

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СЕТЬ ОНЧ-ПРИЕМНИКОВ  
ДЛЯ МОНИТОРИНГА ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ  
НА БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ**

**EXPERIMENTAL DISTRIBUTED NETWORK OF VLF RECEIVERS  
FOR THUNDERSTORM ACTIVITY MONITORING  
IN THE BAIKAL NATURAL TERRITORY**

**И.Д. Ткачев**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, tid007@iszf.irk.ru*

**Р.В. Васильев**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, roman\_vasilyev@iszf.irk.ru*

**О.С. Зоркальцева**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, meteorologistka@gmail.com*

**А.С. Полетаев**

*Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
Иркутск, Россия, poletaevas@ex.istu.edu*

**А.Г. Ченский**

*Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
Иркутск, Россия, zavmts@ex.istu.edu*

**К.М. Васильев**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, vasilevkm@iszf.irk.ru*

**Р.Р. Салимгоров**

*Иркутский государственный университет,  
Иркутск, Россия, salimgoreev.renat@gmail.com*

**I.D. Tkachev**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, tid007@iszf.irk.ru*

**R.V. Vasilyev**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, roman\_vasilyev@iszf.irk.ru*

**O.S. Zorkaltseva**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, meteorologistka@gmail.com*

**A.S. Poletaev**

*Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia, poletaevas@ex.istu.edu*

**A.G. Chensky**

*Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia, zavmts@ex.istu.edu*

**K.M. Vasiliev**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, vasilevkm@iszf.irk.ru*

**R.R. Salimgoreev**

*Irkutsk State University,  
Irkutsk, Russia, salimgoreev.renat@gmail.com*

**Аннотация.** В статье представлено текущее состояние развернутой на территории Иркутской области и Республики Бурятия грозопеленгационной сети, в состав которой входят четыре пункта. Объединены результаты, полученные во время нескольких этапов проекта «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории». Дана схема используемого ОНЧ-приемника. Подробно описан процесс обработки данных, особенности некоторых алгоритмов и обоснование их выбора. При создании алгоритмов обработки и их дальнейшей модернизации стало возможным получение карт молниевых разрядов с периодом несколько минут. Приведены промежуточные результаты работы сети, показана карта распределения молниевых разрядов и даны рекомендации по ее дальнейшему развитию и модернизации.

**Ключевые слова:** грозопеленгационные сети, ОНЧ-приемник, молниевые разряды, атмосферное электричество, мониторинг грозовой активности.

**Abstract.** The paper describes the current state of the lightning location network deployed in the Irkutsk Region and the Republic of Buryatia, which includes four stations. It is based on the results obtained during several stages of the project “Fundamental principles, methods, and technologies for digital monitoring and forecasting of environmental situation of the Baikal Natural Territory”. We present a diagram of the VLF receiver in use. Data processing, features of some algorithms, and the rationale for their choice are described in detail. Developing processing algorithms and further upgrading them have provided lightning discharge maps with a period of several minutes. We present intermediate results of the network operation, a lightning discharge distribution map and give recommendations for further developing and upgrading the lightning location network.

**Keywords:** lightning location networks, VLF receiver, lightning discharges, atmospheric electricity, thunderstorm activity monitoring.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из эффективных способов мониторинга грозовой активности являются сети радиоприемников сверхдлинных волн (СДВ), синхронизированные единым временным стандартом и регистрирующие импульсные сигналы от молниевых разрядов. Грозопеленгационные сети (ГПС) по масштабу покрытия территории можно разделить на глобальные и региональные. К глобальным наземным сетям можно отнести такие, как WWLLN [Lay et al., 2004], NLDN [Cummins et al., 1998], NALDN [Orville et al., 2002], GLD360 [Naccarato et al., 2010], всемирная некоммерческая сеть обнаружения и определения местоположения молний Blitzortung [<https://www.blitzortung.org/>], BLNET [Qie et al., 2020] и др. С развитием технологий и активным освоением околоземного космического пространства появился еще один способ детектирования молниевых разрядов: размещение инструментов Lightning Imaging Sensor (LIS) на борту космических аппаратов, находящихся на разных орбитах Земли. Так, например, один из таких приборов расположен на МКС [Zhang et al., 2023]. В основном, оборудование для оптической локализации молниевых разрядов располагают на геостационарных метеорологических спутниках [Chen et al., 2021; <https://www.eumetsat.int/features/animations-europes-first-lightning-imager>].

На территории Российской Федерации глобальной можно считать сеть, покрывающую большую часть страны. В настоящее время к такой могут относиться несколько ГПС, отличающиеся по параметрам и задачам: ГПС «Алвес» (ALWES) [<http://www.alwes.ru>], ГПС НИЦ «Планета» и Высокогорный геофизический институт (ВГИ) [Горлова, 2020], ГПС Росгидромета на основе датчиков фирмы «Алвес». До 2019 г. на всей территории РФ мониторинг грозовой активности осуществляла ГПС «Верея-МР» [Московенко и др., 2012]. Обслуживание разнесенного по протяженной территории большого количества приемников требует большого количества финансовых и человеческих ресурсов. Поэтому исследования грозовой активности довольно часто проводятся при помощи региональных ГПС. Главное преимущество региональных ГПС — точность определения местоположения молниевых разрядов. Она может достигать десятков и сотен метров. Среди региональных ГПС на территории РФ стоит отметить такие, как NNLDN [Сарафанов и др., 2024], на территории Северного Кавказа с 2008 г. используется грозорегистратор LS8000 фирмы «Vaisala» [Аджиев и др., 2013], однопунктовые и многопунктовые системы мониторинга на территории Якутии [Козлов и др., 2023; Тарабукина, Козлов, 2018], а также различные локальные ГПС на основе датчиков фирмы «Алвес», связанные с нефте- и газодобывающей промышленностью на территории РФ. Существуют исследования, в которых анализ грозовой активности в регионе осуществляется по данным датчиков зарубежных сетей WWLLN и Blitzortung [Каранина и др., 2017; Нечепуренко и др., 2022; Селиванов и др., 2022].

Институт солнечно-земной физики СО РАН поддерживал работу одного из пунктов ГПС «Верея-МР» с 2012 по 2018 г. Была создана база данных молниевых разрядов за этот период, и с ее помощью проведен кластерный анализ молниевых разрядов для оценки основных параметров грозовых ячеек [Ткачев и др., 2021]. Также были проведены исследования совместной временной динамики гроз и лесных пожаров [Васильев и др., 2023]. В 2019 г. «Верея-МР» прекратила свое существование, поэтому для регистрации грозовой активности Байкальской природной территории и проведения дальнейших исследований было необходимо создать собственную сеть приемников.

В 2020–2023 гг. в рамках проекта «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории» [Бычков и др., 2022] была развернута новая ГПС ИСЗФ СО РАН и ИрНИТУ на территории Иркутской области и Республики Бурятия. Анализ грозовой активности по данным сети «Верея-МР» и научные сведения из работы [Филиппов, 1974] помогли определить регионы Байкальской природной территории с максимальным количеством гроз. Пункты новой ГПС были расположены согласно этим данным. В настоящее время в работу запущены четыре точки регистрации.

В процессе создания элементов сети были разработаны СДВ-приемники, алгоритмы накопления и сбора данных радиозфира в СДВ-диапазоне, алгоритмы вторичной обработки данных: поиска импульсов от молний и определения координат молниевых разрядов. Тестовая эксплуатация сети позволила выполнить первичный анализ гроз, зарегистрированных летом 2022 г., усовершенствовать алгоритмы вторичной обработки, уточнить места расположения дополнительных пунктов сети, оценить ее эффективность. Результаты исследований определили дальнейшие этапы развития мониторинга грозовой активности на Байкальской природной территории и возможности использования данных сети при защите объектов инфраструктуры и лесоохранных мероприятиях.

Даны описание устройства сети и алгоритмы ее работы, а также сопоставлены сведения о молниевых разрядах и облачности, полученные в режиме тестовой эксплуатации.

## 1. СТРУКТУРА ГРОЗОПЕЛЕНГАЦИОННОЙ СЕТИ

### ОНЧ-приемник

Регистратор грозопеленгационной сети представляет собой цифровой измерительный радиоприемник СДВ-ДВ-диапазона, построенный по принципу программно-определяемого радио (SDR) [Dillinger et al., 2003]. Общая принципиальная схема показана на рис. 1, а.

Главным источником электромагнитного излучения естественного происхождения являются молнии-

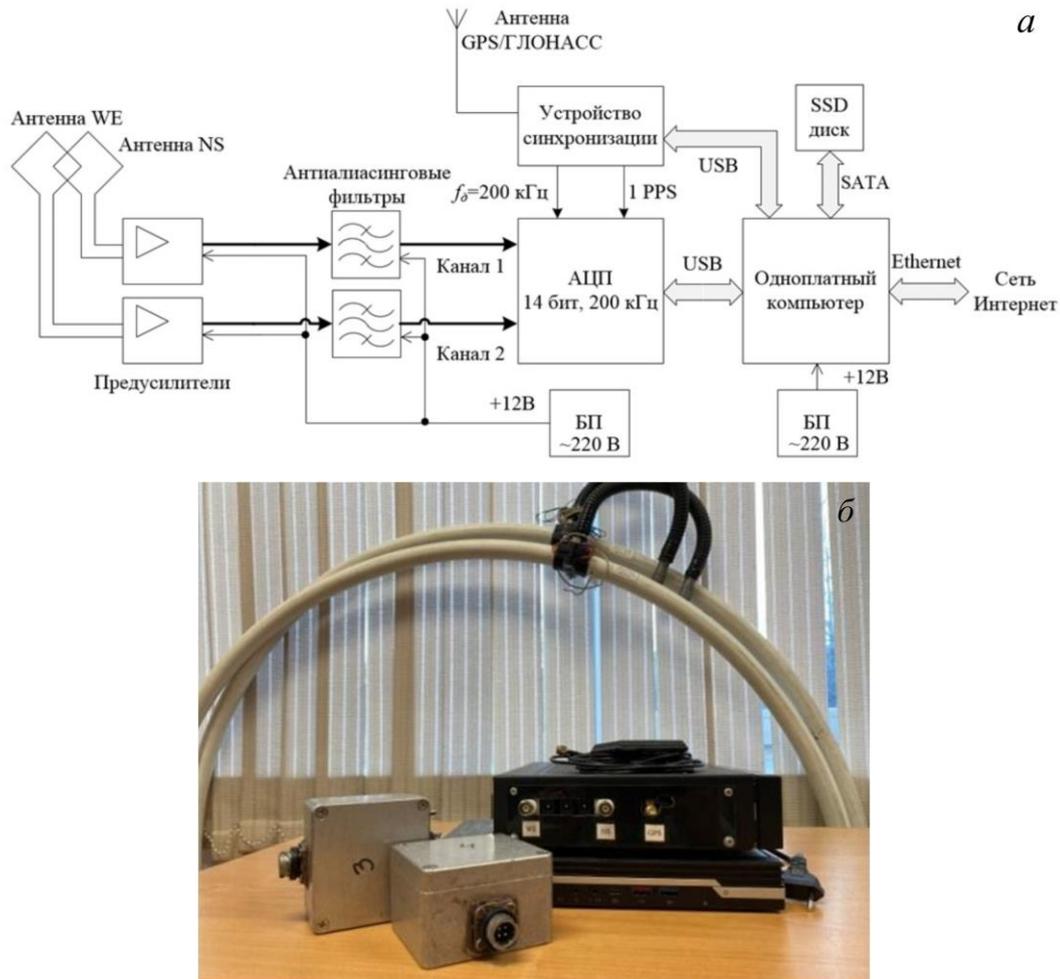


Рис. 1. Принципиальная схема регистратора грозопеленгационной сети (а); комплект оборудования одного из пунктов (б)

вые разряды. Энергия импульсов распределена в относительно широкой полосе частот, но основная доля энергии приходится на частоты ниже 100 кГц с максимумом излучения в области 1–10 кГц [Уман, 1987]. Прием радиоволн осуществляется с помощью ортогональных многовитковых рамочных антенн. Расположенные в непосредственной близости от них предварительные усилители выполняют согласование линейного тракта приемника с антенной и усиление в широкой полосе частот. Усилитель выполнен на сверхмалошумящей микросхеме КР538УН3А, предназначенной для низкоомных индуктивных датчиков. Антиалиасинговые фильтры ограничивают спектр излучения, подавляя колебания на частотах ниже 1 кГц и выше 50 кГц. Для сбора данных используется АЦП L-card E14-140. Частота преобразования АЦП составляет 200 кГц, при двухканальном приеме — 100 кГц на канал. Разрядность АЦП 14 бит, при динамическом диапазоне  $\pm 2.5$  В, шаг квантования  $\Delta = 5/2^{14} = 0.305$  мВ. Модуль АЦП поддерживает режимы внешней синхронизации преобразования и старта сбора данных. Устройство синхронизации обеспечивает привязку данных к единой шкале времени UTC при помощи модуля GPS/ГЛОНАСС Ublox M8T. Обработка данных осуществляется программно при помощи одноплатного компьютера.

Внешний вид комплекта оборудования показан на рис. 1, б. Он включает две кольцевые рамочные антенны, два предварительных усилителя в экранированных влагозащитных боках, два соединительных кабеля КВК 2П 2×0.52 длиной 20 м, блок линейного приемника, антенну GPS/ГЛОНАСС, одноплатный миникомпьютер, клавиатуру, мышь, импульсный и трансформаторный блоки питания.

### Программа управления сбором данных

Программа управления регистратором (рис. 2) запускается автоматически при подаче питания. После автозагрузки исполнительный файл загружает сохраненные настройки из файла и переводит систему в режим ожидания синхронизирующих импульсов GPS/ГЛОНАСС. Запуск сбора данных происходит на аппаратном уровне по приходу импульса 1PPS. Изъятие данных из буфера происходит выборками за 1 с (200000 отсчетов, 100000 на каждый канал). Окно просмотра работает в режиме осциллографа или спектроанализатора. После прихода каждого импульса 1PPS программа получает пакет NMEA с данными о времени и координатах. При отсутствии навигационных данных в течение 30 с сбор данных останавливается и запускается снова. Файлы сохраняются выборками за 1 мин. Образец сырых данных

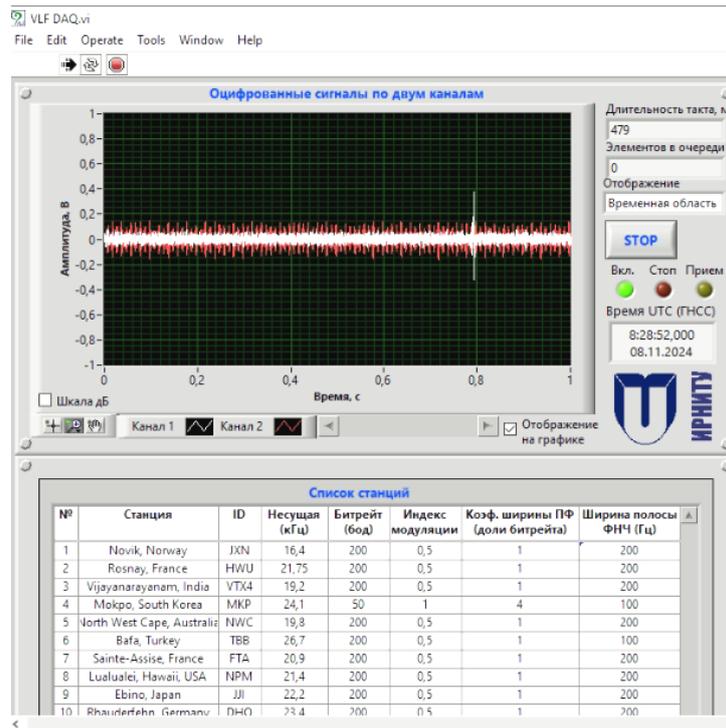


Рис. 2. Панель программы сбора данных

представляет набор бинарных файлов, полученных при настройках АЦП 200 кГц, 1 канал, 14 бит,  $\pm 2.5$  В.

### Расположение приемных станций

Пункты регистрации грозопеленгационной сети установлены на территории обсерваторий ИСЗФ СО РАН и подразделений авиационной охраны лесов Байкальской природной территории. Координаты пунктов: с. Торы —  $51.8109^\circ$  N,  $103.0775^\circ$  E; п. Листвянка —  $51.8463^\circ$  N,  $104.8927^\circ$  E; Братск —  $56.315^\circ$  N,  $101.7555^\circ$  E; п. Нижнеангарск —  $55.7932^\circ$  N,  $109.580^\circ$  E (рис. 3, з). На панелях а–в показаны изображения антенн грозопеленгационных станций и оборудование регистрирующего комплекса одного из пунктов. Кроме этих четырех станций, имеются два комплекта оборудования для планируемого увеличения зоны покрытия грозопеленгационной сети и оперативной замены оборудования при выходе из строя одной из станций.

## 2. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Процесс обработки в грозопеленгационной сети разбит на несколько этапов. Поскольку объем сырых данных занимает много пространства на жестком диске (~30 Гб за сутки), целесообразно выделять сигналы от молниевых разрядов и сохранять небольшие временные развертки (~6 мс), связанные с этим разрядом. Поэтому в каждом отдельном регистрирующем пункте запускается автоматический алгоритм, который из общего массива данных выделяет импульсы, амплитуда которых превышает установленный порог, а значимых точек больше трех (точки,

связанные с импульсом, превышающие пороговое значение амплитуды). Таким образом, в таблицу записываются следующие параметры: время регистрации импульса (определяется как время максимального значения амплитуды импульса), мощность (амплитуда), длительность, направление, с которого зарегистрирован импульс (азимут). На рис. 4 показан пример зарегистрированного импульса.

Сформированная таблица с параметрами зарегистрированных импульсов передается на сервер. После этого необходимо установить соответствие между зарегистрированными на разных пунктах импульсами и молниевыми разрядами, которые были их причиной. Зная расстояние между пунктами и скорость света, рассчитывается максимально допустимая разность времен  $\Delta t_{\max}$  между импульсами для всех возможных пар пунктов. В первой версии алгоритма поиск происходил следующим образом: отбиралось время импульса, зарегистрированного в первом пункте, и проводилось вычитание этого времени из всех времен импульсов, зарегистрированных во втором пункте. Аналогично сравниваются данные, полученные в первом и третьем пунктах. Далее выбирались такие временные разности ( $\Delta t_{1-2}$ ,  $\Delta t_{1-3}$ ,  $\Delta t_{2-3}$ ), которые по модулю не превышали максимально допустимое значение ( $\Delta t_{\max}$ ) для выбранной пары пунктов. Найденные времена импульсов записывались в таблицу. Недостаток данного алгоритма заключается в необходимости сравнения времени одного импульса с временами всех импульсов с других пунктов (их может быть больше 100000) на каждой итерации цикла, что, в свою очередь, сильно замедляет процесс обработки.

Поэтому был реализован новый алгоритм. Он состоит в следующем: выбирается время в первом пункте

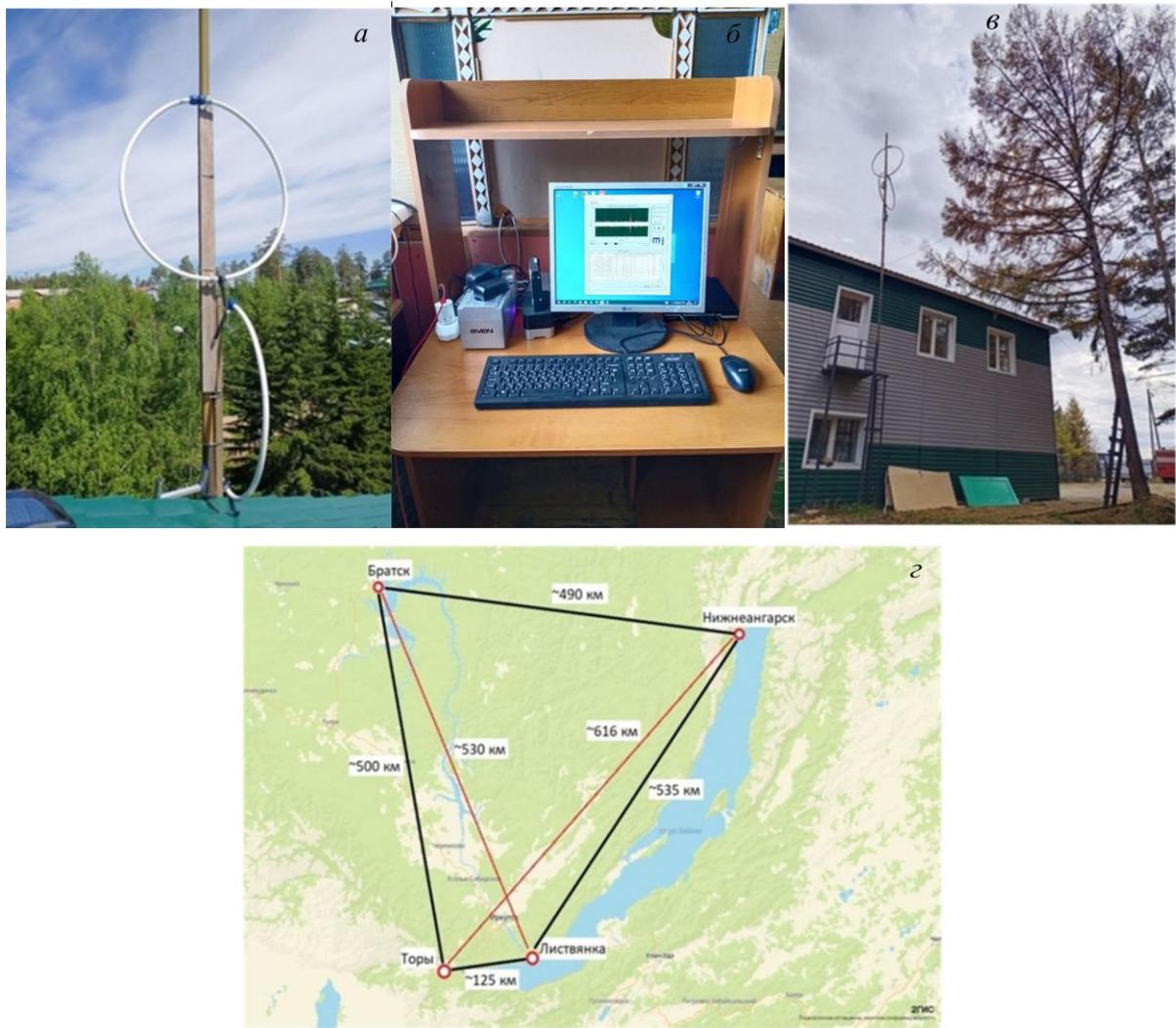


Рис. 3. Установленные антенны грозопеленгационного пункта Братска (а); рабочая станция грозопеленгационной сети (б); установленные антенны грозопеленгационного пункта п. Нижнеангарск (в); расположение грозопеленгационных пунктов на территории Иркутской области и Республики Бурятия по состоянию на октябрь 2024 г. (г)

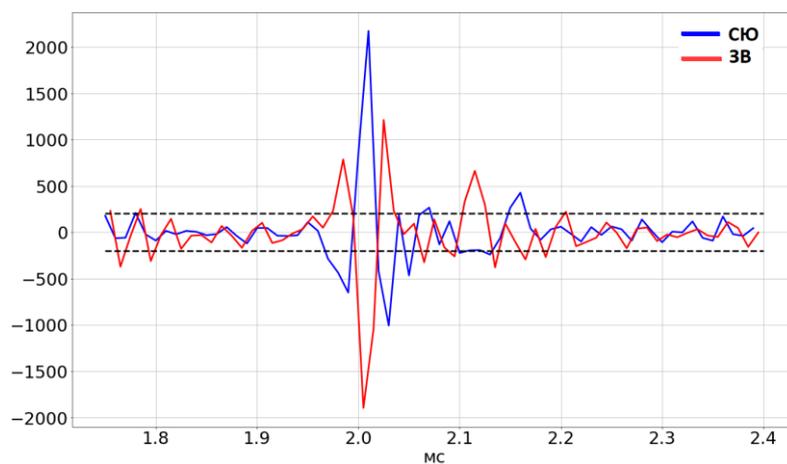


Рис. 4. Пример импульса от молниевое разряда. Данные с двух каналов север—юг (синяя кривая), запад—восток (красная кривая). Штриховая линия — пороговое значение амплитуды, по которому выделяется импульс. По горизонтали — временная развертка одного импульса (мс), по вертикали — амплитуда импульса в относительных единицах

и запускается цикл сравнения со временами во втором пункте. Как только  $\Delta t_{1-2} > \Delta t_{1-2max}$  сравнение останавливается, фиксируется время импульса во втором пункте, удовлетворяющее условию (если оно суще-

ствует), далее алгоритм переходит на сравнение с временами импульсов других пунктов с учетом вышеуказанного условия. В то же время проводится сохранение индекса времени импульса, при котором начинает

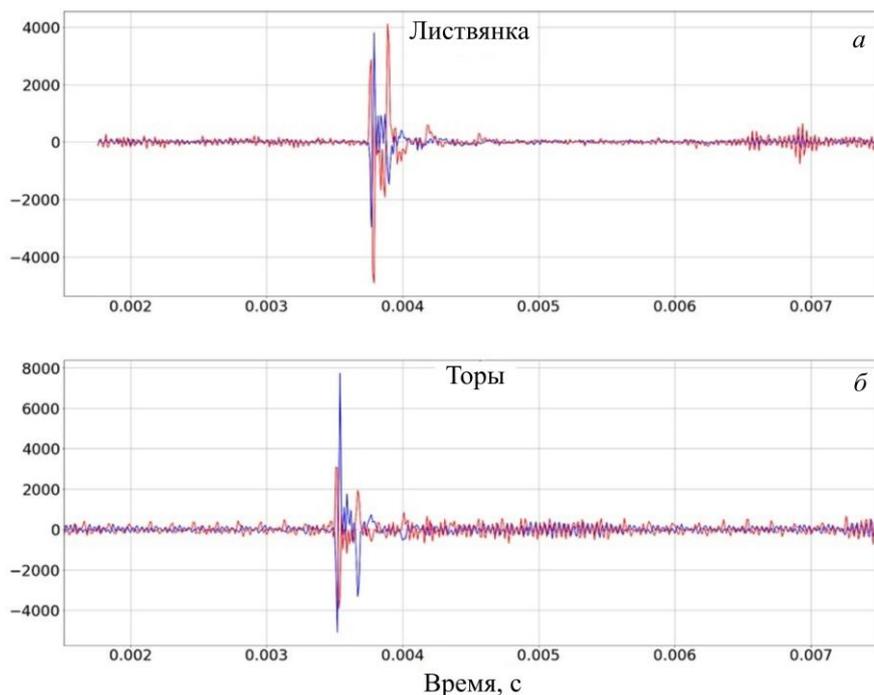


Рис. 5. Регистрация одного и того же атмосферика в двух пунктах: *a* — импульс, зарегистрированный в пункте Листвянка; *б* — в пункте Торы. По вертикали — амплитуда (отн. ед.)

выполняться условие  $-\Delta t_{1-2\max} < \Delta t_{1-2}$  и т. п. Такое действие позволяет на следующей итерации цикла начинать сравнение не с началом списка времен в другом пункте, а с определенного индекса списка. Таким образом, реализуется скользящее окно, для которого выполняется условие  $-\Delta t_{\max} < \Delta t < \Delta t_{\max}$ . Такой подход в алгоритме поиска импульсов позволяет ускорить обработку данных в десятки раз по сравнению с предыдущим вариантом алгоритма. Пример регистрации одного и того же разряда в двух пунктах показан на рис. 5.

На этапе определения принадлежности импульсов, зарегистрированных в разных пунктах, одному молниевому разряду важно контролировать синхронизацию времени между пунктами. В каждом она происходит с помощью GNSS-модуля, на который приходит корректирующий сигнал PPS со спутника. Но при лабораторных экспериментах было обнаружено, что иногда возможна некорректная привязка времени по сигналу PPS, из-за чего происходит смещение времени. Это может происходить при ухудшении ситуации приема сигнала от спутника или недостаточного количества видимых спутников. Поэтому был разработан дополнительный инструмент контроля и корректировки времени в пунктах. Поскольку программа регистрации записывает минутные файлы, проводится сравнение времен импульсов между всеми парами пунктов за одинаковые минуты. Выбирается время импульса в первом пункте и вычитается из времен импульсов во втором, разность сохраняется в массив. На следующем шаге цикла выбирается второй импульс в первом пункте и также вычитается из всех импульсов во втором пункте, зарегистрированных за эту минуту. Да-

лее строится поминутная гистограмма временных разностей для двух любых пунктов (рис. 6).

Если между пунктами нет смещения по времени, импульсы, которые относятся к одним и тем же молниевым разрядам, будут расположены в диапазоне временных разностей, ограниченных расстояниями между пунктами (рис. 6, б). Например, расстояние между Торами и Листвянкой составляет ~130 км, тогда максимальная временная разность между зарегистрированными импульсами в этих пунктах, чтобы считать эти импульсы принадлежащими одному и тому же молниевому разряду, должна быть не больше ~430 мкс. Если у нас есть смещение по времени (рис. 6, а), на данной карте разностей времени увидим смещение скопления импульсов. Используя временные карты для нескольких пунктов, можно определить, в каком из пунктов и на какую величину происходит смещение времени, чтобы в дальнейшем нивелировать это смещение вручную. После того как сформирована таблица с отсортированными импульсами, начинается этап восстановления координат молниевое разряда.

Восстановление может происходить по разным сценариям в зависимости от количества работающих пунктов в данный момент времени. При использовании одного или двух пунктов для осуществления пеленгации целесообразно применять амплитудно-фазовый метод [Козлов и др., 2010; Кононов и др., 1986]. Две рамочные (в описанной выше реализации ОНЧ-приемника — формы круга) антенны, расположенные ортогонально по направлениям север—юг и запад—восток соответственно позволяют по фазе сигналов определить направление (азимут), откуда пришла электромагнитная волна (рис. 7, а).

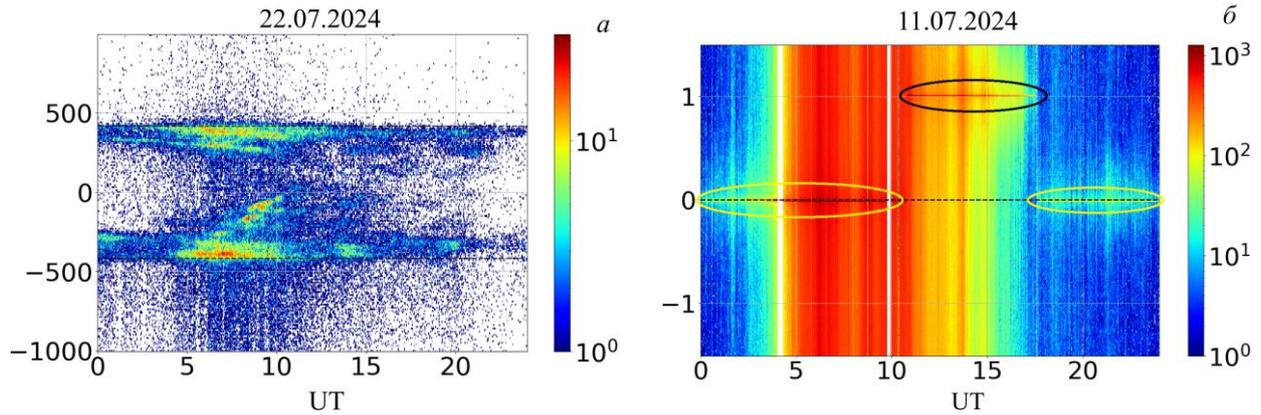


Рис. 6. Карта временных разностей для контроля смещения времени между пунктами Торы—Листвянка: *a* — случай без смещения по времени (по вертикальной оси время в микросекундах); *б* — пример со смещением по времени в одном из пунктов (по вертикальной оси время в секундах). Желтыми эллипсами выделены моменты времени без смещения, черный эллипс указывает на промежуток времени, когда в одном из пунктов произошла неправильная привязка по PPS

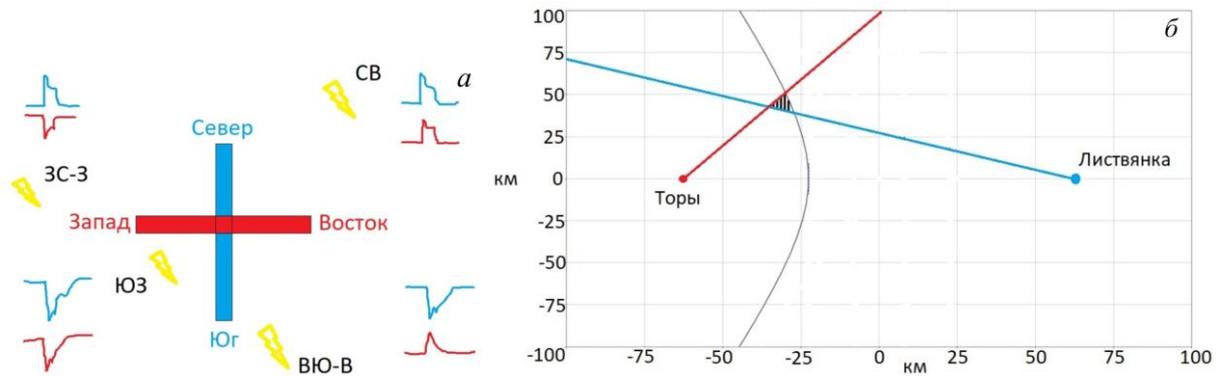


Рис. 7. Схематичный пример определения азимута зарегистрированного импульса с помощью двух рамочных ортогонально расположенных антенн (*a*). Цветом обозначены направления антенн и соответствующие этим направлениям условные формы принятых сигналов. Определение местоположения разряда гиперболически угломерным методом на примере двух пунктов (*б*). Красная точка — станция в Торях, синяя — пункт в Листвянке, заштрихованная область — возможное положение молниевго разряда

При этом амплитуда импульса  $A(r)$ , представленная как функция зависимости амплитуды импульса от расстояния до разряда, позволяет оценить дальность молнии. Таким образом, комбинируя два параметра (амплитуда, азимут) сигнала, можно определить координаты молниевго разряда, используя один пункт гронопеленгации. Но такой метод имеет свои недостатки, один из них — низкая точность определения местоположения.

Если известно время задержки сигнала относительно каждого пункта регистрации и направления (азимуты), по которым пришел импульс, можно провести определение геопозиции молниевго разряда в условиях работы двух гронопеленгационных пунктов. На рис. 7, *б* на примере двух пунктов (Торы, Листвянка) показано определение геопозиции разряда гиперболически угломерным методом [Кононов и др., 1986]. Временная задержка сигнала и расстояние между пунктами позволяет построить гиперболу, на которой могут располагаться возможные координаты молниевго разряда. Используя азимуты зарегистрированного электромагнитного импульса, можно построить направление на каждый пункт. Место пересечения прямых и гиперболы

дает область, в которой, с некоторой погрешностью, могут быть определены координаты молниевго разряда.

Три и более пунктов регистрации позволяют использовать метод Time Difference of Arrival (TDoA) [Prostor, 1971] для определения координат молниевго разряда по разности времен регистрации импульса в пунктах. Если гронопеленгационные пункты разнесены на расстояния, когда сферичность Земли оказывает значительный эффект на распространение электромагнитной волны (расстояния примерно  $>1000$  км) как, например, в гронопеленгационной сети WWLLN, нужно использовать метод Time of Group Arrival (TOGA) [Dowden et al., 2002]. Пункты в обсуждаемой сети удалены друг от друга на расстояние  $\sim 500$  км, поэтому в обработке используется метод TDoA. В этой работе представлены данные за 2023 г., когда работали три пункта регистрации. Обработка и анализ происходили с применением адаптации алгоритма аналитического решения системы гиперболических уравнений, описанный в [Takagi et al., 2022]. В его основе использована методика TDoA. Чтобы вычислить координаты молниевго разряда, достаточно знать разность времен регистрации элек-

тромагнитного импульса в трех пунктах (минимум) и координаты соответствующих пунктов:

$$\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}-\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}=R_{12}, \quad (1)$$

$$\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}-\sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2}=R_{13}, \quad (2)$$

$$\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}-\sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2}=R_{23}, \quad (3)$$

$$R_{12}=c(t_2-t_1), \quad (4)$$

$$R_{13}=c(t_3-t_1), \quad (5)$$

$$R_{23}=c(t_3-t_2), \quad (6)$$

где  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$  — координаты соответствующих пунктов регистрации;  $(x, y)$  — координаты искомого молниевое разряда;  $t_1, t_2, t_3$  — время регистрации импульса в соответствующем пункте;  $c$  — скорость света. Решая аналитически систему уравнений (1)–(3), получаем точку, которая является центром масс области, образованной пересечением трех гипербол (рис. 8). Таким образом, результатом описанного алгоритма будут координаты молниевое разряда.

### 3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Начало эксплуатации системы проходило в несколько этапов. Летом 2022 г. были введены два пункта около населенных пунктов Торы и Листвянка. Благодаря полученным данным проводилась настройка алгоритмов обработки, их усовершенствование, а также проверка работы временной синхронизации пунктов регистрации. Восстановление координат молниевых разрядов осуществлялось гиперболически угломерным методом. В 2023 г. в эксплуатацию был введен еще один пункт регистрации в Братске. Это позволило реализовать алгоритм восстановления координат молниевых разрядов с помощью метода TDoA, благодаря чему увеличилась точность определения координат молний.

Информацию, полученную с помощью описываемой грозопеленгационной сети, можно сопоставить со спутниковыми данными облачности для оценки валидности регистрируемых сведений (рис. 9). Карты облачности получены с использованием данных устройств со спутников NOAA 18 и 19. Даты на рис. 9 соответствуют времени снимка, сделанного спутником.

Синими точками показаны молниевые разряды, накопленные в интервале времени  $\pm 30$  мин от времени снимка. Диаметр синей точки зависит от мощности разряда. На изображениях видно наличие полей облачности, которые хорошо совпадают с положением молниевых разрядов. Такие области расположены преимущественно внутри треугольника Братск—Торы—Листвянка. При этом существуют места, где есть молниевые разряды, но нет облачности — это может быть связано с выбором большого интервала накопления молниевых разрядов, в течение которого положение облачности могло меняться. Кроме

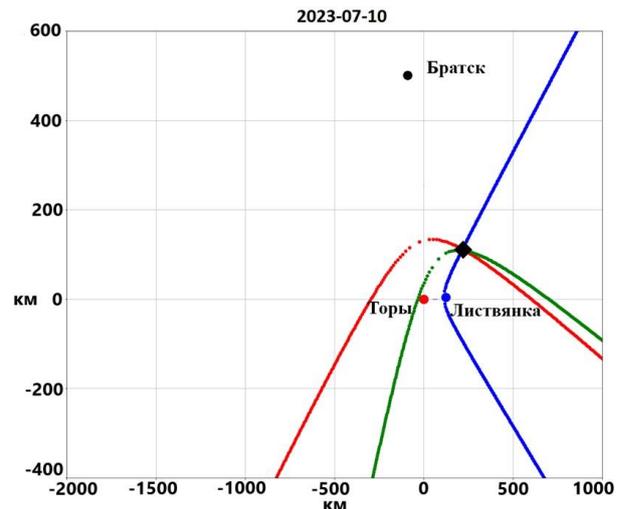


Рис. 8. Визуализация решения по методу TDoA для определения координаты молниевое разряда. Цветные точки — пункты регистрации: черная — Братск, красная — Торы, синяя — Листвянка, черный ромб — область пересечения гипербол

этого, на полученных картах прослеживается структурированная картина расположения молниевых разрядов в виде параллельных линий или расходящихся лучей. Чтобы объяснить эти особенности, было проведено моделирование работы грозопеленгационной сети.

Участок поверхности Земли  $1000 \times 1000$  км, содержащий пункты грозопеленгационной сети, был разбит на плоскую квадратную координатную сетку с шагом 10 км. Для этой площади рассчитывалось время, за которое сигнал молниевое разряда распространяется из каждого узла координатной сетки до каждого из трех пунктов регистрации. Полученные отрезки времени округляли в соответствии с временным разрешением АЦП (10 мкс), а затем их использовали для восстановления координат узлов сетки в соответствии с системой уравнений (1)–(6). Результаты такого моделирования показаны на рис. 10. Зеленые точки соответствуют координатам, в которых при моделировании система уравнений (1)–(6) имеет единственное решение. В остальных случаях два решения говорят о том, что у трех гипербол существует одновременно две точки пересечения и однозначного решения нет. Оранжевые точки, а также пустые области на рис. 10 соответствуют координатам, для которых из двух решений не удастся выбрать верное или алгоритм вообще не может найти решение системы уравнений (1)–(6).

Кроме этого, хорошо видно, что в областях, в которых ветви гипербол пересекаются под острыми углами, положение точек пересечения значительно отличается от координат регулярной квадратной сетки. Это происходит вследствие того, что временное разрешение 10 мкс для этих геометрических мест приводит к значительному искажению положения восстанавливаемых координат относительно исходных. Именно эта ситуация проявляется в особенностях положения реальных восстановленных молниевых разрядов на рис. 9.

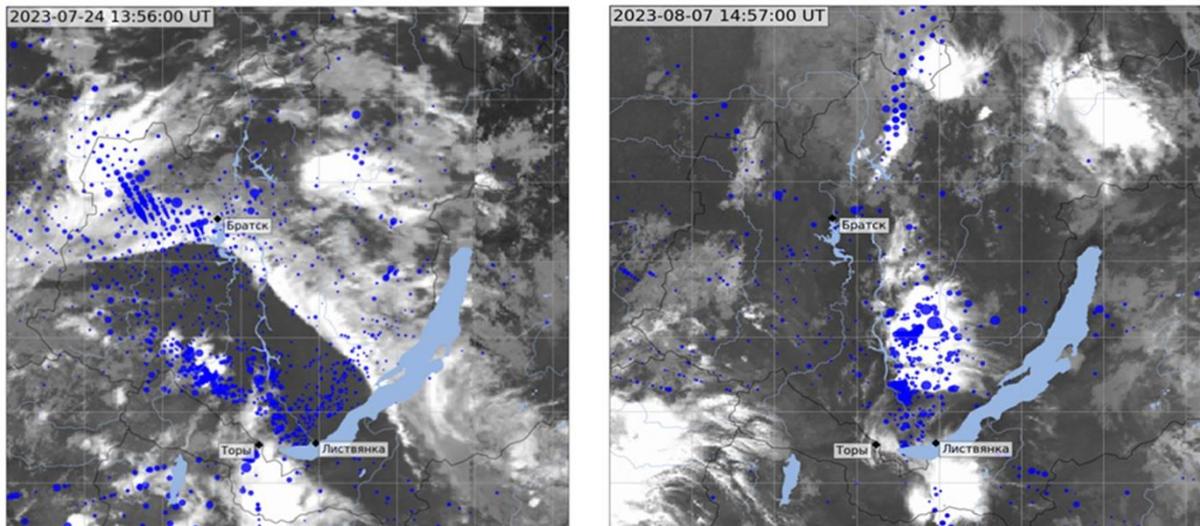


Рис. 9. Сопоставление расположения грозовых разрядов по данным грозопеленгационной сети (синие точки) с облачностью над Иркутской областью и Республикой Бурятия по данным спутников NOAA 18 и 19. Даты снимков указаны слева сверху

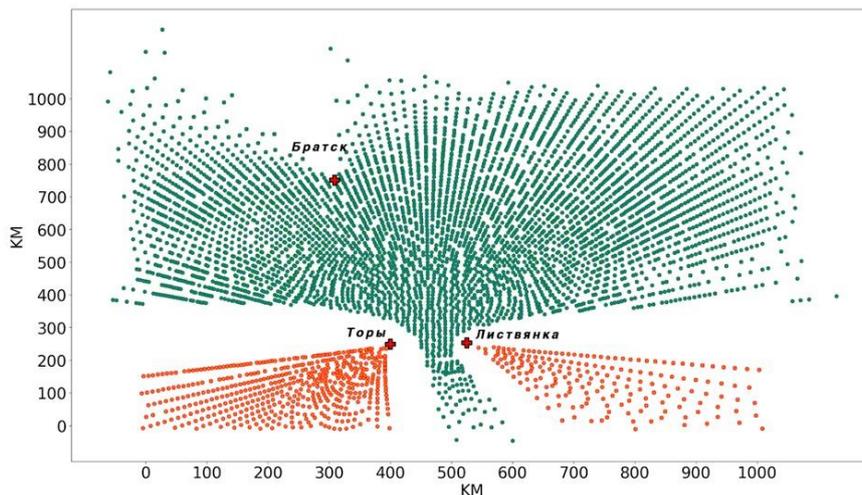


Рис. 10. Карта моделирования восстановления координат молниевых разрядов с помощью алгоритма на основе методики TDoA для трех пунктов. Зеленые точки — области, в которых алгоритм дает одно решение, оранжевые — два решения, но с помощью дополнительных условий можно выбрать однозначную координату. Красные плюсы — грозопеленгационные пункты, расстояния между которыми рассчитаны с учетом их реальных географических местоположений

С учетом описанных особенностей системы и алгоритмов обработки данных была получена статистика распределения молниевых разрядов за грозовой сезон 2023 г. (апрель–октябрь) (рис. 11). После прохождения всех этапов отладки сеть из трех пунктов полноценно заработала с июля.

Видно, что в среднем зарегистрированное количество разрядов за сезон составляет в сутки ~25000. На фоне средних значений ярко выделяется повышенная грозовая активность 16 июля, когда за сутки было зарегистрировано больше 200000 разрядов. Возможно, реальное количество разрядов за сутки немного больше, чем показывают полученные карты. Такой вывод можно сделать, потому что суммарное количество разрядов за сутки в каждом пункте отличается. Это связано с шумовой обстановкой на месте пунктов регистрации, а так как при обработке данных порог регистрации выставляется экспериментально и

выше шумов, количество импульсов для дальнейшего сравнения может быть разным.

По сведениям Гидрометеорологического научно-исследовательского центра РФ (ГМЦ) повышенная грозовая активность в Иркутской области 16 июля была связана с циклоном, центр которого наблюдался в р-не Братска. Центральная и южная часть области находилась под влиянием теплого сектора циклона. В средней и верхней атмосфере наблюдалась высотная ложбина, что дополнительно усиливало конвекцию в послеполуденные часы. На рис. 12 красные кружки — станции, на которых фиксировали грозы. Видно, что очаг грозовой активности располагался над территорией Иркутской области.

Суточные вариации количества молниевых разрядов были сопоставлены с индексом CAPE (Convective Available Potential Energy) (рис. 13), взятым из архива реанализа ERA5 [Hersbach et al., 2020]. CAPE является

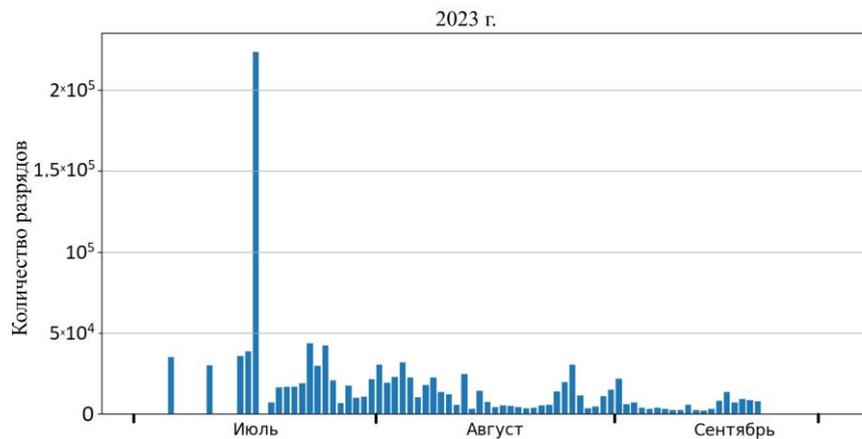


Рис. 11. Статистика распределения молниевых разрядов за грозовой сезон 2023 г.

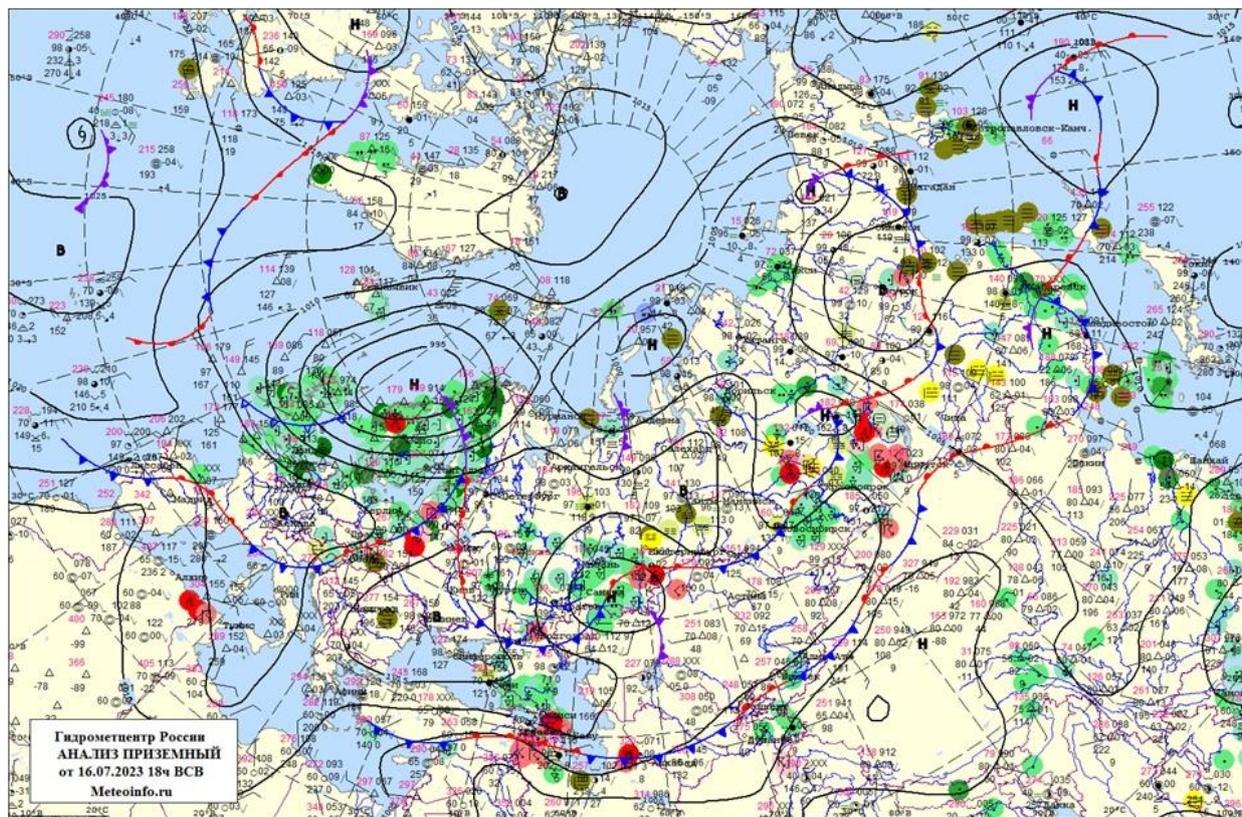


Рис. 12. Синоптическая приземная карта по данным ГМЦ 16 июля 2023 г. в 18:00 UTC [<https://meteoinfo.ru/mapsynop>]

мерой способности атмосферы поддерживать восходящее движение воздуха и представляет собой интегрированное количество работы, которую восходящая (положительная) сила плавучести будет выполнять над единицей массы воздуха, если она поднимется вертикально через всю атмосферу. Положительные значения *CAPE* указывают на то, что масса воздуха будет теплее окружающей его среды, т. е. конвективно-неустойчивой. Значениям *CAPE* 0–1000 Дж/кг соответствует слабая неустойчивость атмосферы. При этом вероятны слабые ливневые осадки. При значениях 1000–2500 Дж/кг отмечается умеренная неустойчивость с ливнями, грозами и шквалами, 2500–3500 Дж/кг — сильная неустойчивость, >3500 Дж/кг — очень сильная неустойчивость с сильными и очень сильными

грозами, шквалами и градом. Величины на рис. 13 рассчитывались для территории 50°–60° N и 95°–110° E соответственно. Для 16 июля был построен суточный ход для среднего значения *CAPE* указанной выше площади (красная штриховая кривая), а также для максимального значения *CAPE* (красная сплошная кривая). Ход для средних значений *CAPE* достаточно хорошо повторяет форму суточного распределения молниевых разрядов. Однако максимальное значение индекса в этом случае только в 12:00 UT превышает 1000 Дж/кг, что соответствует умеренной неустойчивости с ливнями, грозами и шквалами.

Это можно объяснить тем, что усреднение значений *CAPE* происходило по большому пространству. В свою очередь, для хода максимальных *CAPE*

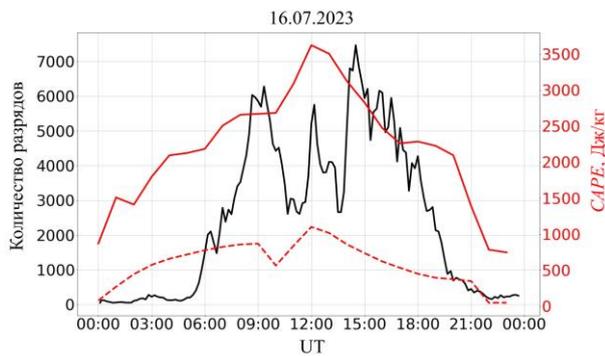


Рис. 13. Черная кривая — суточное распределение количества молниевых разрядов для 16 июля 2023 г., красная — изменение максимального значения CAPE, красная штриховая — изменение среднего значения CAPE для той же даты

наблюдается значение выше 3500 Дж/кг, что соответствует очень сильной неустойчивости с сильными и очень сильными грозами. Максимальное же количество молниевых разрядов было зафиксировано около 14:30 UT, значения максимального CAPE при этом все еще были высоки и говорили о наличии сильной конвективной неустойчивости. Для исследования более точной взаимосвязи вариации количества молниевых разрядов и CAPE необходимо проводить дополнительный анализ пространственного распределения разрядов.

Таким образом, можно сказать, что задачу регистрации региональной грозовой активности на приемлемом уровне можно решать при помощи малой сети ОНЧ-грозопеленгаторов, состоящих из ортогональных рамочных антенн для определения азимута электромагнитного сигнала от разряда молнии и оснащенных системами синхронизации на основе приемников ГНСС. Положение молниевых разрядов, регистрируемых внутри треугольника, образованного грозопеленгационными пунктами, восстанавливается с приемлемой точностью с помощью предложенных алгоритмов. На это указывает хорошее совпадение детектируемых разрядов с текущими полями облачности. Некоторым недостатком можно считать случаи, в которых алгоритмы дают неоднозначное определение положения разряда, поэтому в эксплуатацию был запущен четвертый пункт регистрации.

Искажения, возникающие вследствие низкого временного разрешения, можно устранить заменой АЦП на более скоростные или попробовать реализовать процедуру перецифровки сигнала интерполяционными методами. Устройство систем регистрации описываемой грозопеленгационной сети позволит провести ретроспективный анализ накопленной информации, поскольку при эксплуатации в каждом пункте сохраняется отрезок цифровой осциллограммы зарегистрированного импульса от разряда молнии.

Несмотря на некоторую неполноту сети из трех грозопеленгационных пунктов, информации, получаемой с ее помощью, достаточно, чтобы исследовать интегральные характеристики темпа возникновения молний и вариации параметров атмосферы. Показательный пример сопоставления интегрального числа разрядов со статистическими характеристиками индекса CAPE (см. рис. 13) говорит о том, что

и другие интегральные параметры атмосферы над регионом, охваченном грозопеленгационной сетью, определяющие грозовую активность, или наоборот, подверженные ее воздействию (химический состав малых компонент, концентрация аэрозоля, концентрация ионов, ионосферная плазма и т. д.) могут быть исследованы подобным образом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом представленной работы является ввод в эксплуатацию на территории Иркутской области и Республики Бурятия экспериментальной грозопеленгационной сети на основе ОНЧ-приемников. Создание и сборка оборудования, реализация алгоритмов обработки и интерпретации получаемых данных были реализованы силами научных групп ИСЗФ СО РАН и ИрННТУ. Разработанные ОНЧ-приемники сети соответствуют уровню оборудования, используемого в России и за рубежом при регистрации молниевых разрядов.

Положение пунктов сети было выбрано с учетом анализа грозовой активности на Байкальской природной территории и математического моделирования восстановления координат молниевых разрядов при изменении расположения пункта регистрации.

В ходе работы подробно были рассмотрены методики и особенности получения координат молниевых разрядов с помощью двух и трех грозопеленгационных пунктов. Было показано, что положение молниевых разрядов восстанавливается с приемлемой точностью с помощью предложенных алгоритмов, если регистрируемый разряд происходит внутри треугольника, образованного грозопеленгационными пунктами. При этом были отмечены случаи неоднозначного определения алгоритмами положения разряда, поэтому в эксплуатацию был запущен четвертый пункт регистрации. В дальнейшем планируется расширить сеть до шести пунктов для окончательного решения проблемы пространственной неопределенности. Построение карт с координатами молниевых разрядов было итогом работы на текущем этапе.

Еще одной задачей является реализация автоматизированного процесса обработки с возможностью получения карт молниевых разрядов с периодом в несколько десятков минут. Натурные результаты показали, что разработанное программное обеспечение позволяет реализовать процесс получения карт молниевых разрядов каждые 10–15 мин. Таким образом, помимо ретроспективной обработки данных и решения научных задач, можно будет использовать данные описываемой грозопеленгационной сети в качестве дополнительного инструмента мониторинга грозовой активности в регионе почти в реальном времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия № 075-ГЗ/С3569/278).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аджиев А.Х., Стасенко В.Н., Тапасханов В.О. Система грозопеленгации на Северном Кавказе. *Метеорология и гидрология*. 2013, № 1, с. 2–11.
- Бычков И.В., Гладкочуб Д.П., Ружников Г.М. *Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мо-*

- иторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории. Российская Академия наук Сибирское отделение Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова. Интеграционные проекты СО РАН. Новосибирск. 2022, т. 48, 345 с. DOI: [10.53954/9785604788943](https://doi.org/10.53954/9785604788943).
- Васильев Р.В., Тащилин М.А., Татарников А.В. Сопоставление динамики термальных точек и зарегистрированных лесных пожаров с динамикой молниевых разрядов на Байкальской природной территории. *Вычислительные технологии*. 2023, т. 28, № 6, с. 37–45. DOI: [10.25743/ICT.2023.28.6.004](https://doi.org/10.25743/ICT.2023.28.6.004).
- Горлова И.Д. 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 им. А.Ф. Можайского*. 2020, с. 211–213.
- Каранина С.Ю., Кочеева Н.А., Каранин А.В. Пространственное и временное распределение молниевых разрядов по территории Алтае-Саянского региона. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. 2017, № 4-1 (196), с. 128–138. DOI: [10.23683/0321-3005-2017-4-1-128-138](https://doi.org/10.23683/0321-3005-2017-4-1-128-138).
- Козлов В.И., Маркова А.Ю., Шабаганова С.Н. Погрешности методов наблюдения грозовых разрядов одно- и двухпунктовыми системами грозолокации. *Наука и образование*. 2010, № 1, с. 7–12.
- Козлов В.И., Тарабукина Л.Д., Васильев А.А. Развитие системы грозопеленгации в Якутии. *Материалы IX Всероссийской научной конференции по атмосферному электричеству: Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Санкт-Петербург*. 2023, с. 278–287.
- Кононов И.И., Петренко И.А., Снегуров В.С. *Радиотехнические методы местоопределения грозовых очагов*. Л.: Гидрометеиздат, 1986, 220 с.
- Московенко 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.
- Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Пустовалов К.Н., Громова А.В. Грозовая активность над Западной Сибирью. *Геосферные исследования*. 2022, № 4, с. 123–134. DOI: [10.17223/25421379/25/8](https://doi.org/10.17223/25421379/25/8).
- Сарафанов Ф.Г., Шаталина М.В., Шлюгаев Ю.В., Марев Е.А. Современные системы локации молний: глобальные и региональные аспекты. *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2024, т. 10, № 1, с. 76–92. DOI: [10.21513/2410-8758-2024-1-76-92](https://doi.org/10.21513/2410-8758-2024-1-76-92).
- Селиванов В.Н., Бурцев А.В., Ивонин В.Н., Колобов В.В. Анализ молниевой активности в Мурманской области в 2021 году. *Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки*. 2022, т. 13, № 3, с. 59–67. DOI: [10.37614/2949-1215.2022.13.3.006](https://doi.org/10.37614/2949-1215.2022.13.3.006).
- Тарабукина Л.Д., Козлов В.И. Сравнение измерений нескольких систем регистрации молниевых радиоимпульсов. *Вестник СВФУ*. 2018, т. 64, № 2, с. 77–86.
- Ткачев И.Д., Васильев Р.В., Белоусова Е.П. Кластерный анализ молниевых разрядов по данным грозопеленгационной сети «Верей-МР». *Солнечно-земная физика*. 2021, т. 7, № 4, с. 92–99. DOI: [10.12737/szf-74202109](https://doi.org/10.12737/szf-74202109) / Tkachev I.D., Vasilyev R.V., Belousova E.P. Cluster analysis of lightning discharges: Based on Vereya-MR network data. *Solar-Terrestrial Physics*. 2021, vol. 7, iss. 4, pp. 85–92. DOI: [10.12737/stp-74202109](https://doi.org/10.12737/stp-74202109).
- Филиппов А.Х. *Грозы Восточной Сибири*. Л.: Гидрометеиздат, 1974, 75 с.
- Chen Z., Qie X., Sun J., et al. Evaluation of Fengyun-4A Lightning Mapping Imager (LMI) Performance during Multiple Convective Episodes over Beijing. *Remote Sens*. 2021, vol. 13, no. 9, 1746. DOI: [10.3390/rs13091746](https://doi.org/10.3390/rs13091746).
- Cummins K.L., Krider E.P., Malone M.D. The U.S. National Lightning Detection NetworkTM and applications of Cloud-to-Ground lightning data by electric power utilities. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 1998, vol. 40, no. 4, pp. 465–480. DOI: [10.1109/15.736207](https://doi.org/10.1109/15.736207).
- Dillinger M., Madani K., Alonistiotti N. Software defined radio: architectures, systems, and functions. Wiley. 2003, 454 p.
- Dowden R.L., Brundell J.B., Rodger C.J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002, vol. 64, no. 7, pp. 817–830. DOI: [10.1016/S1364-6826\(02\)00085-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00085-8).
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020, vol. 146, pp. 1999–2049. DOI: [10.1002/qj.3803](https://doi.org/10.1002/qj.3803).
- Lay E.H., Holzworth R.H., Rodger C.J., et al. WWLL global lightning detection system: Regional validation study in Brazil. *Geophys. Res. Lett.* 2004, vol. 31, L03102. DOI: [10.1029/2003GL018882](https://doi.org/10.1029/2003GL018882).
- Naccarato K.P., Pinto O. Jr., Garcia S.A.M., et al. Validation of the new GLD360 dataset in Brazil: First results. Preprints. International Lightning Detection Conference. *Vaisala*. 2010, pp. 1–6.
- Orville R.E., Huffines G.R., Burrows W.R., et al. The North American lightning detection network (NALDN) — First results: 1998–2000. *Monthly Weather Review*. 2002, vol. 130, no. 8, pp. 2098–2109. DOI: [10.1175/1520-0493\(2002\)130<2098:TNALDN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<2098:TNALDN>2.0.CO;2).
- Proctor D.E. A hyperbolic system for obtaining VHF radio pictures of lightning. *J. Geophys. Res.* 1971, vol. 76, no. 6, pp. 1478–1489. DOI: [10.1029/JC076i006p01478](https://doi.org/10.1029/JC076i006p01478).
- Qie X., Yuan S., Chen Z., et al. Understanding the dynamical-microphysical-electrical processes associated with severe thunderstorms 535 over the Beijing metropolitan region. *Science China Earth Sciences*. 2020, vol. 64, pp. 10–26. DOI: [10.1007/s11430-020-9656-8](https://doi.org/10.1007/s11430-020-9656-8).
- Takagi J., Kanazawa H., Ichikawa K., Mitamura H. A simple intuitive method for seeking intersections of hyperbolas for acoustic positioning biotelemetry. *PLOS One*. 2022, vol. 17, no. 11, e0276289. DOI: [10.1371/journal.pone.0276289](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0276289).
- Uman M.A. *The Lightning Discharge*. International Geophysics Series. Orlando: Academic Press. 1987, vol. 39, 390 p.
- Zhang D., Cummins K.L., Lang T.J., et al. Performance evaluation of the Lightning Imaging Sensor on the International Space Station. *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2023, vol. 40, pp. 1063–1082. DOI: [10.1175/JTECH-D-22-0120.1](https://doi.org/10.1175/JTECH-D-22-0120.1).
- URL: <https://www.blitzortung.org/> (дата обращения 12 декабря 2024 г.).
- URL: <https://www.eumetsat.int/features/animations-europes-first-lightning-imager> (дата обращения 12 декабря 2024 г.).
- URL: <https://meteoinfo.ru/mapsynop> (дата обращения 12 декабря 2024 г.).
- URL: <http://www.alwes.ru> (дата обращения 12 декабря 2024 г.).
- Как цитировать эту статью:*  
Ткачев И.Д., Васильев Р.В., Зоркальцева О.С., Поletaев А.С., Ченский А.Г., Васильев К.М., Салимгореев Р.Р. Экспериментальная распределенная сеть ОНЧ-приемников для мониторинга грозовой активности на Байкальской природной территории. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 2, с. 112–123. DOI: [10.12737/szf-112202510](https://doi.org/10.12737/szf-112202510).