

Современные системы локации молний: глобальные и региональные аспекты

Ф.Г. Сарафанов^{1,2)}, М.В. Шаталина^{1,2)}, Ю.В. Шлюгаев¹⁾, Е.А. Мареев¹⁾*

¹⁾ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

²⁾ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Россия, 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

* Адрес для переписки: aries@ipfran.ru

Реферат. Мониторинг грозовой активности и интерпретация натуральных измерений с учётом региональных особенностей необходимы для корректной параметризации электрической активности в климатических моделях и моделях прогноза погоды высокого разрешения. В частности, системы определения местоположения молниевых разрядов являются одним из важнейших инструментов, используемых при анализе экстремальных метеоявлений, обладающих значительной электрической активностью. В настоящее время широко используются различные методы натуральных наблюдений гроз: спутниковая оптическая локация разрядов, наземная грозопеленгация.

В данной статье представлен анализ работы региональных грозопеленгационных систем и регистрации отдельных интенсивных грозовых событий на примере результатов наблюдений многопунктовой грозопеленгационной системы (ГПС) NNLDN (Nizhny Novgorod Lightning Detection Network), разработанной в ИПФ РАН и регистрирующей электромагнитное излучение молний ближних и дальних гроз в диапазонах 10-100 кГц.

Основное внимание в исследовании уделено анализу результатов наблюдений молниевой активности системой NNLDN с региональным покрытием (100-300 км) и системой WWLLN (World Wide Lightning Location Network) с глобальным покрытием. Представлено качественное совпадение карт грозоопасности за 2022 год при большем количестве молниевых разрядов, регистрируемых ГПС NNLDN. Изучена многолетняя статистика гроз в исследуемом регионе за 2015-2022 гг. Выявлены основные региональные особенности грозовой активности в пределах региона, в частности, определены направления прихода гроз и местоположения наиболее и наименее грозоопасных районов Нижегородской области.

Ключевые слова. Грозопеленгация, мониторинг, грозовая активность.

Modern lightning location networks: global and regional aspects

F.G. Sarafanov^{1,2)}, M.V. Shatalina^{1,2)}, Yu.V. Shlyugaev¹⁾, E.A. Mareev¹⁾*

¹⁾ A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics,
46, Ulyanova str., 603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation

²⁾ Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
23, Gagarin Ave., 603022, Nizhny Novgorod, Russian Federation

* Correspondence address: aries@ipfran.ru

Abstract. Monitoring storm activity and interpreting field measurements with consideration of regional characteristics are essential for accurate parameterization of electrical activity in climate models and high-resolution weather forecasting models. Particularly, lightning location networks are one of the most crucial tools used in analyzing extreme meteorological events characterized by significant electrical activity. Currently, various methods of natural storm observations are widely used: satellite optical mapping of discharges and ground-based storm tracking.

This article presents an analysis of the performance of regional lightning detection networks and the recording of individual intense storm events illustrated by the observation results of the multi-point lightning detection network NNLDN (Nizhny Novgorod Lightning Detection Network), developed at the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences. The NNLDN registers electromagnetic emissions from nearby and distant storms in the 10-100 kHz range.

The study primarily focuses on analysis within the Nizhny Novgorod region of the NNLDN observations with regional coverage (100-300 km) and the WWLLN (World Wide Lightning Location Network) with global coverage. A qualitative match of thunderstorm risk maps for 2022 is presented, with a greater number of lightning discharges registered by NNLDN. Long-term storm statistics in the region for 2015-2022 were examined. The main regional characteristics of storm activity within the region were identified, in particular, the directions of storm arrival and the locations of the most and least thunderstorm-prone areas in the Nizhny Novgorod region.

Keywords. Lightning detection, monitoring, thunderstorm activity.

Введение

В настоящее время существенно возрос интерес к изучению грозовой активности в контексте как задач климатологии, так и задач анализа и прогноза экстремальных метеоявлений. Широкий спектр излучений, сопутствующих грозовой активности и молниевым разрядам, открывает большие возможности по применению экспериментальных методик в решении таких задач. Мониторинг грозовой активности и интерпретация результатов натурных измерений необходимы для корректной параметризации электрической активности в климатических моделях и моделях прогноза погоды высокого разрешения (Kang et al., 2022). В свою очередь, системы определения местоположения молниевых разрядов являются одним из важнейших инструментов, используемых при анализе экстремальных метеоявлений, обладающих значительной электрической активностью (Dementyeva et al., 2023).

В современной геофизике активно используются различные системы натуральных наблюдений гроз. Преимущественно используются либо результаты реанализа оптических спутниковых наблюдений, реализованных с помощью инструментов LIS (Lightning Imaging Sensor) на спутнике TRMM и на МКС (Zhang et al., 2023), либо результаты наблюдений наземных систем грозопеленгации (Снегуров, Снегуров, 2019; Cummins, Murphy, 2009). К глобальным системам наземной грозопеленгации относятся такие системы, как WWLLN (Rodger, 2009) и GLD360 (Naccarato et al., 2010; Rudlosky et al., 2017), работающие в СДВ-диапазоне (3-30 КГц). Пункты приема сигналов в таких сетях расположены на достаточно большом расстоянии и обнаруживают, как правило, только наиболее интенсивные молниевые разряды типа «облако-земля».

Анализ данных глобальных систем грозопеленгации на больших интервалах измерений в отдельных регионах демонстрирует вариабельность молниевой активности, связанную с климатическими изменениями. Так, в последние годы представлены экспериментальные свидетельства увеличения количества грозовых событий в высоких широтах. В частности, в ежегодных отчетах Vaisala (Vaisala, 2021) отмечается значительный рост количества молний в арктическом регионе. В работе (Holzworth et al., 2021) проанализирована корреляция грозовой активности выше 65° с.ш., по данным ГПС WWLLN с температурными аномалиями, и продемонстрировано непосредственное влияние климатических изменений на количество молниевых разрядов. В (Dementyeva, 2023) исследованы тренды грозовой активности в отдельном домене Верхне-Волжского региона на основе данных ГПС WWLLN за 2016-2021 гг.

На рис. 1 приведены количества разрядов молний за неделю, а также суммарные количества разрядов за соответствующие сезоны. По сравнению с исследованием (Dementyeva, 2023), в котором приведена аналогичная статистика в пределах расчётного домена, здесь учтены разряды на территории в пределах административных границ Нижегородской области.

Одним из условий формирования развитых электрических структур в облаке, напрямую связанных с молниевой активностью, является наличие глубокой конвекции, которая, в свою очередь, существенно зависит от вертикального профиля температуры воздуха (Saunders, 2008). Существенное уменьшение количества молний в 2017 году, наблюдаемое на рис. 1, связано с аномально холодным летом (Шаталина и др., 2021).

Дальнейший анализ молниевой активности на масштабе климатических изменений требует более детальной информации о разрядах: энергии, пространственном типе разряда, полярности. В частности, это нужно для верификации гипотезы о том, что современная климатическая изменчивость должна привести к уменьшению количества разрядов одновременно с ростом энергии разрядов (Price, 2013). Такая информация может быть получена более специализированными грозопеленгационными сетями, как правило, работающими на региональном масштабе. Существует значительное число сетей, области покрытия которых имеют характерный размер от сотен до тысяч километров. К последним относятся национальные системы, например, американская

ГПС ENLDN, работающая в широкой полосе частот от 1 Гц до 12 МГц (Rakov, 2013), индийская ГПС ILDN (Unnikrishnan et al., 2021) и т.д.

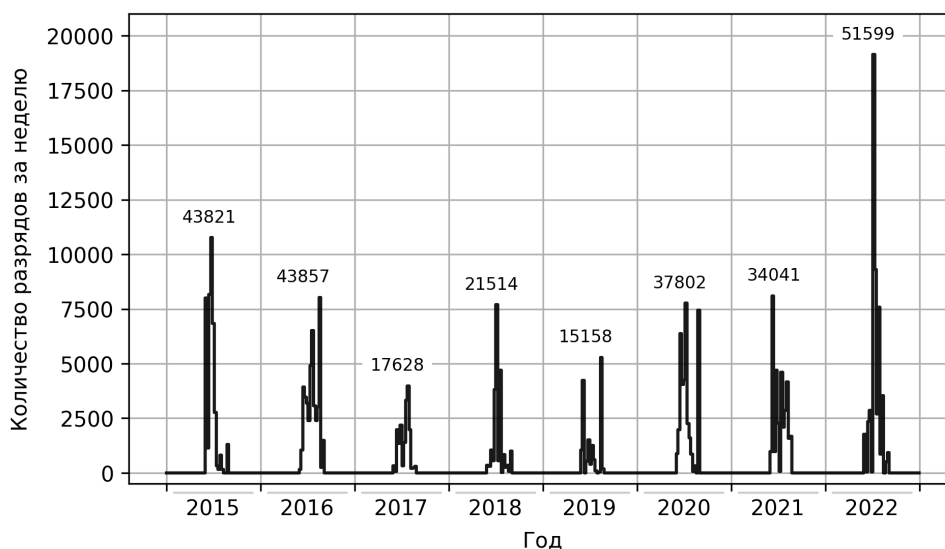


Рисунок 1. Межгодовая изменчивость молниевой активности в Нижегородском регионе
Сплошной кривой приведены количества разрядов за неделю, подписи над максимумами обозначают количество разрядов за соответствующий год

Figure 1. Interannual variability of lightning activity in the Nizhny Novgorod region
The solid curve shows the number of discharges per week; the captions above the maximums indicate the number of discharges for the corresponding year

В настоящее время на территории России также развернуто несколько грозопеленгационных систем, отличающихся параметрами и назначением: ГПС “Алвес” (ALWES), ГПС в НИЦ «Планета» и ВГИ (Горлова, 2020). На территории Северного Кавказа с 2008 г. используется грозорегистратор LS8000 фирмы “Vaisala”, который обеспечивает определение координат, полярности, типа (облако-облако или облако-земля), токов и других характеристик молниевых разрядов в региональном масштабе (Аджиев и др., 2013). До 2019 года почти на всей территории России работала большебазовая отечественная система грозолокации “Веря-МР” (Московенко и др., 2012; Ткачев и др., 2021). В (Ткачев и др., 2021), в частности, показано, что молниевая активность в Байкальском районе меньше, чем на окружающих территориях. В (Tarabukina, Kozlov, 2020) исследована динамика продолжительности грозового сезона на территории Якутии в 2009-2019 гг. в зависимости от климатических зон, продемонстрировано, что суммарное годовое количество молний в Якутии имело незначительную положительную динамику.

С 2022 года на территории Нижегородской области ведутся наблюдения за молниевой активностью с помощью новой региональной ГПС NNLDN. Результаты наблюдений и их анализ представлены в данном исследовании.

Методы и материалы

Работа ГПС NNLDN основана на регистрации электромагнитного излучения молний ближних и дальних гроз в СДВ и ДВ диапазонах (10-100 кГц) и позволяет осуществлять регистрацию молниевой активности на региональном масштабе (100-300 км) (см., например, Кононов и др., 2013). Преимущество такого подхода продемонстрировано, например, в работе (Снегуров, Снегуров, 2019), где, в частности, показано, что региональные ГПС с малыми базами обладают более высокими точностными и вероятностными характеристиками по сравнению с большебазовыми.

В настоящее время в эксплуатации находятся 6 автономных станций ГПС NNLDN, расположенных на расстоянии от 50 до 200 километров друг от друга. На рис. 2 представлена карта станций ГПС NNLDN по состоянию на 2023 г. Каждая станция оборудована магнитной и электрической антенной, приемником спутниковой системы навигации (GPS/GLONASS), а также 16-битным аналого-цифровым преобразователем и триггером прихода сигнала. Оборудование станции позволяет регистрировать время прихода излучения молниевых разряда с точностью до 125 нс. Результаты наблюдений передаются через сеть Интернет в режиме квазиреального времени на сервер хранения и обработки данных. Сервер осуществляет расчёт местоположения и характеристик молниевых разрядов совмещённым с магнитно-пеленгационным разностно-дальномерным методом (Sarafanov et al., 2023). Передача в режиме квазиреального времени позволяет выдавать конечные данные о местоположении молнии пользователям не более, чем через 5 минут после события разряда молнии.

Магнитно-пеленгационный метод используется в NNLDN как дополнительный по отношению к разностно-дальномерному. Расчёт местоположения разряда производится по разностям времен прихода излучения молниевых разряда на станции.

Искажения принимаемого от разрядов молний сигнала приводят к смещению регистрируемого переднего фронта импульса, и, как следствие, дисперсии времён срабатывания триггера прихода сигнала на станции. Обратная задача местоопределения точки разряда молнии по временам прихода в этом случае становится некорректной. Решение такой задачи возможно с помощью методов оптимизации (Rodger et al., 2009).

Численное решение представляет собой задачу поиска глобального минимума специальным образом составленной функции невязки, зависящей от координат станций, времен прихода и координат на широтно-долготной сетке. Численный поиск глобального минимума, соответствующего точке разряда, не всегда возможен и зависит от изрезанности и овражности функции. Последние свойства зависят как от места разряда, так и от пространственной конфигурации станций.

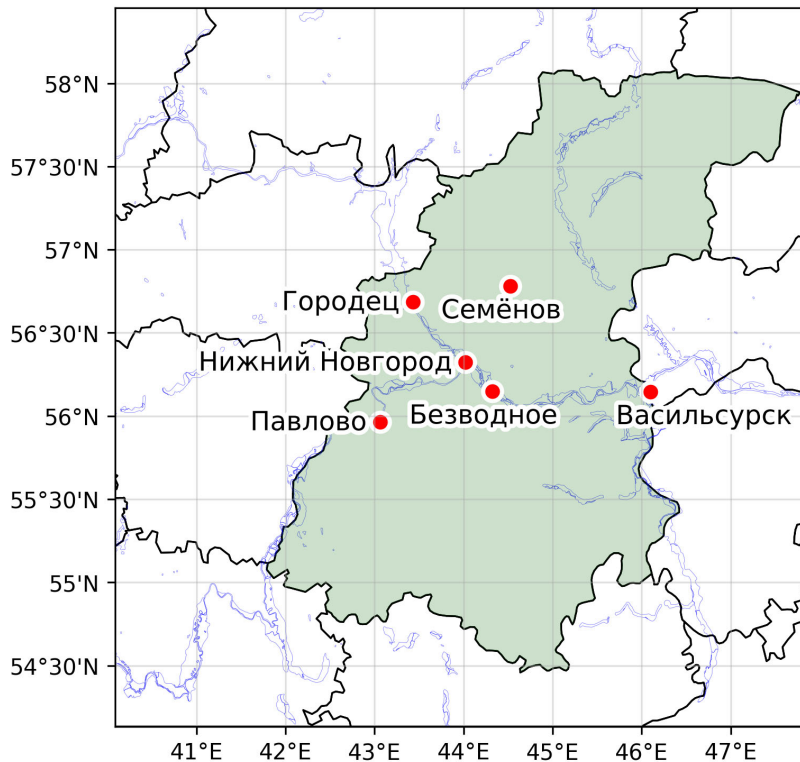


Рисунок 2. Региональная ГПС NNLDN

Пункты наблюдения “Городец”, “Нижний Новгород”, “Семёнов”, “Безводное” установлены на базе ИПФ РАН и обновлены в 2021-2022 годах; пункты наблюдения “Павлово” и “Васильсурск” запущены в 2022 году на базе ННГУ

Figure 2. Regional lightning detection network “NNLDN”

Observation points “Gorodets”, “Nizhny Novgorod”, “Semyonov”, “Bezvodnoe” installed on the basis of the Institute of Applied Physics RAS and updated in 2021-2022; observation points “Pavlovo” and “Vasilsursk” launched in 2022 on the basis of Nizhny Novgorod State University

Для определения оптимальной конфигурации ГПС было проведено численное моделирование точности обнаружения при разных положениях станций. Для этого была построена субградусная сетка 100×100 ячеек, включающая в себя Нижегородскую область; на каждой ячейке сетки случайным образом генерировалось 10 модельных разрядов с точно заданными местоположением и временем события.

Далее производился расчёт времен прихода сигнала от таких разрядов на станции модельной сети. Ко времени прихода перед решением обратной задачи был добавлен шум, распределенный по Гауссу со средним значением 0.5 мкс и стандартным отклонением 0.3 мкс, что соответствует экспериментальной оценке ошибки получения времени прихода сигнала от разряда молнии на станциях.

Результаты моделирования ошибки обнаружения модельных разрядов для двух конфигураций сети показаны на рис. 3. Под ошибкой здесь понима-

ется расстояние между изначально заданным положением разряда и положением глобального минимума функции невязки.

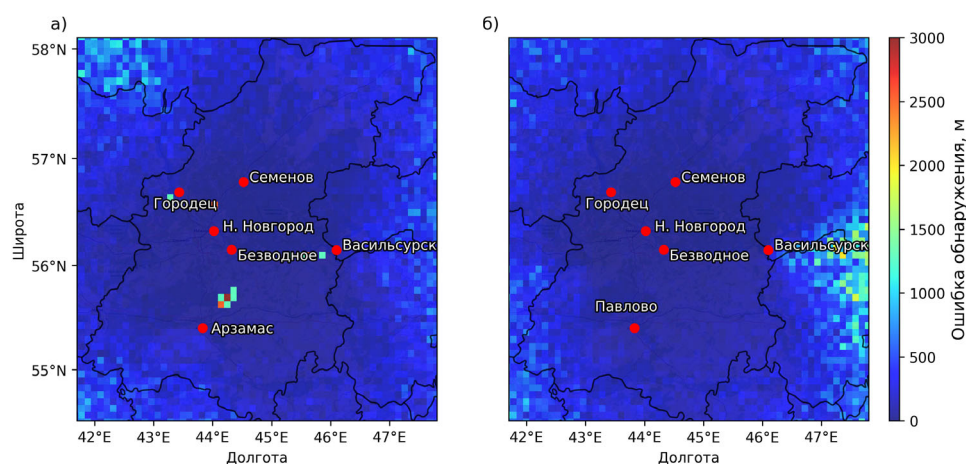


Рисунок 3. Ошибка обнаружения разряда при численном моделировании, а) конфигурация с дополнительной станцией в г. Арзамас, б) конфигурация с дополнительной станцией в г. Павлово

Figure 3. Discharge detection error in numerical modeling, а) configuration with an additional station in Arzamas, б) configuration with an additional station in Pavlovo

Расчеты и сравнительные карты, подобные рис. 3, были произведены для всех возможных комбинаций станций на доступных местах их размещения. В рамках статьи пример выше ограничен двумя возможными конфигурациями с минимальной средней ошибкой обнаружения. Конфигурация с дополнительной станцией в г. Арзамас (рис. 3а) обеспечивала меньшую среднюю ошибку в пределах моделируемой сетки, а вторая конфигурация (рис. 3б) обладала сопоставимой точностью, но в этой конфигурации в пределах Нижегородской области не было зон со смоделированной ошибкой обнаружения разрядов более 1000 м. Последняя конфигурация была выбрана в качестве основной.

Две новых станции грозопеленгации, соответствующие рис. 3б, были установлены в 2022 г. в г. Павлово и г. Васильсурск на базе Павловского филиала ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

Результаты наблюдений региональной ГПС в Нижегородском регионе

Грозовой сезон 2022 г. в Нижегородском регионе отличается большим числом грозовых событий и большим суммарным числом молниевых разрядов по сравнению со среднегодовыми значениями, что подтверждается данными WWLLN (см. рис. 1). Несколько мощных грозовых фронтов прошли непосредственно над городом, и ГПС NNLDN было зафиксировано большое количество ближних разрядов молний (см. табл. 1). На рис. 4 представлены

результаты регистрации молниевых разрядов для сезона измерений весна-осень 2022 г. Во время двух самых интенсивных грозовых событий 9 и 29 июля 2022 г. ГПС NNLDN зарегистрировала более 8000 молниевых разрядов в каждом. Сезонный максимум грозовой активности наблюдался в июле 2022 года, что характерно для Нижегородской области (Шаталина и др., 2021).

Таблица 1. Количество разрядов за день, зарегистрированных ГПС NNLDN над Нижегородской областью во время 8 наиболее мощных грозовых событий 2022 г.

Table 1. Number of discharges per day recorded by the NNLDN over the Nizhny Novgorod region during the 8 most powerful thunderstorm events of 2022

День	Количество разрядов
2022-07-09	9684
2022-07-29	9240
2022-07-14	7779
2022-07-18	7017
2022-06-27	5775
2022-07-26	5250
2022-07-08	4989
2022-08-09	4657

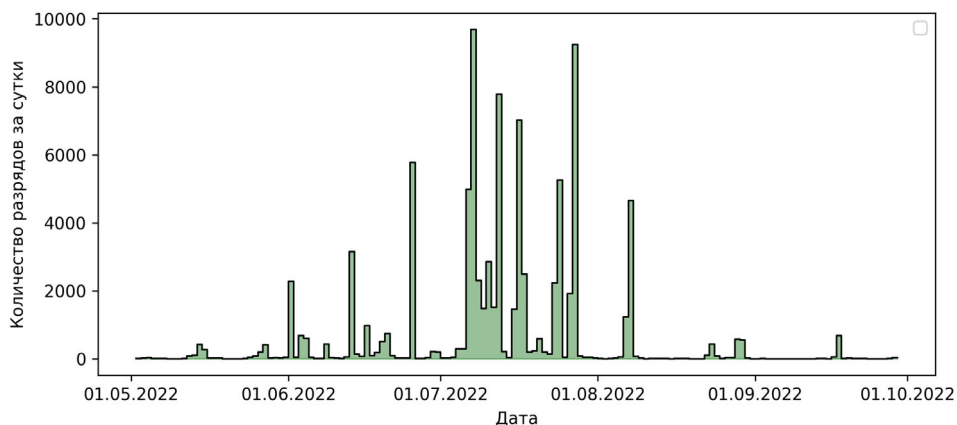


Рисунок 4. Количество разрядов за сутки, зарегистрированных ГПС NNLDN над Нижегородской областью на протяжении 2022 г.

Figure 4. The number of discharges per day recorded by the NNLDN over the Nizhny Novgorod region during 2022

На рис. 5 приведены тепловые карты плотности разрядов (грозоопасности) по наблюдениям глобальной сети грозопеленгации WWLLN и по наблюдениям региональной ГПС NNLDN на протяжении 2022 г. Результаты последних наблюдений дают уточнённое значение в 2 разряда на км²/год. В то же время осредненные по гораздо большим площадям данные о районировании грозоопасности в России (Аджиева и др., 2020) дают значения для Ниже-

городской области в 4 разряда на км²/год. Можно отметить, что даже уточнённые значения демонстрируют значительную пространственную изменчивость плотности разрядов в пределах области.

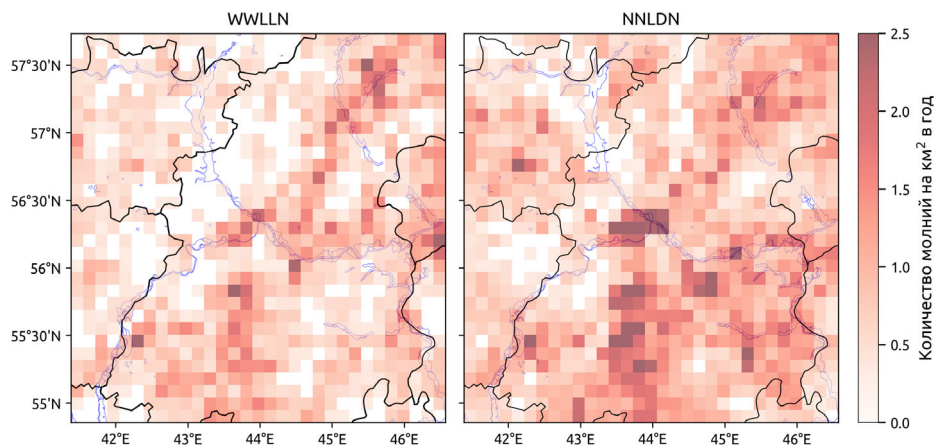


Рисунок 5. Тепловая карта грозовой активности над Нижегородской областью в весенне-летнем сезоне 2022 года, по данным мировой сети гронопеленгации WWLLN, (слева, только разряды облако-земля) и, по данным ГПС NNLDN, (справа, все разряды)

Figure 5. Heat map of thunderstorm activity over the Nizhny Novgorod region in the spring-summer season of 2022, according to the world lightning direction network WWLLN, (on the left, only cloud-to-earth discharges) and, according to the NNLDN data, (on the right, all discharges)

Устойчивые пространственные паттерны грозоопасности, которые можно наблюдать на рис. 5, по результатам регистрации разрядов региональной ГПС, обладают в 1.5-2 раза большей изменчивостью количества разрядов по сравнению с глобальной ГПС WWLLN.

Область высокой плотности разрядов, протянувшаяся от юго-запада на северо-восток карты (Арзамасский, Богородский, Краснобаковский районы), демонстрирует характерную для Нижегородской области особенность, выражающуюся в том, что наиболее мощные и продолжительные грозовые события развиваются как раз в этом направлении, как было показано в (Шаталина и др., 2021) на примере совместного анализа натуральных данных регистрации напряженности атмосферного электрического поля и данных метеорадара ДМРЛ-С. Результаты анализа ГПС NNLDN подтверждают статистическую значимость данной аномалии плотности разрядов, являющейся одним из важных региональных паттернов молниевой активности в Нижегородской области.

Ещё одной особенностью пространственного распределения молний в исследуемом регионе является снижение плотности разрядов над Горьковским водохранилищем. Подобные эффекты ранее были обнаружены исследователями над другими крупными водными объектами (Ткачев и др., 2021). Среднемноголетняя статистика плотности только разрядов типа «облако-земля» над водохранилищем, по данным ГПС WWLLN за 2015-2021 гг., даёт

значения в 0.41 разряда на км²/год над водохранилищем и 0.45 разряда на км²/год в береговой полосе шириной 10 км.

Такое увеличение плотности разрядов над береговой полосой на ~10% по сравнению с плотностью разрядов над водохранилищем может быть связано с двумя факторами: во-первых, инициация разрядов «облако-поверхность» может зависеть от типа подстилающей поверхности, во-вторых, над водохранилищем процессы зарядки грозовых облаков могут ослабляться из-за подавления конвекции над холодной (относительно суши) поверхностью водохранилища.

В области наблюдения нижегородской ГПС NNLDN преимущественно наблюдается два типа интенсивных грозовых событий: фронтальные грозы, связанные с вторжением холодных фронтов, и внутримассовые грозы. На рис. 6 приведены тепловые карты плотности разрядов, зарегистрированных во время двух наиболее мощных грозовых событий конвективного сезона 2022 г.

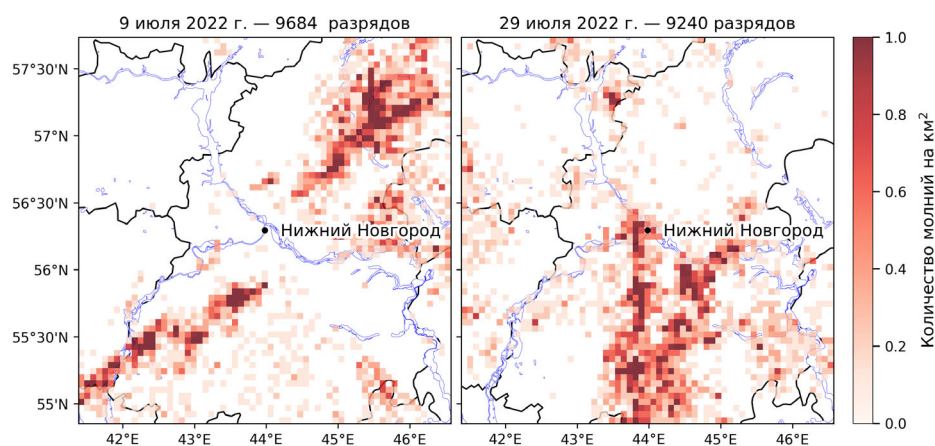


Рисунок 6. Тепловая карта суточной грозовой активности над Нижегородской областью, по данным ГПС NNLDN за 9 и 29 июля 2022 года

Figure 6. Heat map of daily thunderstorm activity over the Nizhny Novgorod region, according to NNLDN data for July 9 and 29, 2022

Гроза 9 июля связана с атмосферным фронтом, движущимся с запада на юго-восток; гроза 29 июля – с фронтом, движущимся с юга. Отметим, что ГПС NNLDN за одно событие зафиксировала всего 17505 и 19770 разрядов за 9 и 29 июля соответственно в пределах области видимости ГПС (~400 км), т. е. гроза 29 июля была более мощной, но прошла преимущественно по южным районам области, что привело к меньшему числу разрядов на территории области (9240 в пределах области при 19770 в пределах наблюдений).

Для климатических задач, связанных с изучением региональных паттернов грозовой активности, интерес представляет выделение основных направлений прихода гроз. Для построения диаграммы направлений прихода гроз использовались данные грозопеленгационной сети WWLLN и данные нижегородского доплеровского метеорадара ДМРЛ-С с пространственным разрешением в 4 км и временным – в 10 минут (Ильин, Кутерин, 2020). Чаще всего

при анализе профиля скоростей используются измеряемые метеорадаром доплеровские скорости. При этом теряется информация о тангенциальных скоростях (Доплеровский метеорологический радиолокатор..., 2011). Чтобы повысить точность расчета направлений перемещения, использовалось распознавание движения облачности на пространственной сетке на каждом временном шаге. В качестве параметра, характеризующего облачность, использовалась максимальная вертикальная отражаемость в столбе (mdBz).

С помощью численного алгоритма оптического распознавания на базе метода Лукаса-Канаде (Lucas, Kanade, 1981) рассчитывались вектора перемещения областей с $mdBz > 0$ в пределах видимости метеорадара на каждом временном шаге. Обычно для выделения грозных областей по радарным данным применяется порог в 40-60 dBz (Мазин и др., 1989), но в ходе численных расчетов было определено, что повышение порога незначительно увеличивает дисперсию направления среднего вектора перемещения при неизменном среднем направлении. Это объясняется тем, что грозовая ячейка на границе атмосферного фронта в среднем движется в том же направлении, что и фронт.

Направление прихода грозовой ячейки принимается равным направлению среднего в пределах одного часа по всем областям с $mdBz > 0$ вектора перемещения, при условии регистрации в этот же час не менее 10 молниевых разрядов. Доли в % от всех грозных часов для гроз, пришедших с выбранного направления, показаны на рис. 7.

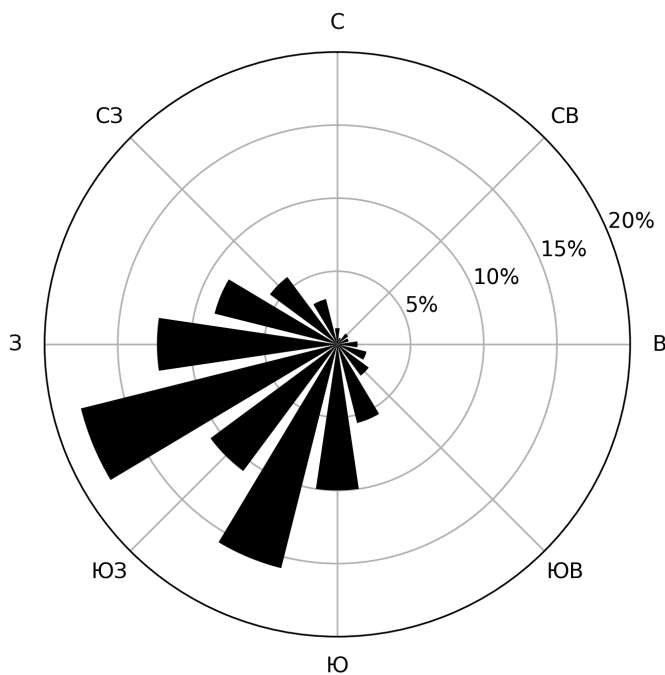


Рисунок 7. Диаграмма грозных часов (в % от общего количества) в Нижегородской области, по данным WWLLN за 2015-2021 гг.

Figure 7. Diagram of thunderstorm hours (as a percentage of the total) in the Nizhny Novgorod region, according to WWLLN data for 2015-2021

Из анализа направлений прихода гроз в область, результат которого приведён на рис. 7, следует, что 67% всех гроз приходят из юго-западного сектора («З», «ЮЗ», «Ю»), 22% с северо-западного и юго-восточного секторов и только 11% с северо-восточного сектора («С», «СВ», «В»). Отметим, что диаграмма имеет выделенное направление «ЮЗ»-«СВ», которое просматривается также и на тепловых картах грозоопасности (см. рис. 5).

Заключение

В данной работе исследованы некоторые особенности региональной климатологии грозовых событий в Нижегородской области, в частности, рассмотрены как отдельные события 2022 г., так и среднемноголетняя статистика. Сопоставлены результаты наблюдений региональной ГПС NNLDN и глобальной ГПС WWLLN, для которых показано качественное соответствие наблюдаемых паттернов грозовой активности.

По результатам исследования определено среднее значение количества разрядов над исследуемой областью за 2022 г., которое составило 2 разряда на км²/год, что меньше, чем определенное в других исследованиях значение в 4 разряда на км²/год (Аджиева и др., 2020). При этом во время отдельных событий, приведённых в табл. 1, максимальные значения молниевой активности имеют порядок 1 разряда на 10 км² за сутки. С использованием данных метеорадара ДМРЛ-С рассчитана диаграмма направлений прихода грозовых ячеек в Нижегородскую область и определены основные направления прихода: 67% всех гроз приходит с западного, юго-западного и южного направлений.

Исследование демонстрирует возможность использования региональных грозопеленгационных систем для уточнения статистики грозовых событий на примере новой многопунктовой ГПС NNLDN, разработанной в ИПФ РАН в тесном соответствии с изучением задач климатологии молний и прогноза молниевой активности на региональном масштабе.

Благодарности

Разработка и внедрение ГПС NNLDN выполнены при поддержке государственного задания ННГУ 0729-2020-0037. Обработка и анализ результатов наблюдений выполнены при поддержке государственного задания ИПФРАН FFUF-2022-0008.

Список литературы

Аджиев, А.Х., Стасенко, В.Н., Тапасханов, В.О. (2013) Система грозопеленгации на Северном Кавказе, *Метеорология и гидрология*, № 1, с. 2-11.

Аджиева, А.А., Керефова, З.М., Гятов, Р.А. (2020) Поражаемость территории и объектов Северного Кавказа молниями, *Наука. Инновации. Технологии*, № 3, с. 107-122.

Горлова, И.Д. (2020) Изучение грозовой активности средствами космического и наземного базирования, *Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды: Материалы VI Всероссийской научной конференции. Санкт-Петербург: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского*, с. 211-213.

Доплеровский метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С (2011) Руководство по эксплуатации в 6 кн., М., ЛЭМЗ, ЦИВР, 462414.002РЭ.

Ильин, Н.В., Кутерин, Ф.А. (2020) Оценка точности распознавания гроз по данным доплеровского метеорологического локатора ДМРЛ-С, *Метеорология и гидрология*, № 9, с. 104-112.

Кононов, И.И., Юсупов, И.Е., Кандарацков, Н.В. (2013) Анализ одно-пунктовых методов пассивной локации грозового разряда, *Известия вузов. Радиофизика*, т. 56, № 11/12, с. 875-888.

Мазин, И.П., Хргиан, А.Х., Имянитов, И.М. (1989) *Облака и облачная атмосфера. Справочник*, Ленинград, Гидрометеиздат, 647 с.

Московенко, В.М., Знаменщиков, Б.П., Золотарев, С.В. (2012) Применение системы грозопеленгации «Веря-МР» в интересах электроэнергетики России, *Новое в российской электроэнергетике*, № 2, с. 15-23.

Снегуров, А.В., Снегуров, В.С. (2019) Сравнение характеристик много-пунктовых грозопеленгационных систем, *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*, № 595, с. 22-62.

Ткачев, И.Д., Васильев, Р.В., Белоусова, Е.П. (2021) Кластерный анализ молниевых разрядов по данным грозопеленгационной сети «Веря-МР», *Солнечно-земная физика*, т. 7, № 4, с. 91-98.

Шаталина, М.В., Ильин, Н.В., Мареев, Е.А. (2021) Характеристики опасных метеорологических явлений в Нижнем Новгороде по данным натуральных наблюдений электрического поля, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 107-111.

ALWES – Пассивные системы пеленгации гроз, URL: <http://www.alwes.ru> (дата обращения 5 апреля 2023).

Cummins, K.L., Murphy, M.J. (2009) An Overview of Lightning Locating Systems: History, Techniques, and Data Uses, With an In-Depth Look at the U.S. NLDN, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 51, no. 3, pp. 499-518.

Demytyeva, S., Shatalina, M., Popykina, A., Sarafanov, F., Kulikov, M., Mareev, E. (2023) Trends and Features of Thunderstorms and Lightning Activity in the Upper Volga Region, *Atmosphere*, vol. 14, p. 674.

Holzworth, R.H., Brundell, J.B., McCarthy, M.P., Jacobson, A.R., Rodger, C.J., Anderson, T.S. (2021) Lightning in the Arctic, *Geophysical Research Letters*, vol. 48, p. e2020GL091366.

Kang, D., Heath, N.K., Gilliam, R.C., Spero, T.L., Pleim, J.E. (2022) Lightning assimilation in the WRF model (Version 4.1.1): technique updates and

assessment of the applications from regional to hemispheric scales, *Geoscientific Model Development*, vol. 15, pp. 8561-8579.

Lucas, B.D., Kanade, T. (1981) An iterative image registration technique with an application to stereo vision, *Proceedings of Imaging Understanding Workshop*, pp. 121-130.

Naccarato, K.P., Pinto, O. Jr., Garcia, S.A.M., Murphy, J.M., Demetriades, N.W.S., Cramer, J.A. (2010) Validation of the new GLD360 dataset in Brazil: First results, *Preprints, International Lightning Detection Conference, April 19-20, Orlando, Florida, Vaisala*, pp. 1-6.

Price, C.G. (2013) Lightning Applications in Weather and Climate Research, *Survey in Geophysics*, vol. 34, pp. 755-767.

Rakov, V.A. (2013) Electromagnetic Methods of Lightning Detection, *Surveys in Geophysics*, vol. 34, no. 6, pp. 731-753.

Rodger, C.J., Brundell, J.B., Holzworth, R.H., Lay, E.H. (2009) Growing Detection Efficiency of the World Wide Lightning Location Network, *AIP Conf. Proc, April 27*, vol. 1118(1), pp. 15-20.

Rudlosky, S.D., Peterson, M.J., Kahn, D.T. (2017) GLD360 Performance Relative to TRMM LIS, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, vol. 34, no. 6, pp. 1307-1322.

Saunders, C.P.R. (2008) Charge Separation Mechanisms in Clouds, *Space Science Reviews*, vol. 137, pp. 335-353.

Sarafanov, F.G., Ilin, N.V., Popykina, A.P. (2023) Regional Features of Thunderstorm Activity Based on Observations by the Nizhny Novgorod Lightning Detection Network, *Proc. SPIE 12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, p. 127805Z.

Tarabukina, L., Kozlov, V. (2020) Seasonal Variability of Lightning Activity in Yakutia in 2009-2019, *Atmosphere*, vol. 11, p. 918.

Unnikrishnan, C.K., Pawar, S., Gopalakrishnan, V. (2021) Satellite-observed lightning hotspots in India and lightning variability over tropical South India, *Advances in Space Research*, vol. 68, issue 4, pp. 1690-1705.

Vaisala (2021) *Total Lightning Statistics 2021: Vaisala Annual Lightning Report*, Vaisala, Finland, pp. 1-40.

Zhang, D., Cummins, K.L., Lang, T.J., Buechler, D., Rudlosky, S. (2023) Performance Evaluation of the Lightning Imaging Sensor on the International Space Station, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, vol. 40, pp. 1063-1082.

References

Adzhiev, A.Kh., Stasenko, V.N., Tapaskhanov, V.O. (2013) Sistema grozopelengacii na Severnom Kavkaze [Lightning direction finding system in the North Caucasus], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 1, pp. 2-11.

Adzhieva, A.A., Kerefova, Z.M., Gyatov, R.A. (2020) Porazhaemost' territorii i ob"ektov Severnogo Kavkaza molniyami [Damage to the territory and objects of the North Caucasus by lightning], *Nauka. Innovacii. Tekhnologii*, no. 3, pp. 107-122.

Gorlova, I.D. (2020) Izuchenie grozovoy aktivnosti sredstvami kosmicheskogo i nazemnogo bazirovaniya [Study of lightning activity by space- and ground-based means], *Problemy voenno-prikladnoy geofiziki i kontrolya sostoyaniya prirodnoy sredy: Materialy VI Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Problems of military-applied geophysics and monitoring of the state of the natural environment: Proceedings of the VI All-Russian Scientific Conference], Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, St. Petersburg, Russia, pp. 211-213.

Doplerovskiy meteorologicheskij radiolokator DMRL-S [Doppler weather radar DMRL-S] (2011) Rukovodstvo po ekspluatatsii v 6 kn. [Operating manual in 6 books], LEMZ, CIVR, Moscow, Russia, 462414.002RE.

Ilyin, N.V., Kuterin, F.A. (2020) Accuracy of Thunderstorm Detection Based on DMRL-C Weather Radar Data, *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 45, no. 9, pp. 669-675.

Kononov, I.I., Yusupov, I.E., Kandaratskov, N.V. (2013) Analiz odnopunktovykh metodov passivnoy lokatsii grozovogo razryada [Analysis of one-point methods for passive location of lightning discharge] *Izvestiya vuzov. Radiofizika*, vol. 56, no. 11/12, pp. 875-888.

Mazin, I.P., Khrgian, A.Kh., Imyanitov, I.M. (1989) *Oblaka i oblachnaya atmosfera. Spravochnik* [Clouds and cloudy atmosphere. Directory] Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, p. 647.

Moskovenko, V.M., Znamenshchikov, B.P., Zolotarev, S.V. (2012) Primenenie sistemy grozopelengatsii «Vereya-MR» v interesah elektroenergetiki Rossii [Application of the Vereya-MR lightning direction detection system for the benefit of the Russian electric power industry], *Novoe v rossijskoy elektroenergetike*, no. 2, pp. 15-23.

Snegurov, A.V., Snegurov, V.S. (2019) Sravnenie karakteristik mnogopunktovykh grozopelengatsionnykh sistem [Comparison of the characteristics of multipoint lightning direction finding systems], *Trudy Glavnoj geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voejkova*, no. 595, pp. 22-62.

Tkachev, I.D., Vasiliev, R.V., Belousova, E.P. (2021) Klasternyj analiz molnievykh razryadov po dannym grozopelengatsionnoj seti «Vereya-MR» [Cluster analysis of lightning discharges based on data from the Vereya-MR lightning direction network], *Solnechno-zemnaya fizika*, vol. 7, no. 4, pp. 91-98.

Shatalina, M.V., Ilyin, N.V., Mareev, E.A. (2021) Harakteristiki opasnykh meteorologicheskikh yavlenij v Nizhnem Novgorode po dannym naturnykh nablyudenij elektricheskogo polya [Characteristics of hazardous meteorological phenomena in Nizhny Novgorod based on field observations of the electric field], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 6, pp. 107-111.

ALWES – Passivnyye sistemy pelengatsii groz [ALWES – Passive thunderstorm direction finding systems], URL: <http://www.alwes.ru> (accessed April 5, 2023).

Cummins, K.L., Murphy, M.J. (2009) An Overview of Lightning Locating Systems: History, Techniques, and Data Uses, With an In-Depth Look at the U.S. NLDN, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 51, no. 3, pp. 499-518.

Dementyeva, S., Shatalina, M., Popykina, A., Sarafanov, F., Kulikov, M., Mareev, E. (2023) Trends and Features of Thunderstorms and Lightning Activity in the Upper Volga Region, *Atmosphere*, vol. 14, p. 674.

Holzworth, R.H., Brundell, J.B., McCarthy, M.P., Jacobson, A.R., Rodger, C.J., Anderson, T.S. (2021) Lightning in the Arctic, *Geophysical Research Letters*, vol. 48, p. e2020GL091366.

Kang, D., Heath, N.K., Gilliam, R.C., Spero, T.L., Pleim, J.E. (2022) Lightning assimilation in the WRF model (Version 4.1.1): technique updates and assessment of the applications from regional to hemispheric scales, *Geoscientific Model Development*, vol. 15, pp. 8561-8579.

Lucas, B.D., Kanade, T. (1981) An iterative image registration technique with an application to stereo vision, *Proceedings of Imaging Understanding Workshop*, pp. 121-130.

Naccarato, K.P., Pinto, O. Jr., Garcia, S.A.M., Murphy, J.M., Demetriades, N.W.S., Cramer, J.A. (2010) Validation of the new GLD360 dataset in Brazil: First results, *Preprints, International Lightning Detection Conference, April 19-20, Orlando, Florida, Vaisala*, pp. 1-6.

Price, C.G. (2013) Lightning Applications in Weather and Climate Research, *Survey in Geophysics*, vol. 34, pp. 755-767.

Rakov, V.A. (2013) Electromagnetic Methods of Lightning Detection, *Surveys in Geophysics*, vol. 34, no. 6, pp. 731-753.

Rodger, C.J., Brundell, J.B., Holzworth, R.H., Lay, E.H. (2009) Growing Detection Efficiency of the World Wide Lightning Location Network, *AIP Conf. Proc, April 27*, vol. 1118(1), pp. 15-20.

Rudlosky, S.D., Peterson, M.J., Kahn, D.T. (2017) GLD360 Performance Relative to TRMM LIS, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, vol. 34, no. 6, pp. 1307-1322.

Saunders, C.P.R. (2008) Charge Separation Mechanisms in Clouds, *Space Science Reviews*, vol. 137, pp. 335-353.

Sarafanov, F.G., Ilin, N.V., Popykina, A.P. (2023) Regional Features of Thunderstorm Activity Based on Observations by the Nizhny Novgorod Lightning Detection Network, *Proc. SPIE 12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, p. 127805Z.

Tarabukina, L., Kozlov, V. (2020) Seasonal Variability of Lightning Activity in Yakutia in 2009-2019, *Atmosphere*, vol. 11, p. 918.

Unnikrishnan, C.K., Pawar, S., Gopalakrishnan, V. (2021) Satellite-observed lightning hotspots in India and lightning variability over tropical South India, *Advances in Space Research*, vol. 68, issue 4, pp. 1690-1705.

Vaisala (2021) *Total Lightning Statistics 2021: Vaisala Annual Lightning Report*, Vaisala, Finland, pp. 1-40.

Zhang, D., Cummins, K.L., Lang, T.J., Buechler, D., Rudlosky, S. (2023) Performance Evaluation of the Lightning Imaging Sensor on the International Space Station, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, vol. 40, pp. 1063-1082.

Статья поступила в редакцию (Received): 30.10.2023.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 09.01.2024.

Принята к публикации (Accepted): 20.01.2024.

Для цитирования / For citation:

Сарафанов, Ф.Г., Шаталина, М.В., Шлюгаев, Ю.В., Мареев, Е.А. (2024) Современные системы локации молний: глобальные и региональные аспекты, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 10, № 1, с. 76-92, doi:10.21513/2410-8758-2024-1-76-92.

Sarafanov, F.G., Shatalina, M.V., Shlyugaev, Yu.V., Mareev, E.A. (2024) Modern lightning localization systems: global and regional aspects, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 10, no. 1, pp. 76-92, doi:10.21513/2410-8758-2024-1-76-92.