

УДК 621.396.96
DOI

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ГОЛОЛЕДНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОЧАСТОТНОЙ ЛОКАЦИИ

Голенищев-Кутузов А.В., Потапов А.А. ORCID ID 0000-0002-4497-5796

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет», Казань, Российская Федерация,
e-mail: aapot@ya.ru*

Статья посвящена разработке устройства для мониторинга состояния воздушных линий электропередачи с акцентом на обнаружение гололедно-изморосевых отложений, представляющих серьезную угрозу надежности энергосистем. Авторами проведен детальный анализ недостатков традиционных методов диагностики, таких как визуальный осмотр и использование данных метеостанций, которые являются трудоемкими, недостаточно оперативными и не обеспечивают точных данных о состоянии конкретного участка воздушных линий электропередачи. В качестве современного и эффективного решения в работе предлагается архитектура автоматизированной комплексной системы мониторинга, основанной на передовом методе радиочастотной локации. Система использует сеть автономных локационных датчиков, устанавливаемых на проводах воздушных линий, которые позволяют дистанционно измерять среднюю толщину обледенения, температуру провода, угол провиса, ток нагрузки, виброускорение и другие ключевые параметры. Принцип работы основан на регистрации изменений диэлектрической проницаемости среды и волнового сопротивления линии, вызванных образованием льда. Особое внимание уделено обеспечению энергетической автономности датчиков за счет применения систем электростатического питания, преобразующих энергию электрического поля линии электропередачи. Для повышения достоверности данных предложен метод верификации с помощью дополнительных датчиков контроля проходного сопротивления контактных соединений. Показано, что внедрение системы позволяет перейти к обслуживанию по фактическому состоянию, что повышает экономическую эффективность и надежность электроснабжения.

Ключевые слова: мониторинг линий электропередачи, гололедно-изморосевые отложения, радиочастотная локация, автономный датчик, волновое сопротивление, диагностика, обледенение проводов

AUTOMATED INTEGRATED SYSTEM FOR MONITORING ICE FORMATIONS ON OVERHEAD POWER LINES USING RADIO FREQUENCY LOCATION

Golenischev-Kutuzov A.V., Potapov A.A. ORCID ID 0000-0002-4497-5796

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Kazan State Power Engineering University», Kazan, Russian Federation, e-mail: aapot@ya.ru*

The article is devoted to the development of a device for monitoring the condition of overhead power lines with an emphasis on the detection of ice and drizzle deposits that pose a serious threat to the reliability of power systems. The authors carried out a detailed analysis of the shortcomings of traditional diagnostic methods, such as visual inspection and the use of meteorological station data, which are labor-intensive, insufficiently operational and do not provide accurate data on the state of a particular section of overhead power lines. As a modern and effective solution, the architecture of an automated integrated monitoring system based on the advanced method of radio frequency ranging is proposed. The system uses a network of autonomous location sensors installed on the wires of overhead lines, which allow you to remotely measure the average thickness of icing, wire temperature, sag, load current, vibration acceleration and other key parameters. The principle of operation is based on the registration of changes in the dielectric constant of the medium and the wave impedance of the line caused by the formation of ice. Particular attention is paid to ensuring the energy autonomy of sensors through the use of electrostatic power supply systems that convert the energy of the electric field of power lines. To increase the reliability of the data, a method of verification using additional sensors for monitoring the throughput resistance of contact joints is proposed. It is shown that the introduction of the system makes it possible to switch to state-based maintenance, which increases the economic efficiency and reliability of power supply.

Keywords: monitoring of power lines, ice and drizzle deposits, radio frequency location, autonomous sensor, wave impedance, diagnostics, icing of wires

Введение

Воздушные линии электропередачи являются критически важным, но уязвимым элементом энергетической инфраструктуры, подверженным воздействию атмосферных явлений [1]. Наибольшую угрозу их надежности представляют гололедно-изморосевые

отложения, приводящие к механическим перегрузкам, опасному провисанию проводов, дисбалансу в многофазных системах и усталостным разрушениям [2, 3]. Среди этих факторов одним из наиболее опасных и разрушительных является атмосферное обледенение проводов и тросов.

Образование гололедно-изморосевых отложений на элементах воздушных линий (ВЛ) приводит к ряду критических последствий:

1. Резкое увеличение механической нагрузки на провода, несущие тросы и опоры, что может вызвать их обрыв или разрушение опор.

2. Значительное провисание проводов, что приводит к сокращению допустимых габаритов до земли и пересекаемых объектов, повышающее риск короткого замыкания.

3. Создание дисбаланса в многофазных линиях, приводящее к асимметрии токов и напряжений.

4. Разрушение элементов изоляции и арматуры при сбросе льда.

5. Возникновение «пляски проводов» – низкочастотных колебаний большой амплитуды, которые вызывают усталостные напряжения в материале провода и могут привести к схлестыванию фаз.

Традиционные методы борьбы с обледенением, такие как плавка льда током нагрузки или применение специальных антиобледенительных покрытий, требуют своевременного и точного запуска на участках, подвергшихся обледенению. Их эффективность напрямую зависит от оперативного обнаружения факта образования льда и контроля его интенсивности [4, 5]. Существующие системы диагностики, основанные на визуальных осмотрах и данных метеостанций, имеют существенные недостатки: они трудоемки, не оперативны и не предоставляют точных данных о фактическом состоянии конкретного участка ВЛ, что приводит к запаздыванию в принятии решений или к необоснованным затратам на профилактику [6].

В связи с этим разработка и внедрение автоматизированных систем мониторинга состояния ВЛ в реальном времени является актуальной научно-технической задачей. Особую важность в рамках таких систем приобретают устройства и методы, позволяющие достоверно, своевременно обнаруживать и оценивать интенсивность обледенения [7–9].

Способы обнаружения льда на линии электропередач (ЛЭП) можно классифицировать следующим образом:

1. Прямые (визуальные) методы [10]:

– Анализ изображений с камер. Устройства, оснащенные камерами, передают изображения проводов в центр мониторинга, где оператор или алгоритм компьютерного зрения анализирует наличие и толщину ледяной корки. Недостаток – зависимость от условий видимости (ночь, туман, снегопад) и высокое энергопотребление.

– Лазерное сканирование. Специализированные лидары, установленные на земле или на летательных аппаратах, позволяют с высокой точностью строить 3D-модель провода и определять толщину отложений. Метод точен, но дорог и не подходит для постоянного мониторинга всей сети.

2. Косвенные методы, основанные на изменении физических параметров провода [11, 12]:

– Измерение весовой нагрузки. На опоры устанавливаются тензометрические датчики, измеряющие усилие натяжения провода. Увеличение веса провода прямо указывает на массу гололедных отложений. Это один из самых точных методов.

– Контроль провисания (стрелы провиса). С помощью акселерометров, гироскопов или ультразвуковых дальномеров, установленных на проводе, определяется изменение его геометрического положения. Увеличение провисания при постоянной температуре свидетельствует о налипании льда.

– Акустический (ультразвуковой) метод. Датчики излучают ультразвуковые волны и анализируют их отражение от поверхности провода. Изменение характеристик отраженного сигнала может указывать на наличие льда.

– Измерение емкости или импеданса. Обледенение изменяет электрическую емкость системы «провод – земля». Мониторинг этого параметра позволяет выявить образование льда.

3. Аналитические методы, основанные на моделях [13]:

– Использование метеорологических данных. Устройство, снабженное датчиками температуры, влажности, скорости ветра и давления, может рассчитывать вероятность обледенения на основе физико-математических моделей (например, модели Мяникова). Этот метод является прогнозным, но его точность зависит от достоверности модели и входных данных.

Таким образом, наиболее эффективным представляется комплексный подход, сочетающий несколько методов (например, тензометрию и акселерометрию) для повышения достоверности данных [14].

Цель исследования – разработка архитектуры и описание принципа действия автономного устройства мониторинга состояния ВЛ с акцентом на алгоритмы комплексного обнаружения и оценки гололедообразования.

Материалы и методы исследования

Для достижения поставленной цели в ходе исследования были использованы ло-

кационные датчики собственной конструкции, включающие следующие узлы:

- Блок генерации и приема зондирующих радиочастотных импульсов.
- Микроконтроллер для управления измерениями и первичной обработки данных.
- Систему синхронизации времени (GPS/ГЛОНАСС) для обеспечения точности локационных измерений.
- Набор дополнительных датчиков: температуры провода и окружающей среды, тока, акселерометра (для измерения виброускорения и угла провиса).
- Радиоканальный модуль (с дальностью связи до 4 км) для передачи данных.

В организации автономного электропитания используются система электростатического или электромагнитного питания для преобразования энергии электрического поля ЛЭП и резервная аккумуляторная батарея.

Результаты исследования и их обсуждение

Разработанная нами система мониторинга состояния ВЛ основана на таких физических принципах, как изменение диэлектрической проницаемости и волнового сопротивления. При гололедно-изморосевых отложениях на линиях электропередачи снижается скорость распространения электромагнитных волн, что вызывает увеличение диэлектрической проницаемости. Второй принцип основан на измерении волнового сопротивления линии электропередачи, изменяющегося при появлении дефектов, на которых происходит отражение сигнала [15].

Комплексная система мониторинга на основе радиочастотной локации предусматривает три варианта реализации. Базовый вариант использует существующие фильтры присоединения телеметрии. Альтернативное решение предполагает применение беспроводных приемо-передающих датчиков собственной конструкции, устанавливаемых в начале и конце контролируемого участка ВЛ. Для точной локализации зон интенсивного гололедообразования в составе системы могут использоваться промежуточные локационные датчики с синхронизацией времени по GPS-ГЛОНАСС.

Датчики монтируются на проводах ЛЭП вблизи траверс опор без использования специального инструмента и питаются от электростатических или электромагнитных преобразователей. Передача данных осуществляется по беспроводному каналу на диспетчерский пункт для последующей обработки и протоколирования. Локационные датчики включают в себя следующие компоненты: микроконтроллер, измери-

тельные модули, систему синхронизации GPS-ГЛОНАСС, блоки приема-передачи данных и генерации зондирующих импульсов, а также резервный источник питания. Радиолокационный метод реализован через синхронизированную генерацию импульсов и точное измерение времени их распространения. Система функционирует в условиях воздушных линий напряжением 110 кВ и выше при различных климатических воздействиях.

Перед зондированием производится настройка параметров генерируемого импульса. Амплитуда выбирается достаточной для регистрации отраженного сигнала с учетом его затухания в линии. Длительность импульса должна обеспечивать необходимую разрешающую способность для полосы пропускания контролируемой линии. Результаты мониторинга, полученные в ходе зондирования, верифицируются с помощью дополнительных датчиков, которые измеряют проходное сопротивление в местах контактных соединений с эталонными дефектами.

Схема подключения локационных датчиков представлена на рис. 1. Система локационного датчика с верификацией, установленная на эталонный дефект линии, включает в себя выключатель (В) и линейный разъединитель (ЛР), высокочастотный заградитель (ВЧЗ), фильтр присоединения (ФП) совместно с конденсатором связи (КС), подключенный к линии, локационный датчик (Локатор), измеряющий основные параметры линии, аппаратуру связи (АС) для передачи данных по радиоканалу на диспетчерский пункт, которая подключается с помощью высокочастотного кабеля (ВК).

Блок-схема комплексной системы мониторинга на основе датчиков контроля проходного сопротивления приведена на рис. 2. Датчик контролирует следующие параметры: падение напряжения на контактном соединении ΔU , температуру соединения T , ток в проводе $I_{\text{раб}}$, напряжение в линии $U_{\text{л}}$. Данные контроля и мониторинга передаются по радиоканалу для дальнейшей обработки и визуализации.

Конструкция датчика приведена на рис. 3. В корпусе датчика расположены датчик тока, датчик температуры, резервная батарея, основная плата управления с радиоканальным приемопередатчиком, система электростатического питания, система контроля падения напряжения на контактном соединении.

Установка датчика на провод осуществляется в непосредственной близости от монтажных и ремонтных контактных соединений проводов (рис. 4).

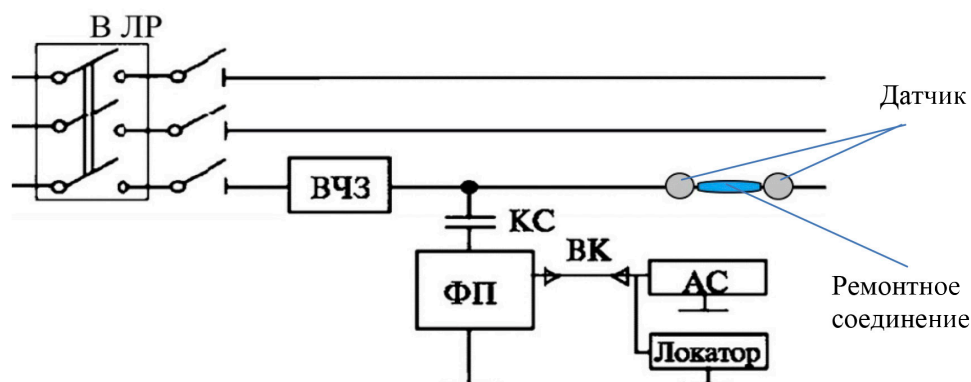


Рис. 1. Схема подключения локационных датчиков к линии
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования



Рис. 2. Блок-схема системы на основе датчиков сопротивления соединительных муфт
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

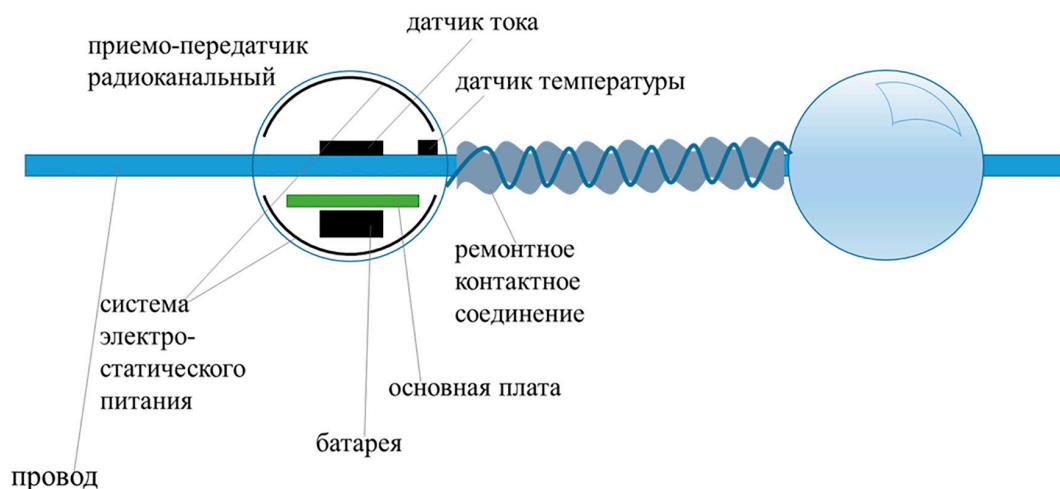


Рис. 3. Конструкция датчика
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Дальность связи по используемому радиоканалу достигает 4 км в прямой видимости. В сложной гористой местности для увеличения охвата и дальности связи возможна установка дополнительных ретрансляторов.

Разработанная комплексная система мониторинга позволяет получать в автоматическом режиме следующие параметры ВЛ:

– определение мест повреждения;

– среднюю толщину обледенения провода;

– температуру провода;

– температуру окружающей среды;

– угол провиса провода;

– действующее значение тока;

– относительную влажность воздуха;

– среднее квадратичное виброускорение (ветровое давление).

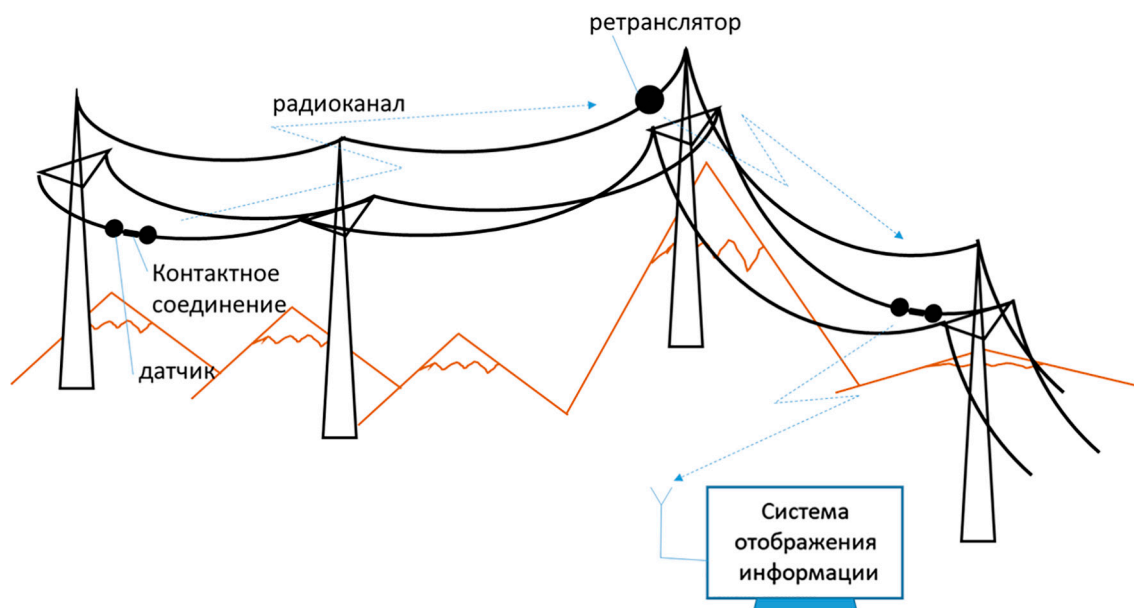


Рис. 4. Схематичное изображение вариантов установки датчика на линии
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Заключение

Разработана комплексная система мониторинга воздушных ЛЭП, основанная на методе радиочастотной локации. Преимуществом системы является способность одновременно решать несколько задач: определять толщину обледенения, локализовать повреждения и контролировать критические параметры (температуру провода, угол провиса, ток нагрузки). Для верификации данных предложено дополнительное решение на основе датчиков контроля переходного сопротивления контактных соединений. Внедрение системы позволяет перейти от планово-предупредительного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию, что повышает экономическую эффективность и надежность энергоснабжения в сложных климатических условиях.

Список литературы

1. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Абдуллаева С.А., Назаров А.А. Методы и алгоритмы оценки оперативной надежности воздушных ЛЭП электроэнергетических систем // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2022. № 6. С. 68–80. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49515016> (дата обращения: 16.09.2025). DOI: 10.31857/S0002331022040045.
2. Минуллин Р.Г. Локационный мониторинг аномальных гололедообразований на линиях электропередачи как предшественников возможных аварий // Электрические станции. 2025. № 8 (1129). С. 10–21. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82812293> (дата обращения: 16.09.2025). DOI: 10.71841/EP.elst.2025.1129.8.02.
3. Дементьев С.С., Кутейников П.Д. Интеллектуальная система предотвращения гололедных аварий на воздушных линиях электропередачи сверхвысокого напряжения // Энергобезопасность и энергосбережение. 2022. № 2. С. 5–11.

URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48435698> (дата обращения: 16.09.2025). DOI: 10.18635/2071-2219-2022-2-5-11.

4. Минкин А.С. Мониторинг состояния воздушных линий электропередачи локационным зондированием как средство предотвращения аварий и экономических потерь в электрических сетях // Экономика и предпринимательство. 2025. № 4 (177). С. 1251–1254. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80640535> (дата обращения: 16.09.2025). DOI: 10.34925/EIP.2025.177.4.218.

5. Рец В.В., Никифоров А.И., Ярош А.С. Технологии мониторинга воздушных линий электропередачи // КИП и автоматика: обслуживание и ремонт. 2022. № 2. С. 17–21. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48066717> (дата обращения: 16.09.2025).

6. Яблоков А.А., Иванов И.Е., Тычкин А.Р., Титов В.А., Шарыгин Д.С. Формирование группового алгоритма дистанционного определения места повреждения воздушной ЛЭП с использованием методов машинного обучения // Электричество. 2025. № 9. С. 51–65. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82834821> (дата обращения: 16.09.2025). DOI: 10.24160/0013-5380-2025-9-51-65.

7. Акуличев В.О., Бредихин А.С., Мурашев Б.А., Середкин О.А. Разработка системы непрерывного мониторинга воздушных линий электропередачи в автоматическом режиме // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 5 (68). С. 94–97. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46655725> (дата обращения: 16.09.2025).

8. Листюхин В.А., Печерская Е.А. Система контроля параметров воздушных линий электропередачи в режиме реального времени // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2021. № 4 (40). С. 90–95. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48156056> (дата обращения: 16.09.2025). DOI: 10.21685/2227-8486-2021-4-8.

9. Кобенко В.Ю., Андреева Е.Г., Науменко А.П., Казымов И.М., Компанец Б.С. Автоматизированное техническое диагностирование состояния токоведущих частей на воздушных линиях электропередачи // Автоматизация в промышленности. 2025. № 1. С. 5–9. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80068208> (дата обращения: 16.09.2025).

10. Минуллин Р.Г., Ахметова И.Г., Касимов В.А., Пинунов А.А. Локационный мониторинг воздушных линий электропередачи с обнаружением гололедных отложений

и визуализацией результатов зондирования // Электрические станции. 2022. № 12 (1097). С. 10–19. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49987545> (дата обращения: 16.09.2025).

11. Волоховский В.Ю., Воронцов А.Н., Сухоруков Д.В., Рудяк А.Р. Магнитная дефектоскопия – эффективный инструмент мониторинга технического состояния проводов и грозотросов воздушных линий электропередачи // Электрические станции. 2019. № 12 (1061). С. 28–37. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41543762> (дата обращения: 16.09.2025).

12. Ivanov D., Golenishev-Kutuzov A., Galieva T. Non-Contact Methods for High-Voltage Insulator Diagnosis // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2021. P. 614–619. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/355242361_Non-Contact_Methods_for_High-Voltage_Insulator_Diagnosis (дата обращения: 16.09.2025). DOI: 10.1109/Ural-Con52005.2021.9559473.

13. Листюхин В.А., Печерская Е.А., Артамонов Д.В., Зинченко Т.О., Анисимова А.А. Повышение надежности воздушных линий электропередачи посредством внедре-

ния информационно-измерительных систем контроля их параметров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3 (41). С. 62–68. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49581563> (дата обращения: 16.09.2025). DOI: 10.21685/2307-5538-2022-3-7.

14. Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Потапов А.А., Кротов В.И. Использование бесконтактных методов диагностики высоких электрических полей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 4. С. 123–133. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41450791> (дата обращения: 16.09.2025). DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-4-123-133.

15. Голенищев-Кутузов А.В., Семенников А.В., Иванов Д.А. Комплексная система мониторинга состояния высоковольтных линий электропередачи // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции (Чебоксары, 06–08 июня 2024 г.). Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2024. С. 219–220. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68587606> (дата обращения: 16.09.2025).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.