

---

---

## КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ ПО ДАННЫМ ГРОЗОПЕЛЕНГАЦИОННОЙ СЕТИ «ВЕРЕЯ-МР»

### CLUSTER ANALYSIS OF LIGHTNING DISCHARGES: BASED ON VEREYA-MR NETWORK DATA

---

---

**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  
Иркутский государственный университет,  
Иркутск, Россия*

**Е.П. Белоусова**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, elenapbel@iszf.irk.ru  
Иркутский государственный университет,  
Иркутск, Россия*

**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  
Irkutsk State University,  
Irkutsk, Russia*

**E.P. Belousova**

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

---

---

**Аннотация.** Мониторинг грозовой активности помогает решать множество задач: защита объектов инфраструктуры, предупреждение об опасных явлениях, связанных с интенсивными осадками, исследование условий возникновения гроз и степени их влияния на человеческую деятельность, а также влияния грозовой активности на формирование околоземного пространства. В работе исследованы характеристики грозовых ячеек методом кластерного анализа. За основу взяты данные грозопеленгационной сети «Верее-МР», накопленные за период с 2012 по 2018 г. Рассматриваемая в данной работе грозопеленгационная сеть «Верее-МР» относится к сетям, работающим в ОНЧ-НЧ-диапазоне (длинные и сверхдлинные радиоволны). Пункты приема, оснащенные регистрирующей аппаратурой, системами первичной обработки информации, системами связи, устройствами позиционирования и формирования сигналов точного времени, использующими глобальные спутниковые навигационные системы, расположены по всей территории России. В исследуемых долготно-широтных распределениях грозовой активности, возможно, проявляется зависимость от местоположения регистрирующих устройств. Проведено сравнение поведения гроз на всей территории РФ и на Байкальской природной территории. Определено, что над Байкальским регионом мощность гроз меньше. Полученный суточный ход грозовых ячеек соответствует данным других подобных работ. В остальных характеристиках гроз различия между исследуемыми регионами не наблюдается. Это может быть связано с особенностями метода анализа. На основе результатов данной работы предложены места размещения новых пунктов собственной грозопеленгационной сети и проведено рассмотрение дополнительных методов кластерного анализа.

**Ключевые слова:** грозы, кластерный анализ, молниевые разряды.

**Abstract.** Monitoring thunderstorm activity can help you solve many problems such as infrastructure facility protection, warning of hazardous phenomena associated with intense precipitation, study of conditions for the occurrence of thunderstorms and the degree of their influence on human activity, as well as the influence of thunderstorm activity on the formation of near-Earth space. We investigate the characteristics of thunderstorm cells by the method of cluster analysis. We take the Vereya-MR network data accumulated over a period from 2012 to 2018 as a basis. The Vereya-MR network considered in this paper is included in networks operating in the VLF-LF range (long and super-long radio waves). Reception points equipped with recording equipment, primary information processing systems, communication systems, precision time and positioning devices based on global satellite navigation systems are located throughout Russia. In the longitudinal-latitude thunderstorm distributions of interest, the dependence on the location of recording devices might be manifested. We compare the behavior of thunderstorms on the entire territory of the Russian Federation with those in the Baikal natural territory. We have established the power of thunderstorms over the Baikal region is lower. The daily variation in thunderstorm cells we obtained is consistent with the data from other works. There are no differences in other thunderstorm characteristics between the regions under study. This might be due to peculiarities of the analysis method. On the basis of the work performed, we propose sites for new points of our own lightning location network, as well as additional methods of cluster analysis.

**Keywords:** thunderstorms, cluster analysis, lightning discharges.

## ВВЕДЕНИЕ

Прогноз экстремальных погодных явлений, связанных с развитием конвективной неустойчивости в атмосфере, до настоящего времени остается актуальным в связи с проблемой глобального изменения климата [Константинова, Горбатенко, 2016]. Образование гроз и ливней является результатом сложного взаимодействия атмосферных процессов с подстилающей поверхностью. Несмотря на довольно развитую сеть метеорологических станций, оснащенных современным оборудованием, текущий уровень прогнозирования таких опасных явлений, как грозы, до сих пор остается на уровне оправданности 50–70 %. Горизонтальные размеры конвективных зон во много раз меньше расстояния между станциями, на которых они регистрируются. Покрытие поверхности Земли наблюдательными станциями далеко от равномерного.

Развитие и использование сети грозопеленгационных станций будет представлять интерес для решения практических задач мониторинга и предупреждения опасных явлений, связанных с интенсивными осадками и разрядами атмосферного электричества: лесными пожарами, наводнениями, селями, повреждениями энергетической и транспортной инфраструктуры и пр. Мониторинг молниевой активности важен для своевременной защиты от повреждений линий электросетей при помощи громоотводов, для безопасности авиаперелетов, навигации морских судов, также для исследований в таких направлениях, как метеорология, гидрология, геология и т. д. [Панюков и др., 2003]. Спектр научных задач, которые могут решаться путем анализа данных сетей грозопеленгаторов, достаточно широк, что актуально для научных исследований, выполняющихся различными организациями. Эти устройства могут использоваться для исследования как самих гроз, условий их возникновения и степени их влияния на человеческую деятельность, так и свойств конвективных облаков, находящихся под искусственным воздействием [Синькевич и др., 2018], влияния литосферных процессов на распространение радиоволн [Аргунов, 2018] и пр. Грозовая активность играет большую роль в формировании состояния околоземного космического пространства. Грозорегистрирующие сети позволяют получать фактические данные о влиянии процессов, обусловленных солнечно-земными связями, на дневные и сезонные вариации атмосферного электрического поля в регионах. Существует ряд работ, в которых показано, что после разрядов молнии электрическое поле облаков, заряженных униполярно, вызывает возрастание концентрации электронов на высотах 95–100 км, что должно приводить к заметному увеличению ошибок позиционирования глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [Мареев и др., 2019]. Феномен атмосферного электричества в задачах исследования космической погоды занимает значимое место [Yang et al., 2018], и существуют предложения использовать грозопеленгационные сети для исследования влияния электромагнитных

импульсов молниевых разрядов на электроны солнечного ветра, захваченные в магнитное поле Земли [Блюх, 1997; Ripoll et al., 2019].

Сети грозопеленгаторов, как правило, состоят из однотипных приемников импульсных радиосигналов, расположенных на поверхности Земли на некотором удалении друг от друга [Панюков и др., 2003; Кононов, Юсупов, 2004; Шабаганова, Козлов, 2010; Шабаганова и др., 2012; Московенко и др., 2012]. Расстояние зависит от используемого частотного диапазона радиоволн — ОНЧ или УКВ. Сети, эксплуатирующие диапазон ОНЧ, состоят из узлов, разнесенных на сотни и тысячи километров. Это позволяет осуществлять мониторинг грозовой активности на значительных территориях без существенных затрат на оборудование. Однако существенным ограничением на использование этих сетей является слабая чувствительность к межоблачным и внутриоблачным разрядам, которые довольно успешно регистрируются в УКВ-диапазоне. Вследствие сильного ослабления и искажения фазовой картины радиоизлучения этого диапазона при распространении на большие расстояния, грозопеленгационные пункты, составляющие УКВ-сеть, должны находиться в прямой видимости. УКВ-устройства способны вести регистрацию внутриоблачных и межоблачных разрядов и осуществлять точное позиционирование разрядов, однако для покрытия значительной территории требуется большое количество узлов сети. Немаловажным фактором для успешной работы является система синхронизации узлов сети. Для регистрации короткого (миллисекунды) электромагнитного импульса необходимо, чтобы счетчики времени на регистрирующих устройствах были синхронизированы с точностью, значительно (по крайней мере на порядок) превышающей время распространения электромагнитного сигнала между отдельными узлами сети ( $3 \cdot 10^{-6}$  с). В современных сетях эта задача решается при помощи систем спутниковой навигации [Тарабукина, Козлов, 2018].

Грозопеленгационная сеть «Верей-МР» [Московенко и др., 2012] относится к сетям, работающим в ОНЧ/НЧ-диапазоне (длинные и сверхдлинные радиоволны). Пункты приема, оснащенные регистрирующей аппаратурой, системами первичной обработки информации, системами связи, устройствами позиционирования и формирования сигналов точного времени, используемыми ГНСС, расположены по всей территории России (см. рис. 2. в [Московенко и др., 2012]). Координацию работы осуществляет единый центр, в котором на основе поступающих от пунктов регистрации оперативных сведений производится вычисление положения молниевых разрядов и ведение базы данных разрядов для дальнейшей передачи заинтересованным пользователям.

Целями настоящей работы являются: исследование возможности использования данных сети «Верей-МР» для получения физических характеристик грозовых ячеек (скорость распространения, длительность, направление движения гроз и т. д); получение информации о грозовой активности на Байкальской природной территории; поиск локальных особенностей для определения оптимального места

расположения пунктов регистрации молниевых разрядов новой грозопеленгационной сети.

## МЕТОДИКА И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Поскольку грозы являются природными образованиями, в некоторой степени локализованными во времени и пространстве, то как для снижения количества обрабатываемой информации, так и для получения характеристик самих гроз будет полезно проводить анализ не отдельных зарегистрированных сетей молниевых разрядов, а их совокупностей, наблюдавшихся внутри некоторой области пространства за конечный интервал времени. Для этой цели удобно использовать анализ кластеров молниевых разрядов. Кластерный анализ — один из методов обобщенного описания совокупности большого числа случайных событий. Он применяется для выделения и описания событий, сгруппированных по какому-либо признаку, в данном случае по сосредоточению электрических разрядов на некоторой ограниченной пространственной области в пределах грозового образования (кластера, грозового очага). Наблюдая за выделенным таким образом кластером, можно определить его параметры — мощность, площадь и скорость перемещения. Исследование гроз с помощью кластерного анализа не ново и ранее было проведено в работах Кононова И.И. [Кононов, Юсупов, 2004], Шабагановой С.Н. [Шабаганова, Козлов, 2010; Шабаганова и др., 2012] и др., откуда были взяты основные идеи для проведения кластерного анализа по данным сети грозопеленгации «Верей-МР». Исходными параметрами сети «Верей-МР» являются географические координаты разряда, время его возникновения с точностью до миллисекунды и максимальная амплитуда напряженности электрической составляющей электромагнитного импульса от разряда молнии. Этих сведений достаточно, чтобы провести локализацию групп событий такого рода в пространстве и во времени.

Узловым моментом исследования является выбор наиболее подходящего максимального расстояния между разрядами, необходимого для определения их принадлежности к одному кластеру. Учитывая, что средняя скорость движения грозовых ячеек находится в пределах 30–40 км/ч, а средний радиус грозового очага составляет около 20–40 км [Scholkmann et al., 2012; Синькевич и др., 2018], было сформулировано условие, что в текущий момент времени грозовой очаг представляет собой некую совокупность молниевых разрядов, в которой в течение часа происходит не менее шести разрядов с максимальным удалением друг от друга на расстояние не более 75 км. Поскольку в работе исследуются общие статистические характеристики без требования точной координатной привязки (до километра), нет необходимости использовать точную модель Земли (геоид). Предполагается, что Земля сферическая, поэтому расстояние между разрядами вычислялось по хорошо известной формуле

$$\cos(d) = \sin(\varphi_1)\sin(-\varphi_2) + \cos(\varphi_1)\cos(-\varphi_2)\cos(\lambda_1 - \lambda_2), \quad (1)$$

где  $\varphi$  — широта;  $\lambda$  — долгота;  $d$  — расстояние между точками в радианах, которое в случае сферической Земли можно довольно просто перевести в километры:  $b = dR$ , где  $R$  — радиус Земли. Анализируя таким образом набор молниевых разрядов, произошедших в течение часа относительно одного разряда, и повторяя эту процедуру для каждого разряда из всей базы данных, можно выделить грозовые кластеры, живущие от нескольких минут до нескольких часов. Полученные кластеры можно характеризовать в пространстве и времени при помощи их местоположения — глобального центра масс кластера и времен их возникновения и окончания — времен возникновения первого и последнего разрядов в кластере соответственно. Кроме того, можно ввести понятие мощности грозового кластера как количества грозовых разрядов в единицу времени, регистрируемых на протяжении его времени жизни. Разница в положении центра масс кластера на протяжении его времени жизни характеризует его смещение.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Доступная база данных молниевых разрядов «Верей-МР» содержит записи с 2012 по 2018 г. Для этого периода времени по вышеописанной методике был получен набор грозовых кластеров. Мы полагаем, что каждый кластер в этом наборе представляет отдельную грозовую ячейку. Несмотря на то, что алгоритм отбора кластеров может быть недостаточно эффективным и содержать в себе некоторые неточности, тем не менее полученная на основе его работы информация в целом должна корректно характеризовать свойства грозовых ячеек. Анализ характеристик полученных грозовых ячеек выполнялся как для всей зоны покрытия грозопеленгационной сети, так и для Байкальского региона — это область с координатами по долготе 100°–113° E и по широте 50°–57° N.

### Долготно-широтная зависимость

Положение в пространстве грозовой ячейки можно определить как среднее значение координат всех молниевых разрядов, присутствующих в данном кластере. Для исследуемых регионов были построены распределения кластеров по широте и долготе (рис. 1).

По долготе наблюдается неравномерное распределение грозовых кластеров. Такая ситуация может быть связана с различной плотностью покрытия пространства приемными антеннами грозопеленгационной сети, вследствие чего может нарушаться непрерывная работа системы. В то же время неравномерность распределения грозовых кластеров может быть обусловлена особенностями рельефа: на долготах, где наблюдается уменьшение количества кластеров, расположены горные цепи — Уральские горы (60° N, 60° E) и Восточный Саян (53°49' N, 97°35' E), которые могут оказывать влияние на формирование грозовых ячеек. Область покрытия сети «Верей-МР» локализована в диапазоне от 43° N (Владивосток) до 64° N (Архангельск) (подробное распо-

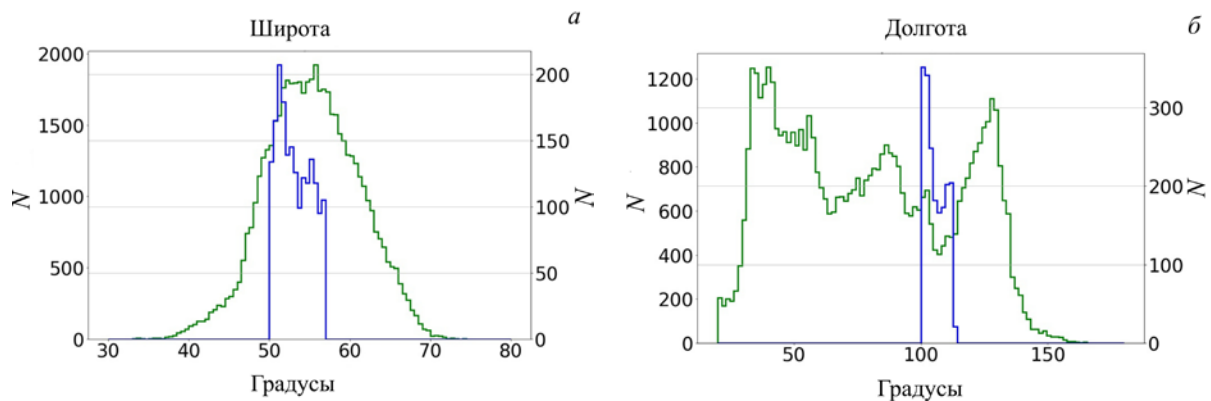


Рис. 1. Распределения грозных кластеров по широте (а) и долготе (б) за период 2012–2018 гг.: зеленый контур — по всей территории РФ (ось ординат слева), синий — по Байкальской природной территории (ось ординат справа). Здесь и далее  $N$  — количество кластеров

ложение станций приема показано на рис. 2 в работе [Московенко и др., 2012]), что приводит к наблюдаемому гауссоподобному широтному распределению кластеров (рис. 1, а) с максимумом около  $55^\circ N$ . По этой же причине невозможно наблюдать увеличение количества кластеров при движении к экватору. Если посмотреть на карту зависимости количества грозных кластеров от координат (рис. 2, а), то можно выделить следующие особенности:

1. При движении на восток максимум грозных кластеров смещается по широте в сторону более низких широт: с  $60^\circ$  на западе в районе Московской области до  $50^\circ$  на Дальнем Востоке.

2. Если рассматривать распределение кластеров по долготе (рис. 2, а), то наблюдаются три области увеличения количества кластеров: на  $40^\circ$ , от  $80^\circ$  до  $90^\circ$  и около  $130^\circ E$ .

3. В районе Москвы и Московской области наблюдается максимум грозных очагов. Это может быть связано с наибольшим количеством регистрирующих устройств, а также с большим временем их бесперебойной работы.

Для Байкальского региона долготное распределение грозных кластеров повторяет тренд распределения кластеров по всей стране (рис. 1, б, синий контур). В широтном распределении есть отклонения от общей картины: по всей стране кластеры распределены равномерно с  $50^\circ$  по  $60^\circ N$ , тогда как в Байкальском регионе при движении к северу наблюдается спад количества гроз. На рис. 2, б видно, что в Байкальском регионе существует область  $50^\circ$ – $53^\circ$  по широте и  $100^\circ$ – $104^\circ$  по долготе, где количество кластеров больше, чем на всей остальной территории региона. Преимущественно в этом районе расположено предгорье Саян. В области пониженного количества кластеров или полного их отсутствия расположено оз. Байкал ( $51^\circ$ – $55^\circ N$ ,  $103^\circ$ – $109^\circ E$ ). Это может указывать на то, что грозы активнее образуются в предгорьях, чем над водоемами. Мировая статистика гроз показывает, что над океанами грозы образуются на 30 % реже, чем над сушей [Rusroft et al., 2000].

Чтобы более точно определить территориальные максимумы грозной активности и подробно проанализировать эти области, требуется:

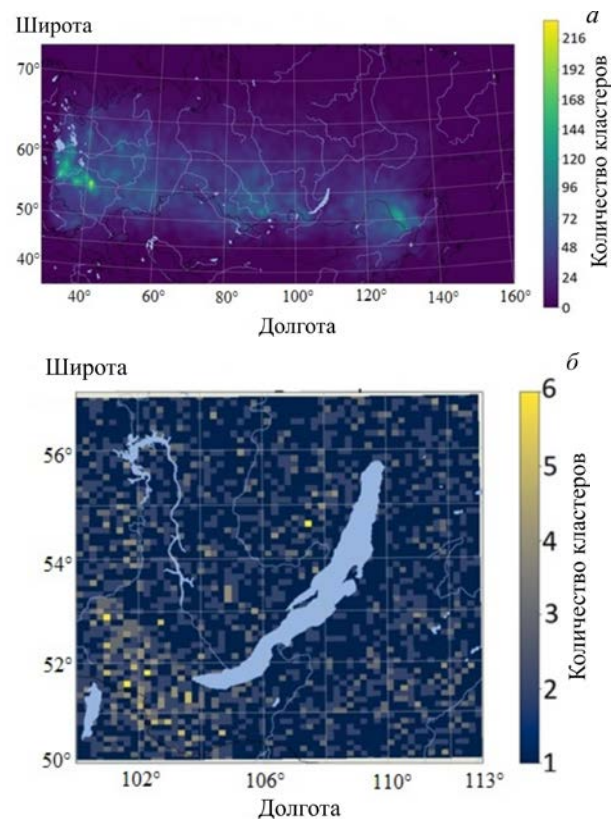


Рис. 2. Распределения кластеров по всей территории РФ (а) и по Байкальской природной территории (б) за 2012–2018 гг. Интенсивностью цвета обозначено количество кластеров

а) восстановление регулярных наблюдений гроз в регионе;

б) эффективная сеть из нескольких грозопеленгационных приемников, расположенных на территории региона.

### Временные характеристики грозных кластеров, размеры, перемещение

Чтобы оценить размер грозной ячейки, необходимо вычислить расстояние между молниевыми разрядами и центром масс ячейки. Под центром масс подразумевается точка с усредненными координатами всех молниевых разрядов по долготе и широте для данного кластера. Размер кластера опреде-

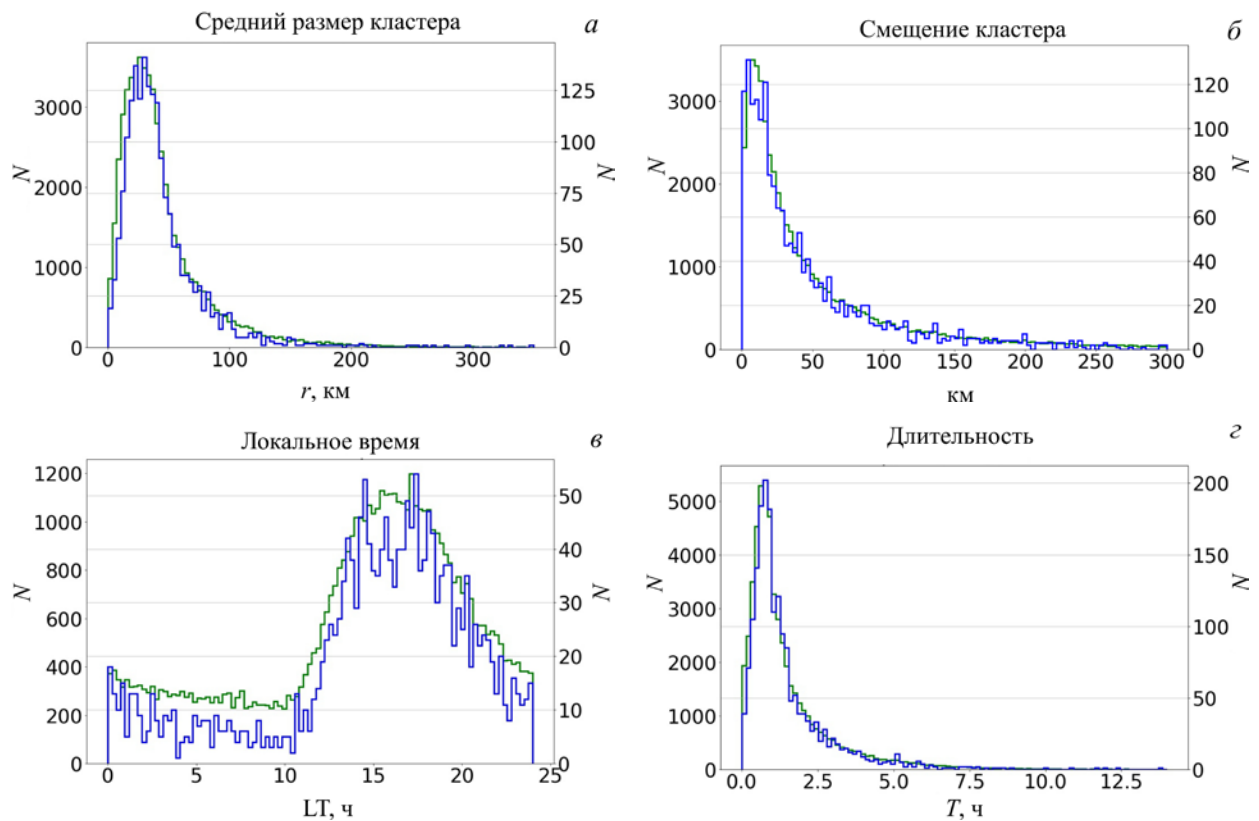


Рис. 3. Распределения грозных кластеров по среднему размеру кластера (*a*), по дистанции, на которую перемещается кластер (*b*), по локальному времени (*в*), по длительности кластера (*г*) за период 2012–2018 гг.: зеленый цвет — по всей территории РФ (ось ординат слева), синий — по Байкальской природной территории (ось ординат справа)

ляется как среднее значение этих расстояний. По распределению значений (рис. 3, *a*) можно определить, что грозные ячейки имеют радиус 30–40 км, что согласуется с данными работы [Шабаганова и др., 2012]. Смещение кластера — это расстояние между средними координатами первых пяти и последних пяти разрядов соответственно. Среднее смещение грозного кластера, рассчитанное по формуле 1, составило около 40 км (рис. 3, *b*). На рис. 3, *в* показано распределение грозных кластеров по локальному времени. Полученное распределение согласуется с основными временными особенностями динамики гроз: низкая грозная активность наблюдается в предрассветные часы, а повышенная — в послеполуденные часы. Большая часть грозных очагов на территории России образуется в промежутке от 15 до 17 ч. Средняя длительность гроз ~1 ч (рис. 3, *г*), что также соответствует современным представлениям. При этом существуют грозные кластеры со временем жизни 4–6 ч, феномен которых для рассматриваемой базы данных и алгоритма кластеризации надо исследовать дополнительно.

В Байкальском регионе особых различий в исследуемых характеристиках не наблюдается. Это говорит о том, что по формированию и протеканию грозы в регионе не имеют больших отличий от гроз на всей территории РФ. Однако надо учитывать, что такое сходство характеристик может появляться, если алгоритм кластеризации зависит от параметров кластера, поэтому требуются дополнительные статистические исследования базы данных молниевых разрядов, связанные с выбором оптимальных значе-

ний параметров кластера (длительность, размер, количество молниевых разрядов).

### Определение направления движения грозных кластеров

Скорость и направление движения грозного очага зависят от направления ветра и прежде всего от взаимодействия восходящего и нисходящего потоков облака с несущими воздушными потоками в средних слоях атмосферы, в которых развивается гроза. В тропосфере и стратосфере средних широт преобладает перенос воздуха с запада на восток — западный перенос. Для определения направления движения грозных ячеек проводился расчет на плоскости, где для каждого кластера рассчитывались координаты начала и конца кластера (так же, как и для определения смещения кластеров). После этого можно определить проекции смещения кластера на оси широт и долгот и в полученном треугольнике определить угол перемещения относительно направления на север (географический азимут). Пространственные перемещения грозного очага достаточно малы по сравнению с радиусом Земли, поэтому хорошим приближением для решения этой задачи будет использование простых тригонометрических тождеств. Далее значения направлений движения кластеров усредняются для одного дня. На рис. 4 представлены распределения кластеров по скоростям, а также роза ветров для направлений перемещения кластеров. Направление перемещения грозных кластеров подвержено влиянию западного переноса, и движение

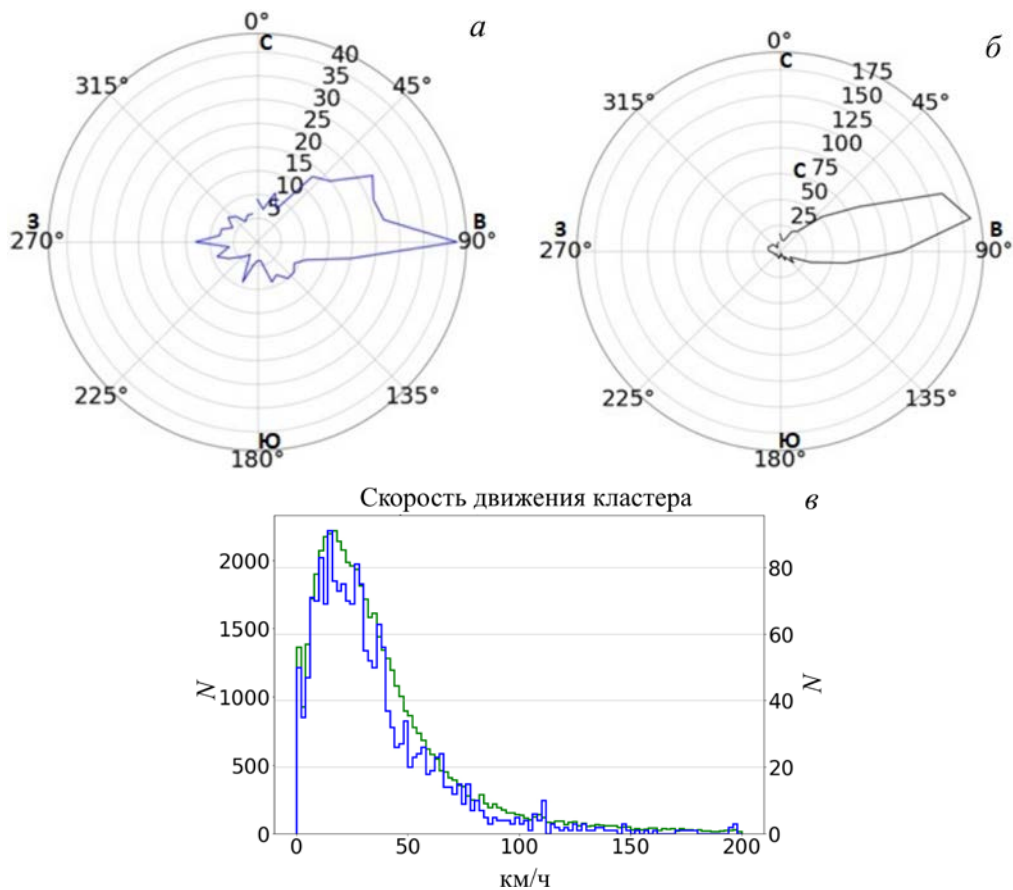


Рис. 4. Распределения движения грозových очагов по азимуту для Байкальской природной территории (а) и всей территории РФ (б), а также скорость перемещения грозových очагов (в): зеленый цвет — по всей территории РФ (ось ординат слева); синий — по Байкальской природной территории (ось ординат справа). Данные приведены за период 2012–2018 гг.

происходит преимущественно в северо-восточном и восточном направлении (рис. 4, б). Для Байкальского региона особенность состоит в том, что преобладает смещение грозových очагов в восточном направлении (рис. 4, а). В то же время существуют грозовые кластеры, двигающиеся в юго-западном направлении, но они составляют небольшую долю от общего количества.

### Мощность грозových кластеров

Под мощностью грозových кластеров в настоящем исследовании подразумевается число молниевых разрядов в единицу времени. Особенности распределения грозových очагов по мощности приведены на рис. 5. Характерной отличительной чертой распределений является наклон спектра мощности. Для Байкальской природной территории наклон распределения более резкий (рис. 5, б), это может указывать на то, что мощность гроз там существенно ниже, чем на остальной территории РФ. По карте (рис. 5, в) можно сказать, что расположение мощных гроз совпадает с зонами повышенного количества грозových образований. Необходимо понять, почему, согласно нашим результатам, в Байкальском регионе грозы менее мощные, притом что их длительность сопоставима с длительностью гроз по всей территории страны. Для ответа на этот вопрос также необходимы дополнительные статистические исследова-

ния базы данных молниевых разрядов, связанные с выбором оптимальных значений параметров кластера, а именно его времени существования.

### ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе была показана состоятельность данных сети «Верея-МР» для исследования грозových ячеек. Полученные параметры кластеров соответствуют современному пониманию физических параметров гроз. Установленные пространственные зависимости расположения грозových ячеек могут быть связаны как с особенностями рельефа, так и с местоположением станций сети. Локальная суточная грозовая активность, длительность, скорость, размеры и смещения грозových кластеров для всей территории России и для Байкальского региона не имеют сильных различий. Расхождения наблюдаются только в мощности грозových образований. В то же время исследование показало необходимость дополнительной проверки метода кластеризации с целью подтверждения независимости физических характеристик гроз от параметров кластеризации.

Один из способов решения этой задачи — проведение кластерного анализа с варьированием временного параметра (полчаса, час, два часа и т. д.). После этого потребуется сравнить результаты, чтобы

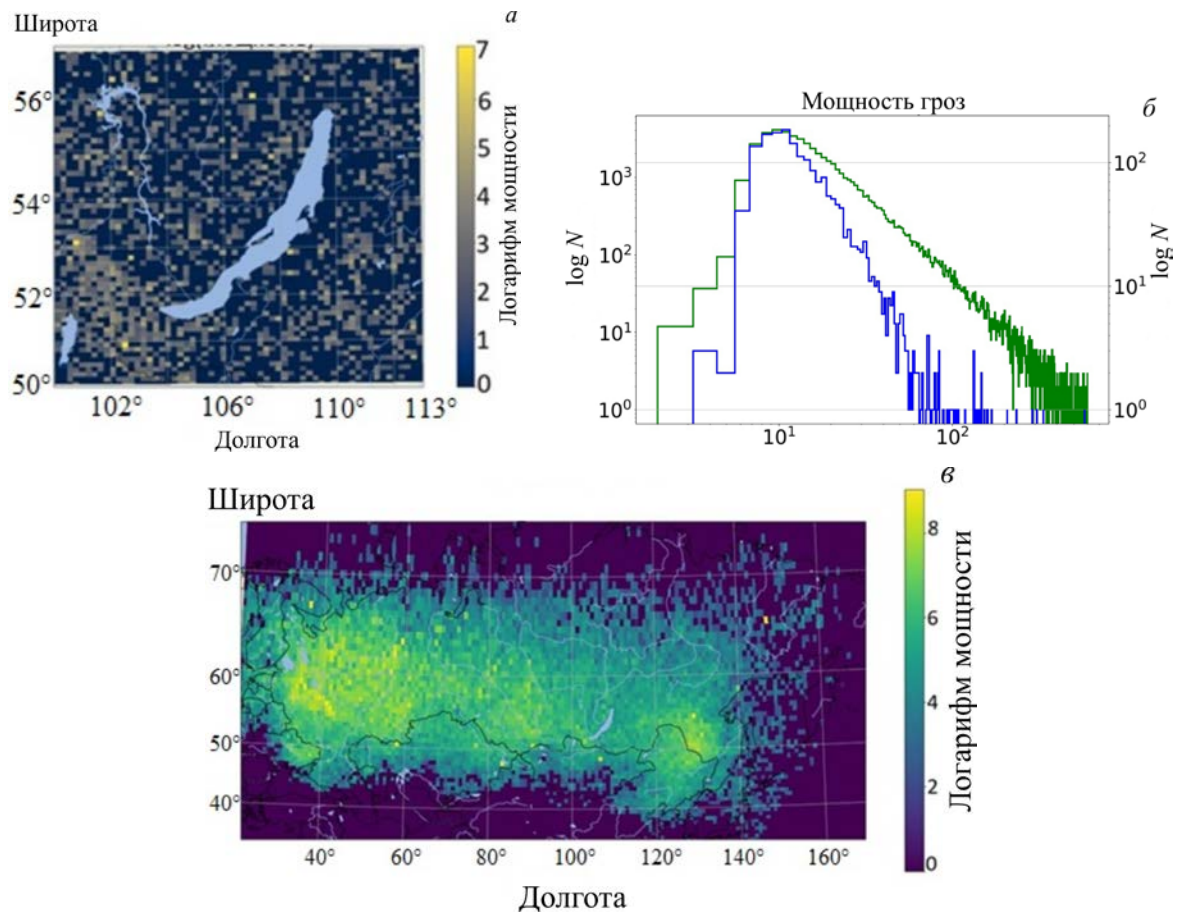


Рис. 5. Карты мощности кластеров для Байкальского региона (а) и всей территории РФ (б), а также распределения грозовых очагов по мощности (в): зеленый цвет — по всей территории РФ; синий — по Байкальской природной территории. Данные приведены за период 2012–2018 гг.

исключить или нивелировать влияние такой зависимости. Другим вариантом исследования является проведение пространственно-временного корреляционного анализа базы данных молниевых разрядов для определения характеристик грозовых кластеров. Исследование асимметрии кластеров и динамики этой асимметрии в свете динамики атмосферных фронтов, а также распределения кластеров по размерам и по форме для определения соотношения между фронтальными и внутримассовыми грозами — эти и другие перспективные задачи решаются при помощи кластерного анализа и напрямую связаны с опасными погодными явлениями на Байкальской природной территории.

В дальнейших исследованиях планируется: более подробное изучение грозовой активности над Байкальской природной зоной, сравнение нескольких методов кластерного анализа, более подробное изучение характеристик грозовых ячеек, эксперименты по наблюдению гроз совместно с быстрыми фотометрическими устройствами с целью поиска высотных молниевых разрядов. Чтобы решить поставленные задачи, необходимо создать стабильно работающую грозопеленгационную сеть на территории Иркутской и Читинской областей и Республики Бурятия. Расположение пунктов регистрации молниевых разрядов, предложенное на основании результатов настоящего исследования, показано на рис. 6.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный в настоящей работе кластерный анализ данных грозопеленгационной сети «Веря-МР» позволил получить основные характеристики грозовых кластеров. Исследование показало, что наиболее активным регионом генезиса гроз на Байкальской природной территории являются горные районы, в большей степени предгорье Восточного Саяна, расположенное на юго-западе Байкальской природной территории. Полученные с помощью грозопеленгационной сети «Веря-МР» пространственно-временные характеристики грозовых очагов на Байкальской природной территории не отличаются от характеристик грозовых очагов на всей территории РФ. Однако мощность грозовых очагов ниже, что позволяет предположить зависимость характеристик грозовых очагов от метода выделения грозовых кластеров из базы молниевых разрядов. Требуются дальнейшие исследования, прежде чем применять описанный метод для обработки данных новой грозопеленгационной сети, создаваемой на Байкальской природной территории. Эксплуатация сети «Веря-МР» для этой цели невозможна, в связи с редким расположением грозопеленгационных пунктов, а также с ее фактической остановкой с 2019 г. На основе анализа существующих грозопеленгационных сетей определено, что для успешного мониторинга грозовой активности на Байкальской природной терри-

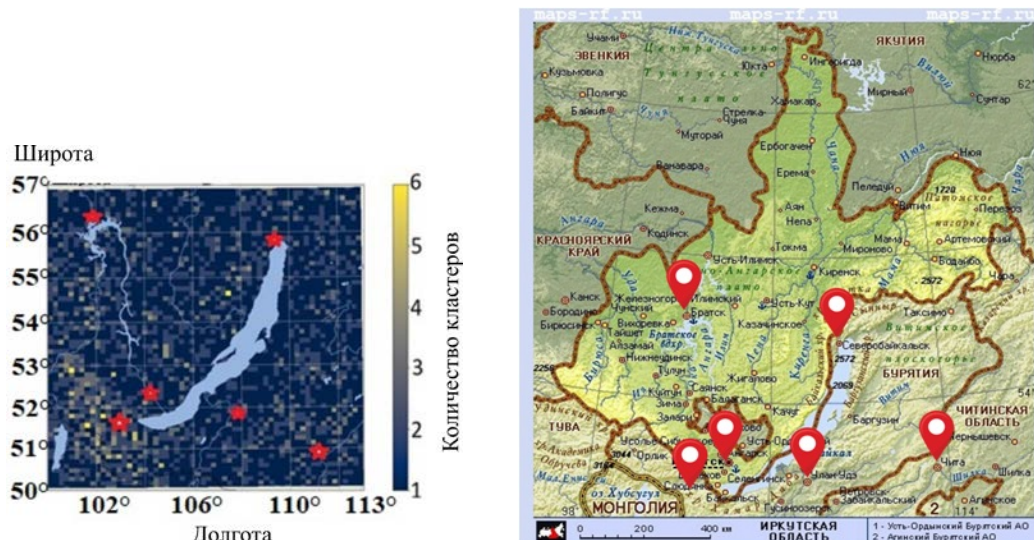


Рис. 6. Предполагаемое расположение грозопеленгационных пунктов на территории Иркутской и Читинской областей, и Республики Бурятия

тории грозопеленгационные пункты могут быть расположены в геофизических обсерваториях ИСЗФ СО РАН (Иркутск) и ИФМ СО РАН (Улан-Удэ). Наиболее оптимальным будет создание многопунктовой грозопеленгационной сети из широкополосных радиоприемников сверхдлинных радиоволн, поскольку такие устройства максимально просты и нетребовательны к эксплуатационным затратам. Современные программно-аппаратные средства позволяют создать простой и надежный регистратор, способный предварительно обрабатывать осциллограммы импульсов от молниевых разрядов всех возможных типов и передавать информацию по существующим сетям мобильной связи в центр обработки информации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278) в части проведения исследований по обработке и анализу данных молниевых разрядов и в рамках гранта № 075-15-2020-787 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории») в части проведения исследований по разработке и определению расположения предполагаемых грозопеленгационных пунктов на территории Иркутской области.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аргунов В.В. Квазипериодические вариации амплитуды сигналов грозовых разрядов, проходящих над эпицентрами землетрясений. *Вестник СВФУ*. 2018. № 4 (66). С. 38–49.
- Блиох П. Свист в космосе. *Научно-популярный физико-математический журнал «Квант»*. 1997. № 3. С. 3–8.
- Кононов И.И., Юсупов И.Е. Кластерный анализ грозовой активности. *Радиотехника и электроника*. 2004. Т. 49, № 3. С. 1–9.
- Константинова Д.А., Горбатенко В.П. Динамика грозовой активности над территорией Западной Сибири. *ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ*. Новосибирск: Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 2016. Т. 4, № 1. С. 96–99.

Мареев Е.А., Стасенко В.Н., Шаталина М.В. и др. Российские исследования в области атмосферного электричества в 2015–2018 гг. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55, № 6. С. 79–93. DOI: [10.31857/S0002-351555679-93](https://doi.org/10.31857/S0002-351555679-93).

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.

Панюков Б.Д., Будув Д.В., Малов Д.Н. Системы пассивного мониторинга грозовой деятельности. *Вестник ЮУрГУ*. 2003. № 8. С. 11–20.

Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Абшаев А.М. Исследование связи частоты электрических разрядов с радиолокационными характеристиками для многоячейкового кучеводождевого облака. *Труды ГГО*. 2018. Вып. 591. С. 25–41.

Тарабукина Л.Д., Козлов В.И. Сравнение измерений нескольких систем регистрации молниевых радиоимпульсов. *Вестник СВФУ*. 2018. № 2 (64). С. 77–86.

Шабаганова С.Н., Козлов В.И. Применение кластерного анализа для выделения грозовых очагов. *Динамика сложных систем — XXI век*. 2010. № 2. С. 43–47.

Шабаганова С.Н., Каримов Р.Р., Козлов В.И., Муллаяров В.А. Характеристики грозовых ячеек по наблюдениям в Якутии. *Метеорология и гидрология*. 2012. № 12. С. 35–43.

Ripoll J.F., Farges T., Lay E.H., Cunningham G.S. Local and statistical maps of lightning-generated wave power density estimated at the Van Allen probes footprints from the World-Wide Lightning Location Network Database. *Geophys. Res. Lett.* 2019. Vol. 46, no. 8. P. 4122–4133. DOI: [10.1029/2018GL081146](https://doi.org/10.1029/2018GL081146).

Rycroft M.J., Israelsson S., Price C. The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2000. Vol. 62, no. 17–18. P. 1563–1576. DOI: [10.1016/S1364-6826\(00\)00112-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00112-7).

Scholkmann F., Boss J., Wolf M. An efficient algorithm for automatic peak detection in noisy periodic and quasi-periodic signals. *Algorithms*. 2012. Vol. 5. P. 588–603. DOI: [10.3390/a5040588](https://doi.org/10.3390/a5040588).

Yang J., Liu N., Sato M. Characteristics of thunderstorm structure and lightning activity causing negative and positive sprites. *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2018. Vol. 123. P. 8190–8207. DOI: [10.1029/2017JD026759](https://doi.org/10.1029/2017JD026759).

Как цитировать эту статью:

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. 91–98. DOI: [10.12737/szf-74202109](https://doi.org/10.12737/szf-74202109).