow, Voenizdat, 2008, 332 p.
3. Bryzgalov A.P., Kovalchuk I.V., Khnykin A.V., Shevela, I.A., Yusupov R.G. *Trudy MAI: elektron. zhurnal*, 2011, no. 43. Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24734>.
4. Bezuglov A.A., Detkov A.N. *Radiolokatsionnye sistemy spetsial'nogo i grazhdanskogo naznacheniya. V dvukh knigakh. Kn. 1* [Radar systems for special and civilian purposes. In two books. Book 1], Moscow, Radiotekhnika, 2018, pp. 194–202.
5. Borovikov A.M., Kostarev V.V., Mazin I.P. et al. *Radiolokatsionnye izmereniya osadkov* [Radar measurements of precipitation], Moscow, Gidrometeoizdat, 1967, 96 p.
6. Isaev S.A., Detkov A.N., Bezuglov A.A. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*, 2018, no. 3, pp. 116–120.
7. Borisov Yu.P., Tsvetkov V.V. *Matematicheskoe modelirovanie radiotekhnicheskikh system* [Mathematical modeling of radio engineering systems], Moscow, Radio i svyaz', 1985, 176 p.
8. Bulygin M.L., Mullov K.D. *Trudy MAI: elektron. zhurn*, 2015, no. 80. Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57040>.
9. Brylev G.B., Gashina S.B., Nizdoiminoga G.L. *Radiolokatsionnye kharakteristiki oblakov i osadkov* [Radar characteristics of clouds and precipitation], Leningrad, Gidrometeoizdat, 1986, 232 p.

10. Doviak R., Zrnich D. *Doplerovskie radiolokatory i meteorologicheskie nablyudeniya* [Doppler radars and meteorological observations], translated from Engl. by A.A. Chernikova, Leningrad, Gidrometeoizdat, 1988, 562 p.
11. Leonov A.I., Vasenev V.N., Gaidukov Yu.I. et al. *Modelirovanie v radiolokatsiya* [Simulation in radar], Moscow, Sovetskoe radio, 1979, 264 p.
12. Leonov A.I., Leonov S.A., Nagulinko F.V. et al. *Ispytaniya RLS (otsenka kharakteristik* [Radar testing (performance evaluation)], ed. by Leonov A.I., Moscow, Radio i svyaz', 1990, 208 p.
13. Melnikov V.M. *Zarubezhnaya radioelektronika*, 1993, no. 4, pp. 35–43.
14. Sinitsyn I.A., Artyukh A.S. *Modelirovanie sistem i protsessov* [Modeling of systems and processes], textbook, Voronezh, VAIU, 2010, 214 p.
15. Shupyatsky A.B. *Radiolokatsionnye izmereniya intensivnosti i nekotorykh drugikh kha-rakteristik osadkov* [Radar measurements of the intensity and some other precipitation characteristics], Leningrad, Gidrometeoizdat, 1960, 118 p.
16. Korolenko P.V., Ryzhikova Yu.V. *Radiolokatsionnye izmereniya intensivnosti i nekotorykh drugikh kha-rakteristik osadkov* [Modeling and processing of random signals and structures], Leningrad, Gidrometeoizdat, 1960, 118 p.
17. Shiryaev A.N. *Veroyatnostno-statisticheskie metody v teorii prinyatiya reshenii* [Probabilistic and statistical methods in decision theory], Moscow, MTSNMO, 2011, 144 p.
18. Tickets M.V., Kuzmenko V.P., Pavlov N.F. *Radiometeorologiya* [Radiometeorology], Moscow, Voenizdat, 1984, 208 p.
- 19 *Osobennosti provedeniya programmy JSF i rol' tekhnologii imitatsi-onno-matematicheskogo modelirovaniya v ee realizatsii (Analiticheskie obzor po materialam zarubezhnykh informatsionnykh istochnikov)* [Features of the JSF program and the role of simulation and mathematical modeling technologies in its implementation: (Analytical review based on materials from foreign information sources)], ed. by. E.A. Fedosov, Moscow, GosNIIAS, 2002, 118 p.
20. Tsymbal A.A., Anshina M.L. *Tekhnologii sozdaniya raspredelennykh sistem. Dlya professionalov* [Technologies for creating distributed systems. For professionals], Saint-PetersburgPiter, 2003, 576 p.

21. Akhmanov S.A., Dyakov Yu.E., Chirkin A.S. *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku i optiku* [Introduction to statistical radiophysics and optics], Moscow, Nauka, 1981, 640 p.
22. *Oblaka i oblachnaya atmosfera* [Clouds and cloudy atmosphere]: handbook, ed. by I.P. Mazin, A.H. Hrgian, Leningrad, Gidrometeoizdat, 1989, 646, [1] p.
23. Prigarin S.M. *Metody chislennogo modelirovaniya sluchainykh protsessov i polei* [Methods of numerical modeling of random processes and fields], ed. by G.A. Mikhailov, Novosibirsk, IVMiMG SB RAS, 2005, 258 p.
24. Rytov M.S., Kravtsov Yu.A., Tatarsky V.I. *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku. Ch. 2. Sluchainye polya* [Introduction to statistical radiophysics. Pt. 2. Random fields], 2nd ed., revised and add., Moscow, Nauka, 1978, 463 p.
25. Sinitsyn I.A. *Obosnovanie iskhodnykh dannykh dlya razrabotki imita-tсионnoi modeli otrazhenii radiolokatsionnykh signalov santimetro-vogo diapazona voln ot razlichnykh meteorologicheskikh ob"ektov* [Substantiation of the initial data for the development of an imitation model of reflections of radar signals of the centimeter wavelength range from various meteorological objects], Interim Research Report, Moscow, 2012.
26. Sinitsyn I.A., Artyukh A.S. *Modelirovanie sistem i protsessov* [Modeling of systems and processes]: textbook, Voronezh, VAI Publ., 2010.
27. Tikhonov V.I. *Statisticheskaya radiotekhnika* [Statistical radio engineering], 2nd ed., revised and additional, Moscow, Radio i svyaz', 1982, 624 p.
28. Sedunov Yu.S., Avdyushin S.I., E.P. Borisenkov et al. *Atmosfera. Spravochnik (spravochnye dannye, modeli)* [The atmosphere. Handbook (reference data, models)], Leningrad, Gidrometeoizdat, 1991, 508, [1] p.

### **Информация об авторах**

**Александр Анатольевич Безуглов**, специалист, филиал ПАО «ОАК» - ОТА, г. Москва, Россия.

**Константин Юрьевич Гаврилов**, доктор технических наук, профессор, кафедра 410, МАИ, г. Москва, Россия; e-mail: [kongav3461@mail.ru](mailto:kongav3461@mail.ru)

**Елена Владимировна Кудряшова**, начальник методической группы, ПАО «НПО «Алмаз», г. Москва, Россия.

### Information about the authors

**Aleksandr A. Bezuglov**, Specialist, Branch of PJSC «UAC» — OTA, Moscow, Russia.

**Konstantin Yu. Gavrilov**, D. Sc. (Engineering), Professor, Department 410, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; e-mail: [kongav3461@mail.ru](mailto:kongav3461@mail.ru).

**Elena V. Kudryashova**, Head of the Methodological Group, JSC «NPO «Almaz», Moscow, Russia.

---

Получено 15 декабря 2025 ● Принято к публикации 25 февраля 2026 ● Опубликовано 30 апреля 2026  
Received 15 December 2025 ● Accepted 25 February 2026 ● Published 30 April 2026

---