

Научная статья
УДК 551.501.83
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.008

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА УРОВНЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЛНИИ НА ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Антон Владимирович Бурцев

*Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра
Российской академии наук, Апатиты, Россия, a.burtsev@ksc.ru*

Аннотация

Представлены примеры практического применения метода расчета уровня воздействия молний на воздушные линии электропередачи. Метод основан на расчете расстояний между координатами молний и опор воздушных линий. Апробация метода проведена на воздушных линиях Мурманской обл. Предложенный метод представляет интерес для электросетевых компаний, поскольку позволяет выявить наиболее уязвимые для молний участки линий электропередачи.

Ключевые слова:

молниезащита, грозоуплотнение, воздушная линия электропередачи, Арктическая зона

Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

Для цитирования:

Бурцев А. В. Практическое применение метода расчета уровня воздействия молнии на воздушные линии электропередачи // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 6. С. 66–72. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.008.

Original article

PRACTICAL APPLICATION OF THE METHOD FOR CALCULATING LIGHTNING IMPACT LEVELS ON OVERHEAD POWER LINES

Anton V. Burtsev

*Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia, a.burtsev@ksc.ru*

Abstract

The article presents examples of the practical application of the method for calculating the level of lightning effects on overhead power lines. The method is based on calculation of distances between coordinates of lightning and overhead line supports. The method was tested on overhead lines of Murmansk region. The proposed method is of interest for power grid companies, as it allows identifying the most vulnerable sections of power lines to lightning.

Keywords:

lightning protection, lightning detection, overhead power lines, Arctic zone

Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

For citation:

Burtsev A. V. Practical application of the method for calculating lightning impact levels on overhead power lines // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 6. P. 66–72. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.008.

Введение

Стабильность электроснабжения потребителей требует повышения устойчивости линий электропередачи (ЛЭП) к воздействию грозовых перенапряжений. В случае повреждения, а тем более отключения воздушной линии (ВЛ) вследствие удара молнией в ее элементы потребуются проведение целого комплекса мероприятий, связанных с поиском и устранением повреждений. При обрыве фазного провода важно быстро и точно определить место повреждения. Для этого успешно применяются специальные устройства [1–3], которые размещают на подстанциях. Если же полное

отключение линии не произошло, то успешное срабатывание автоматического повторного включения (АПВ) не исключает возникновения каких-либо повреждений на элементах линии вследствие протекания большого тока молнии и сопровождающего тока короткого замыкания. Помимо арматуры и тросов, повреждения часто получают изоляторы ВЛ. Это может быть трещина, потеря части или полное разрушение изолятора. Такие повреждения обычно обнаруживаются при осмотре линии с использованием оптических методов контроля с помощью электронно-оптических дефектоскопов ультрафиолетового диапазона [4–5], тепловизоров и камер высокого разрешения [4]. Частота осмотра ЛЭП регламентируется нормативным документом ПТЭЭП [6] и «должна выполняться не реже 1 раза в год», а внеочередные осмотры должны проводиться «...после отключения ВЛ релейной защитой и неуспешного автоматического повторного включения, а после успешного повторного включения — по необходимости». При наиболее удачных обстоятельствах ВЛ может выдержать за сезон множество ударов молний, которые не приведут к отключению, либо работа АПВ будет успешной. Таким образом, «необходимость» так и не наступит до периодического осмотра, а вероятные повреждения накопятся и будут развиваться. Поэтому к моменту наступления периодического или внеочередного осмотра ЛЭП было бы полезно иметь план линии с указанием ее наиболее грозопоражаемых участков.

Материалы и методы

За основу исследования взят метод расчета уровня воздействия молнии на воздушные линии электропередачи, предложенный ранее авторами [7]. Метод был применен к воздушным линиям Мурманской обл. В этом регионе насчитывается более 260 линий с классами напряжения 35, 110, 150 и 330 кВ. Регион является частью Арктической зоны России и имеет умеренно холодный климат с очень низкой грозовой активностью на севере и низкой грозовой активностью на юге.

В предложенном методе используется информация о координатах ударов молний в землю. В настоящее время функционируют региональные и глобальные системы грозопеленгации [8–15], в том числе коммерческие (ГПС Алвес, Ведея-МР, WWLLN, NLDN (Vaisala), Euclid, Boltek, GLN (TOA Systems) и др.) и любительские (Blitzortung). К коммерческим зарубежным и российским системам грозопеленгации авторы доступа не имеют. Грозопеленгационная система Росгидромета, к сожалению, не позволяет свободно оперировать ее данными, поэтому анализ молний в Мурманской обл. проводился с помощью сети обнаружения молний Blitzortung. Мурманская обл. была выбрана из-за ее расположения в зоне надежного обнаружения молний сетью Blitzortung, в отличие от других регионов России. Сеть Blitzortung функционирует с 2008 г., но достоверные данные по Мурманской обл. доступны только с 2015 г., что заметно ограничивает возможности исследования гроз в этом регионе с использованием данной сети. Поэтому в данной работе будут использованы данные о молниях за период с 2016 по 2022 гг.

Информация о ЛЭП была получена от сетевых компаний Мурманской обл. Набор данных содержит координаты 266 воздушных линий и их отпайки различных классов напряжения. Информация является служебной, по этой причине в работе некоторые данные из набора будут представлены в обезличенном виде и без точной привязки к местности, что, однако, не помешало нам в полной мере продемонстрировать опыт практического применения метода расчета уровня воздействия молнии на воздушные линии электропередачи.

Результаты работы являются частью веб-проекта по анализу аварийности ЛЭП вследствие ударов молний и информированию о попадании молний в линии электропередачи в режиме реального времени. Проект содержит базу данных (БД) воздушных линий, электрических станций и подстанций Мурманской обл., а также подстанций других областей Северо-Западного федерального округа. Информация о каждом зарегистрированном разряде поступает с серверов сети грозопеленгации Blitzortung. После записи информации о разряде в БД выполняется вычисление возможного радиуса зоны действия разряда на основе параметра максимальной ошибки определения координат этого разряда. Последующий анализ каждого разряда определяет географические координаты опор ЛЭП, которые оказались в зоне действия разряда. В случае обнаружения таких опор в БД вносится запись о произошедшем событии, в ней указываются все попавшие под воздействие молнии объекты. После этого владельцу линии или подстанции направляется информационное сообщение о событии.

Проект построен на стеке технологий Go, MySQL, JS, R с использованием картографических и топографических сервисов.

Результаты

Одной из поставленных задач было рассчитать и подготовить маршрутный план воздушной линии, где будут явно показаны участки, чаще других попадающие в зону действия молний. Далее представлен алгоритм формирования такого плана ЛЭП.

В работе алгоритма задействована математическая функция оценки интенсивности воздействия молнии на опоры ЛЭП, подробно описанная в работе [7]. Под интенсивностью воздействия молнии на опору принимается значение, равное единице при прямом попадании в опору и уменьшающееся до нуля по мере приближения молнии к границе буферной зоны ЛЭП. Исходными данными для функции являются координаты опор ЛЭП, координаты зарегистрированных разрядов и их радиус поражения. За выбранный период формируется матрица расстояний D между всеми разрядами и всеми опорами ЛЭП. Полученная матрица содержит количество строк, соответствующее количеству молний, а количество столбцов соответствует количеству опор.

Следующий шаг — вычисление матрицы разности E между размером буфера и матрицей расстояний. Далее все элементы матрицы E , которые меньше нуля, принимаются как не оказывающие влияния на опору ЛЭП, эти значения приравниваются к нулю. Затем происходит вычисление искомого вектора интенсивности e путем суммирования строк матрицы E , где строки матрицы E делятся на размер буфера b . Длина этого вектора равна количеству опор ЛЭП.

Для заранее заданного радиуса буферной зоны линии вычисляется вектор интенсивности $e_{ВЛ}$. Исходя из максимального значения элемента в полученном векторе, рассчитывается будущая цветовая палитра для отображения ВЛ на карте. ЛЭП разбивается по пролетам на отрезки, цвет которых будет соответствовать уровню интенсивности из вектора $e_{ВЛ}$ для предшествующей пролету опоры. Далее для нового слоя рассчитывается полигон, визуализирующий буферную зону ВЛ. Отдельным слоем записываются окружности, описывающие зоны разрядов молний. Все полученные слои накладываются на карту местности. Результат работы алгоритма, реализованный в веб-проекте, показан на рис. 1.

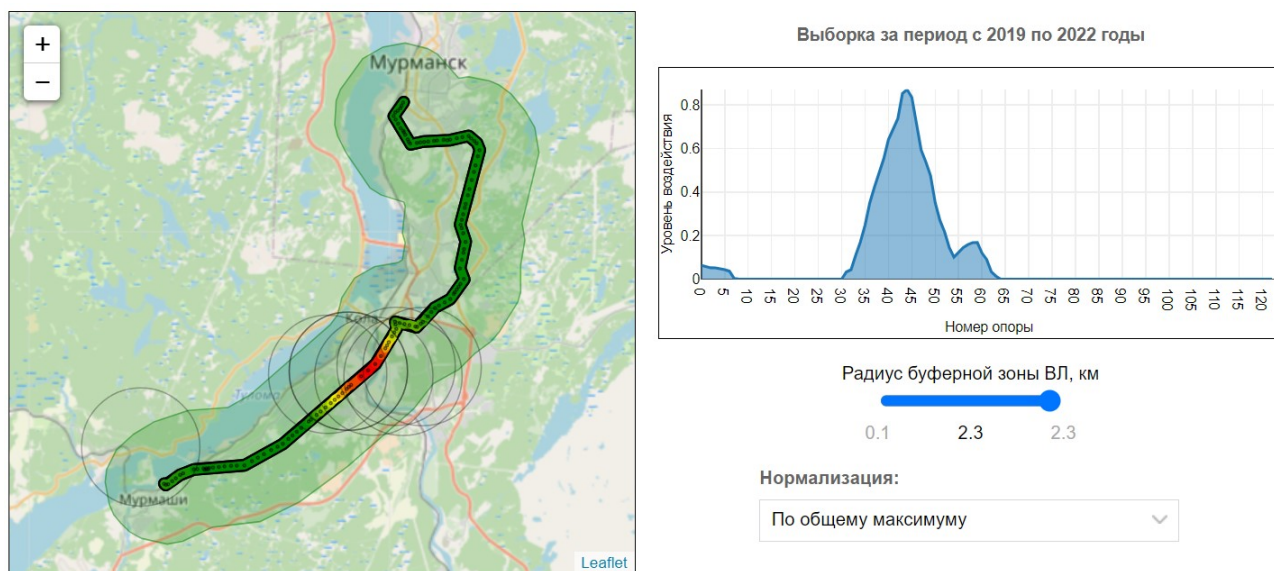


Рис. 1. Работа алгоритма на примере одной из ВЛ, расположенной на севере Мурманской обл.

Fig. 1. Operation of the algorithm using one of the overhead lines in the north of the Murmansk region as an example

Слева на рисунке план ВЛ, где видны наиболее поражаемые участки. Контур вокруг ВЛ — буферная зона линии, окружности — разряды молний, попавшие в заданную буферную зону ВЛ.

Справа показано графическое представление вектора интенсивности e для заданного радиуса буферной зоны воздушной линии.

Обсуждение

С помощью представленного алгоритма был проведен анализ грозопоражаемости всех воздушных линий Мурманской обл., занесенных в БД. Анализ выявил несколько интересных результатов. Например, часть воздушных линий, имеющих протяженность около 25–50 км, из года в год получает разряды приблизительно в одни и те же участки, в то время как в остальную часть ВЛ молнии не попадают вообще. Одна из таких ЛЭП, расположенная в центральной части Мурманской обл., показана на рис. 2.

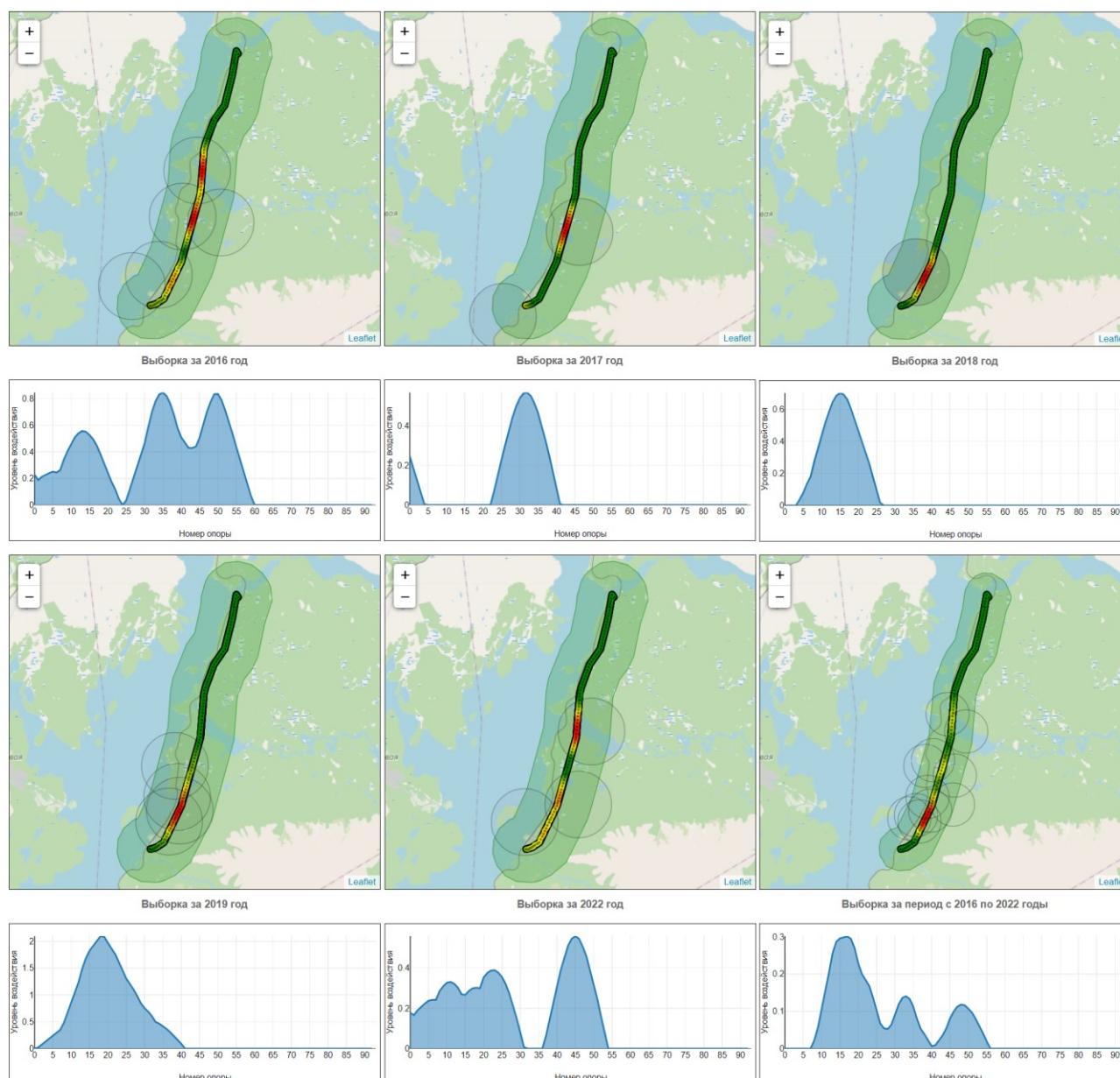


Рис. 2. Ежегодная грозопоражаемость ЛЭП в центральной части Мурманской обл.
Fig. 2. Annual lightning exposure of transmission lines in the central part of the Murmansk Oblast

Значение радиуса буферной зоны в примере составляет 2,3 км, за исключением выборки 2016–2022 гг., где радиус буферной зоны уменьшен до 1,2 км, чтобы поражаемые участки ЛЭП были более явные. В выборке отсутствуют 2020 и 2021 гг., так как в этот период разряды молний в ЛЭП не попадали.

Результаты регистрации молний в 2016 г. показали, что исследуемая ЛЭП получила пять ударов молний, в результате чего выявлены три участка, за которыми будем дальше вести наблюдение. Это первый участок с 10-й по 15-ю опоры, второй — с 32-й по 37-ю и третий — с 48-й по 53-ю опоры.

В грозовом сезоне 2017 г. в зону ВЛ попали два разряда, один из них оказался чуть в стороне от начала ВЛ и не внес сильных изменений в общий график интенсивности, а вот второй снова попал во второй участок с опорами с 32-й по 37-ю.

Грозовой сезон 2018 г. отметился для ВЛ всего одним разрядом, который попал в ранее упомянутый первый участок с опорами 10–20.

В 2019 г. в ЛЭП попали четыре разряда, три из которых попали в первый участок и чуть расширили его с 10-й по 25-ю опоры, а четвертый разряд попал во второй участок.

В 2020–2021 гг. в ЛЭП разряды не попали, а в 2022 г. было зарегистрировано три попадания, и опять — в наблюдаемые участки. Один разряд попал в третий участок в районе 45-й опоры, два других попали в первый участок.

Полная выборка разрядов с 2016 по 2022 гг. более явно показала три наиболее поражаемых участка ВЛ, в связи с чем имеет смысл взять их на контроль и провести исследования на предмет повреждений элементов ВЛ, которые, скорее всего, имеют место быть. Это участки с 12-й по 26-ю опоры, с 32-й по 37-ю и с 45-й по 58-ю опоры.

Такие «аномальные» участки на линии могут быть связаны с характером местности, качеством заземления опор и проводимостью грунта. Необходимо провести дополнительные исследования, чтобы выяснить причину такой избирательности молниевых разрядов.

Заключение

Метод оценки уровня воздействия молнии на воздушные линии электропередачи успешно применяется в веб-проекте по анализу аварийности ЛЭП вследствие ударов молний. Проводится анализ воздушных линий на выявление поражаемых участков, что может представлять интерес для предприятий, эксплуатирующих различные ВЛ. Данный метод может быть применен к любой воздушной линии, если имеется набор данных о координатах молниевых разрядов в районе прохождения воздушной линии.

Список источников

1. Куликов А. Л., Ананьев В. В. Адаптивное волновое определение места повреждения линии электропередач // Вестник ИГЭУ. 2014. № 4. С. 21–25.
2. Моделирование волновых процессов на линиях электропередачи для повышения точности определения места повреждения / А. Л. Куликов [и др.]. // Электрические станции. 2015. № 7. С. 45–53.
3. Куликов А. Л., Лукичева И. А. Определение места повреждения линии электропередачи по мгновенным значениям осциллограмм аварийных событий // Вестник ИГЭУ. 2016. № 5. С. 16–21.
4. Мониторинг состояния воздушных линий электропередачи с использованием беспилотного летательного аппарата / В. П. Дикой [и др.] // Энергия единой сети. 2014. № 2 (13). С. 16–25. EDN: SIMDAN.
5. Ильина Е., Меркулов И. Опыт проведения ультрафиолетового контроля изоляции ВЛ в ПАО «МОЭСК» // Электроэнергия. Передача и распределение. 2016. № S1 (1). С. 38–41. EDN: YVKCHV.
6. Об утверждении правил технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии: приказ Министерства энергетики РФ от 12.08.2022 № 811 // ИК «Кодекс»: сайт. URL: <https://docs.cntd.ru/document/351621634> (дата обращения: 02.05.2023).

7. Burtsev A. V., Selivanov V. N. Method for Calculating of Lightning Impact Level on Overhead Transmission Line // Appl. Sci. 2021. Vol. 11. P. 6609. <https://doi.org/10.3390/app11146609>.
8. Исследования в области атмосферного электричества и пеленгации гроз / В. Н. Морозов [и др.] // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2009. № 560. С. 213–242.
9. Москобенко В. М., Знаменщиков Б. П., Золотарев С. В. Применение системы грозопеленгации «Верей-МР» в интересах электроэнергетики России // Новое в российской электроэнергетике. 2012. № 2. С. 15–23.
10. Dowden R. L., Brundell J. B., Rodger C. J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2002. Vol. 64, No. 7. P. 817–830.
11. National Lightning Detection Network NLDN. URL: <https://www.vaisala.com/en/products/data-subscriptions-and-reports/data-sets/nldn/> (дата обращения: 02.05.2023).
12. Diendorfer G., Pedebay S., Poman, D. R. The European lightning location system EUCLID. Part 1: Performance analysis and validation / W. Schulz [et al.] // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2016. Vol. 16. P. 595–605.
13. Boltek. Lightning Detection Systems. URL: <https://www.boltek.com/> (дата обращения: 02.05.2023).
14. Global Lightning Network — TOA Systems. URL: <http://toasystems.com/our-network/global-lightning/> (дата обращения: 02.05.2023).
15. Wanke E., Andersen R., Volgnandt T. World-Wide Low-Cost Community-Based Time-of-Arrival Lightning Detection and Lightning Location Network. URL: <https://www.blitzortung.org> (дата обращения: 02.05.2023).

References

1. Kulikov A. L., Anan'ev V. V. Adaptivnoe volnovoe opredelenie mesta povrezhdeniya linii elektroperedach [Adaptive wave detection of transmission line faults]. *Vestnik IGEU* [Vestnik IGEU], 2014, No. 4, pp. 21–25. (In Russ.).
2. Kulikov A. L., Lachugin V. F., Anan'ev V. V., Vukolov V. Yu., Platonov P. S. Modelirovanie volnovykh processov na liniyah elektroperedachi dlya povysheniya tochnosti opredeleniya mesta povrezhdeniya [Modelling of wave processes on power lines to improve fault location accuracy]. *Elektricheskie stancii* [Electrical Power Stations], 2015, No. 7, pp. 45–53. (In Russ.).
3. Kulikov A. L., Lukicheva I. A. Opredelenie mesta povrezhdeniya linii elektroperedachi po mgnovennym znacheniyam oscillogramm avariynih sobytij [Determining the fault location of a transmission line from the instantaneous values of fault event waveforms]. *Vestnik IGEU* [Vestnik IGEU], 2016, No. 5, pp. 16–21. (In Russ.).
4. Dikoj V. P., Levandovskij A. A., Arbuzov R. S., Ovsyannikov A. G., Starcev V. V. Monitoring sostoyaniya vozdukhnykh linii elektroperedachi s ispol'zovaniem bespilotnogo letatel'nogo apparata [Monitoring of overhead transmission lines using an unmanned aerial vehicle]. *Energiya edinoj seti* [Unified Grid Energy], 2014, No. 2 (13), pp. 16–25. (In Russ.). EDN: SIMDAN.
5. Il'ina E., Merkulov I. Opyt provedeniya ul'traioletovogo kontrolya izolyacii VL v PAO “MOESK” [Experience from MOESK in carrying out ultraviolet monitoring of overhead line insulation]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* [Electricity. Transmission and distribution], 2016, No. S1 (1), pp. 38–41. (In Russ.). EDN: YVKCHB.
6. *Prikaz Ministerstvay energetiki Rossijskoj Federacii ot 12 avgusta 2022 g. № 811 “Ob utverzhdenii pravil tehnikeskoy ekspluatatsii elektroustanovok potrebitelej elektricheskoy energii”* [About the approval of the rules of technical operation of electrical installations of consumers of electric energy]. (In Russ.). Available at: <https://docs.cntd.ru/document/351621634> (accessed 02.05.2023).
7. Burtsev A. V., Selivanov V. N. Method for Calculating of Lightning Impact Level on Overhead Transmission Line. Appl. Sci. 2021, Vol. 11., pp. 6609. <https://doi.org/10.3390/app11146609>.
8. Morozov B. N., Popov I. B., Snegurov A. V., Snegurov V. S., Sokolenko L. G., Shvare Ya. M. Issledovaniya v oblasti atmosfernogo elektrichestva i pelengacii groz [Studies in atmospheric electricity

- and direction finding of thunderstorms]. *Trudy Glavnoj geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voejkova* [Proceedings of the A.I. Voeikov Main Geophysical Observatory], 2009, No. 560, pp. 213–242. (In Russ.).
9. Moskovento V. M., Znamenshchikov B. P., Zolotarev S. V. Primenenie sistemy grozopelengacii “Vereya-MR” v interesah elektroenergetiki Rossii [Application of the Vereya-MR lightning guidance system in the interests of the Russian electricity sector]. *Novoe v rossijskoj elektroenergetike* [New in the Russian electricity sector], 2012, No. 2, pp. 15–23. (In Russ.).
 10. Dowden R. L., Brundell J. B., Rodger C. J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002, Vol. 64, No. 7, pp. 817–830.
 11. National Lightning Detection Network NLDN. Available at: <https://www.vaisala.com/en/products/data-subscriptions-and-reports/data-sets/nldn/> (accessed 02.05.2023).
 12. Schulz W., Diendorfer G., Pedebay S., Poelman D. R. The European lightning location system EUCLID. Part 1: Performance analysis and validation, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2016, Vol. 16 pp. 595–605.
 13. Boltek. Lightning Detection Systems. Available at: <https://www.boltek.com/> (accessed 02.05.2023).
 14. Global Lightning Network — TOA Systems. Available at: <http://toasystems.com/our-network/global-lightning/> (accessed 02.05.2023).
 15. Wanke E., Andersen R., Volgnandt T. World-Wide Low-Cost Community-Based Time-of-Arrival Lightning Detection and Lightning Location Network, 2016. Available at: <https://www.blitzortung.org> (accessed 02.05.2023).

Информация об авторе

А. В. Бурцев — научный сотрудник.

Information about the author

A. V. Burtsev — Researcher.

Статья поступила в редакцию 04.05.2023; одобрена после рецензирования 15.05.2023; принята к публикации 29.05.2023.
The article was submitted 04.05.2023; approved after reviewing 15.05.2023; accepted for publication 29.05.2023.