

УДК 551.515.6

Сопоставление грозовой активности в некоторых регионах Северной Азии со сменой атмосферной циркуляции в летние сезоны 2009–2016 гг.

Л. Д. Тарабукина¹ (tarabukina@ikfia.ysn.ru), Н. К. Кононова² (NinaKononova@yandex.ru), В. И. Козлов¹ (vkozlov@ikfia.ysn.ru)

¹ Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю. Г. Шафера СО РАН, Якутск

² Институт географии РАН, Москва

Аннотация. Проведен сопоставительный анализ атмосферной циркуляции, описываемой классификацией Б. Л. Дзердзеевского, и вариаций числа грозовых разрядов в двух удаленных друг от друга регионах повышенной грозовой активности в Северной Азии. Отрицательная взаимосвязь отклонений вариаций числа грозовых разрядов в этих регионах объясняется развитием атмосферного блокирования над Западной Сибирью, происходящего с вовлечением воздушных масс летнего муссона над Дальним Востоком.

Ключевые слова: гроза, молния, атмосферная циркуляция, Северная Азия, WWLLN, типизация Дзердзеевского.

Введение

Инструментальные наблюдения за грозами на территории Северной Азии ведутся в основном в отдельных регионах. Наблюдения осуществляются однопунктовыми грозопеленгаторами российского и зарубежного производства. Единственной многопунктовой сетью широкого охвата является сеть «Верея», разрабатываемая и используемая для нужд российских электрических сетей [1]. Сеть охватывает почти все регионы России, где повышена грозовая активность. Такая полоса повышенной грозовой активности была установлена по метеорологическим наблюдениям и применяется в государственных рекомендациях по проектировке защиты от грозовых перенапряжений [2]. Единственными инструментальными измерениями с полным охватом территории северной Азии долгое время являлись спутниковые наблюдения оптическим детектором ОТД спутника Microlab-2 [3], который действовал с 1995–2000 гг. Последующие спутниковые наблюдения либо не охватывают всю интересующую нас территорию, либо имеют закрытый доступ к данным. Распределение усредненной плотности, определенной спутниковыми наблюдениями, совпало с метеорологическими наблюдениями, где подтверждается наличие смещенного к югу при движении на восток пояса повышенной грозовой активности. К сожалению, на территории всей северной Азии многолетние вариации не рассматриваются в совокупности. Как было выявлено в [4] в Северной Азии изменения грозовой активности двух крупных регионов повышенной плотности грозовых разрядов относительно взаимосвязаны.

Существуют много способов описания глобальной атмосферной циркуляции северного полушария. Самое общее разделение на типы циркуляции производится как зональное и меридиональное по общему направлению ветров на высотах тропосферы и нижней страто-

сферы за долговременные периоды. По самой широко распространенной классификации Вангенгейма-Гирса атмосферная циркуляция северного полушария делится на три глобальные группы: меридиональная, западная и восточная [5]. В данной работе мы применили метод Б. Л. Дзерждзеевского описывающий ежедневную смену атмосферной циркуляции всего северного полушария [6].

Данные и методы исследования

В 2009 г. в г. Якутске была установлена однопунктовая станция приема ОНЧ радиоприемника, которая была включена в мировую сеть грозолокации (WWLLN). Приемный пункт состоит из электрической штыревой антенны высотой 1,5 м, подключенной через широкополосный предварительный усилитель (коэффициент усиления в рабочей полосе около 40) и АЦП к ПК [7]. Точное время определяется по секундным импульсам (PPS) GPS-приемника. Работа системы основана на приеме радиосигналов от молний, атмосфериков, и анализе разностей времени прихода волновых пакетов (TOGA) в ОНЧ-диапазоне частот (6–22 кГц) до, как минимум, 5 ближайших станций [8]. С 2009 по 2016 г. количество радиоприемных пунктов WWLLN в пределах рассматриваемой нами территории Северной Азии (60–180 в. д., 40–80 с. ш.) возросло почти вдвое. В 2009 г. вблизи и в пределах рассматриваемого региона в сети действовало 4 станции. На настоящий момент система расширилась за счет дополнительных 6 станций вблизи выбранного нами региона, и около 7 из 10 станций постоянно действуют. Эффективность детектирования молний типов «облако-земля» и «облако-облако» системы грозолокации по оценкам на 2012 г. в среднем составляет около 11–15 %, и для молний с током более 100 кА – около 30 % [9]. В ОНЧ диапазоне возвратный удар ОЗ разряда – доминирующий источник принимаемых атмосфериков [10], и поэтому количество ОЗ доминирует в ОНЧ радиотехнических наблюдениях грозовых разрядов, даже если число ОО разрядов в 3,5 раза больше числа ОЗ [11]. На 10 кГц излучение от ОО молний составляет примерно 10 % от излучения ОЗ молний [12], поэтому считается, что система регистрирует как ОЗ молнии, так и ОО молнии, однако из-за настроенного ОНЧ диапазона приемного тракта предпочтение отдается более мощным импульсам грозовых разрядов типа «облако-земля».

Составление пространственных карт производилось следующим способом. Во-первых, долгота и широта каждой строки данных, соответствующей одному грозовому разряду, сопоставлялись с порядковым номером интервала $0,25^\circ$ по долготу / широте с включением нижней границы и исключением верхней границы с помощью стандартной процедуры подсчета гистограммы. Во-вторых, каждый разряд раскидывался по порядковому номеру по широте и долготу в соответствующую клетку пространственной сетки, затем производился подсчет количества разрядов в каждой клетке. Суммирование производилось для каждой клетки сетки за весь год (январь – декабрь), за три летних месяца (июнь-август), за месяц и за сутки. Далее для отдельных областей территории производилось полное суммирование количества грозовых разрядов по площади, а также многолетнее усреднение полученных годовых и сезонных карт всей территории. Для сравнения с метеорологическими параметрами суммарные карты строились для каждых 6 часов наблюдений по УТ. Для подсчета суточного хода были условно выделены часовые пояса по 15° долготы с началом счета от $7,5^\circ$ в. д. с присвоением номера один данной долготы. Для каждого пояса были выделены базы из основной с соответствующим диапазоном долгот, а затем корректировалось время (сведенное до часа, причем в этот часовой интервал включались все минуты до 59 мин и 59 с) каждого зарегистрированного импульса грозового разряда согласно порядковому номеру пояса. Те грозовые разряды, у которых скорректированное время равнялось или превышало 24 ч., переносились на следующий день с вычитанием из времени 24 часов. При достижении последнего месяца и дня такие разряды стирались из базы. В каждой такой вторичной базе велся суточный подсчет количества разрядов с интервалом в один час (от 0 до 23 часов). Счет производился через стандартную процедуру подсчета гистограммы. Далее все полученные суточные хода усреднялись в течение заданного периода: года, летнего сезона, месяца, а также для каждого усреднения находились стандартные отклонения. Усреднение производилось для всего непрерывного интервала дней без учета были ли грозовые разряды в эти дни или нет.

Для того, чтобы уменьшить влияние изменяющейся с годами эффективности детектирования на межгодовые вариации, а также при условии, что эффективность в течение года и конкретно летних сезонов остается неизменной, количество грозных разрядов регионов представлялось в виде доли от суммарного количества по территории и рассматривались вариации отклонения значений доли от года к году, либо суммарное по всей рассматриваемой территории приводилось к сумме разрядов за 2009 г., как году с наименьшей эффективностью детектирования.

Для описания атмосферной циркуляции использована типизация циркуляции атмосферы Северного полушария, разработанная под руководством Б. Л. Дзердзеевского [13; 14]. В типизации выделен 41 элементарный циркуляционный механизм (ЭЦМ). На каждый ЭЦМ построена динамическая схема с обозначением путей циклонов и мест стационарирования антициклонов. Благодаря наличию динамических схем, при каждом ЭЦМ можно определить характер погоды в любой точке Северного полушария. По Б. Л. Дзердзеевскому выделено четыре группы циркуляции: зональная, нарушение зональности, меридиональная северная, меридиональная южная, включающие 13 типов и 41 ЭЦМ [6]. Данные, полученные по этой методике, имеются с 1899 г. и ежегодно дополняются [URL: www.atmospheric-circulation.ru].

Результаты и обсуждение

Вариации грозной активности в регионах повышенной плотности грозных разрядов. В результате непрерывных наблюдений с 2009 г. была получено усредненное пространственное распределение суммарного за летние сезоны количества грозных разрядов, подсчитанных на сетке $0,25 \times 0,25^\circ$ географической широты и долготы соответственно на территории с границами $60\text{--}180^\circ$ в. д., $40\text{--}80^\circ$ с. ш. (рис. 1). Полученная усредненная плотность грозных разрядов была скорректирована на пространственное распределение эффективности детектирования системы, смоделированное авторами сети и адаптированной из статьи [15].

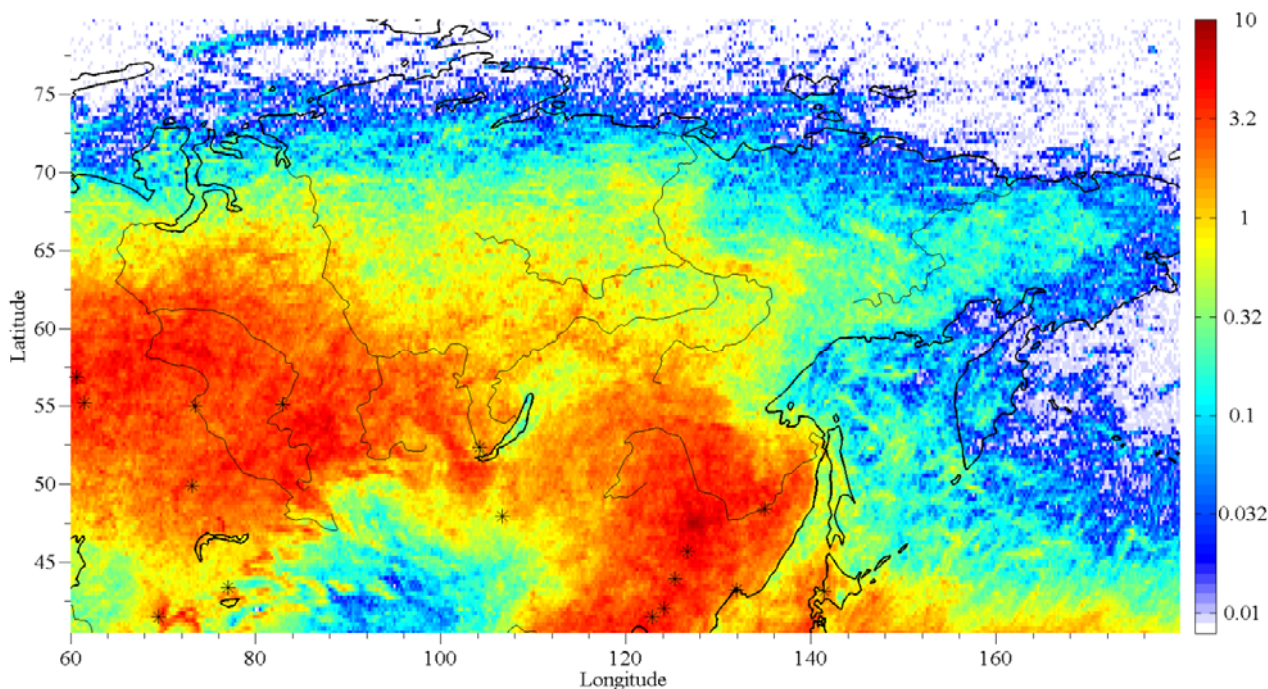


Рис. 1. Среднегодовая плотность грозных разрядов (разряд км-2 год-1) 2009–2017 гг., скорректированная на эффективность детектирования. Цветовая шкала приведена в логарифмическом масштабе. Черными звездами указаны крупные города

Полученная карта качественно совпадает с ранними картами, полученными в результате спутниковых наблюдений, а также дает более детализованную картину по сравнению с метеорологическими наблюдениями. Отмечается пояс повышенной грозовой активности, протянувшийся вдоль примерно 45–60 параллелей. Как и в спутниковых наблюдениях, зона повышенной грозовой активности отклоняется к югу в восточной части территории. Отмечаются два обширных региона, где годовая плотность грозовых разрядов выше по сравнению с другими территориями примерно в 10–100 раз. Первый регион, который мы условно обозначим, как «западный» находится примерно на территории с границами 45–60° с. ш. и 60–90° в. д. и приходится на Западносибирскую равнину. Максимальная активность первого очага находится в области между 55° с. ш., 60° в. д. и 61° с. ш., 75° в. д., которая приходится на Тобольский материк вдоль рек Тавды, Тобола и Иртыша. Обширные заболоченные экосистемы способствуют развитию местной грозовой активности и длительному поддержанию активности фронтального типа гроз. Второй регион повышенной грозовой активности, обозначенный нами как «восточный», расположен в долине рек Сунгари и Амур. Максимальная активность второго очага наблюдается вдоль 127° в. д. в межгорно-котловинной областях между Малым Хинганом и Становым хребтом. А также можно обособить третью область с соответствующей массивным очагам плотностью грозовых разрядов, находящуюся в пределах 50–60 с. ш., 90–110 в. д. (условно-центральный очаг). Образование этих массивных грозовых очагов связывается с разными атмосферными процессами. Западный очаг, центр которого находится на Западно-Сибирской равнине, образуется, в основном, за счет зонального переноса с запада: воздушные массы обходят Уральские горы с севера и юго-запада. Развитию грозовой активности также способствуют благоприятные условия местности: заболоченная низменность приводит к активной конвекции и неустойчивому состоянию атмосферы [16]. Алтайские горы частично останавливают продвижение воздушных масс на юго-восток. Центр восточного очага находится в долине рек Амур и Сунгари. Формирование очага происходит под влиянием сезонного центра действия атмосферы – дальневосточной депрессии [17]. Со смещением центра дальневосточной депрессии от года к году происходит усиление или ослабление южного переноса (летнего муссона), что в свою очередь приводит к усилению грозовой активности восточного очага [18].

Суммарное количество грозовых разрядов за год по всей территории возрастает (рис. 2), однако в эти годы в связи с увеличением количества станций возрастала и эффективность детектирования, поэтому было решено рассматривать соотношения вариаций между двумя регионами повышенной грозовой активности.

Вариации ежегодного приращения суммарного за летний сезон количества грозовых разрядов в западном очаге находятся в противофазе с вариациями восточного очага: коэффициент линейной корреляции $-0,94$ (рис. 3). Отношение суммарного числа разрядов за летний сезон и месяц в восточном регионе к числу в западном регионе показывает уменьшение величины отклонений этого параметра к 2014 г. (рис. 4).

На территории всей северной Азии самым активным сезоном грозовой активности является лето – с июня по август. В 2009–2016 гг. этот сезон характеризуется доминированием меридиональных процессов в атмосфере. В целом, как было установлено в работе [19], в данное время длится эпоха северной меридиональной циркуляции. Как показано на рис. 5, при подсчете дней с различными группами типов циркуляции выделяется группа меридиональной северной циркуляции, а также меридиональной южной, которая доминировала летом 2013 и 2016 гг.

От сезона к сезону наблюдаются относительно короткопериодные вариации доминирования циркуляции меридионального северного и южного типов в течение лета. Так в начале (июнь) и конце (августе) лета доминирование меридионального южного типа происходило только в 2013, 2014 и 2016 гг. В июле наблюдается преимущественно меридиональный северный тип циркуляции за исключением 2010 г. Зональный тип циркуляции чаще проявляет себя также в июле по сравнению с другими летними месяцами.

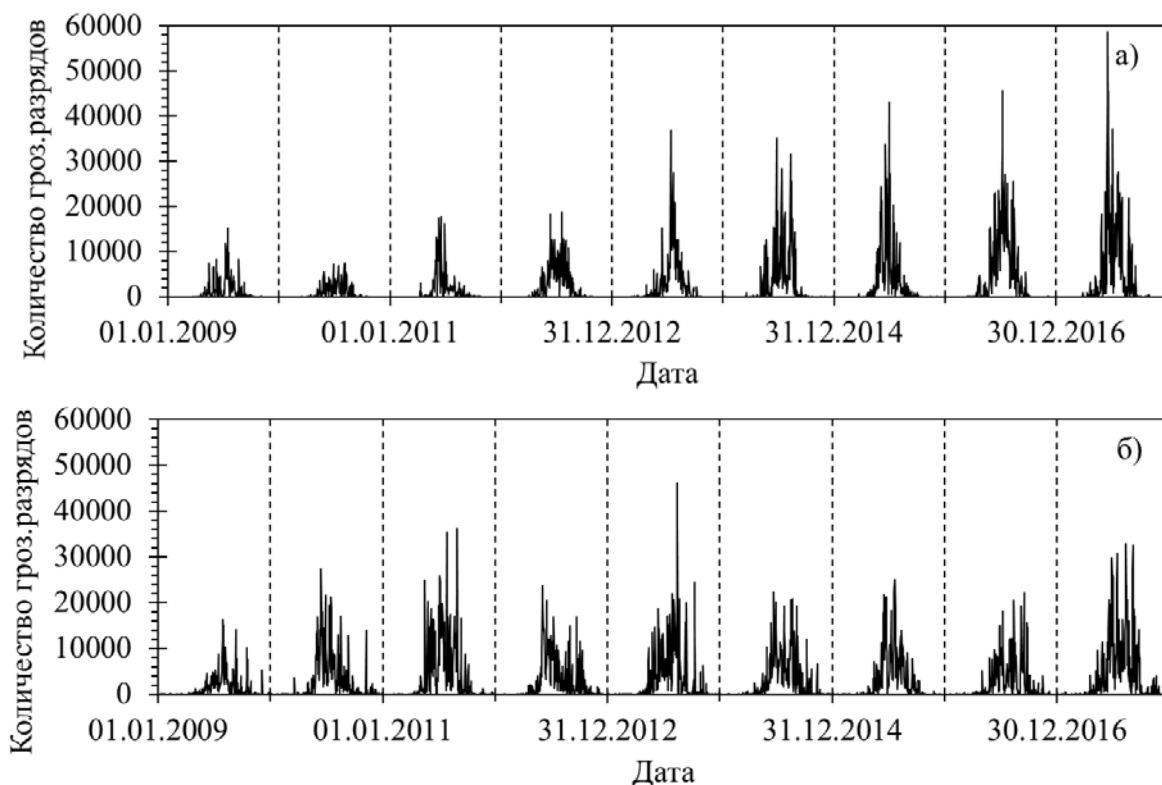


Рис. 2. Многолетние вариации суточного количества грозových разрядов в двух регионах: западном (а) и восточном (б)

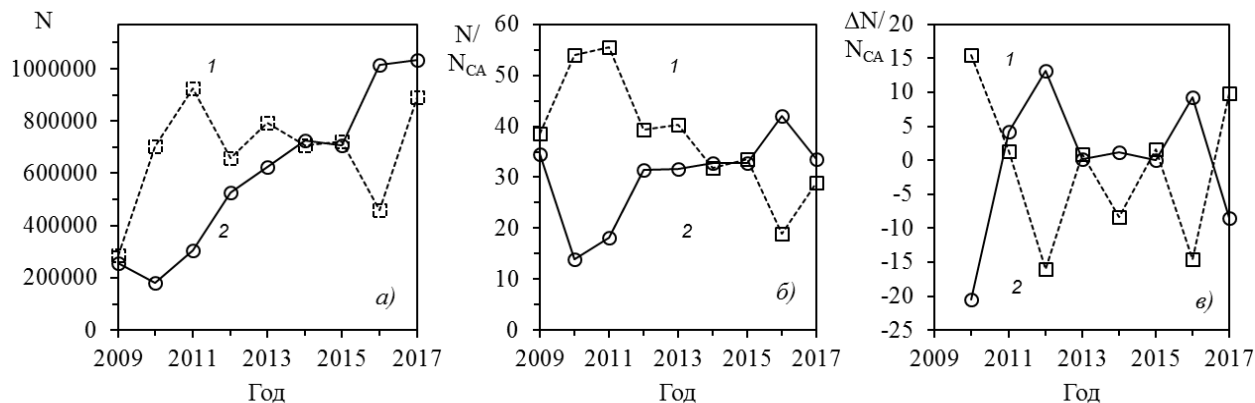


Рис. 3. Вариации за летние сезоны в восточном регионе (линия 1) и западном регионе (линия 2): а) суммарного количества грозových разрядов, б) отношения суммарного количества в регионе к количеству в Северной Азии, в) ежегодного отклонения отношения количества в регионе к количеству в Северной Азии

В 2009–2015 гг. в летние периоды велика повторяемость ЭЦМ 8-х и 12-х типов, при которых над Сибирью и Дальним Востоком одновременно развиваются выходы южных циклонов и возможны грозы. При ЭЦМ 9а (меридиональная северная группа) и 13л (меридиональная южная группа), которые также часто возникали в рассматриваемый период, над Сибирью развивается в основном циклоническая деятельность, грозы формируются на холодных фронтах северо-западных и южных циклонов. В 2016 г. летом основное направление циркуляции резко меняется на меридиональное южное, при этом на долю ЭЦМ 13л приходится треть сезона.

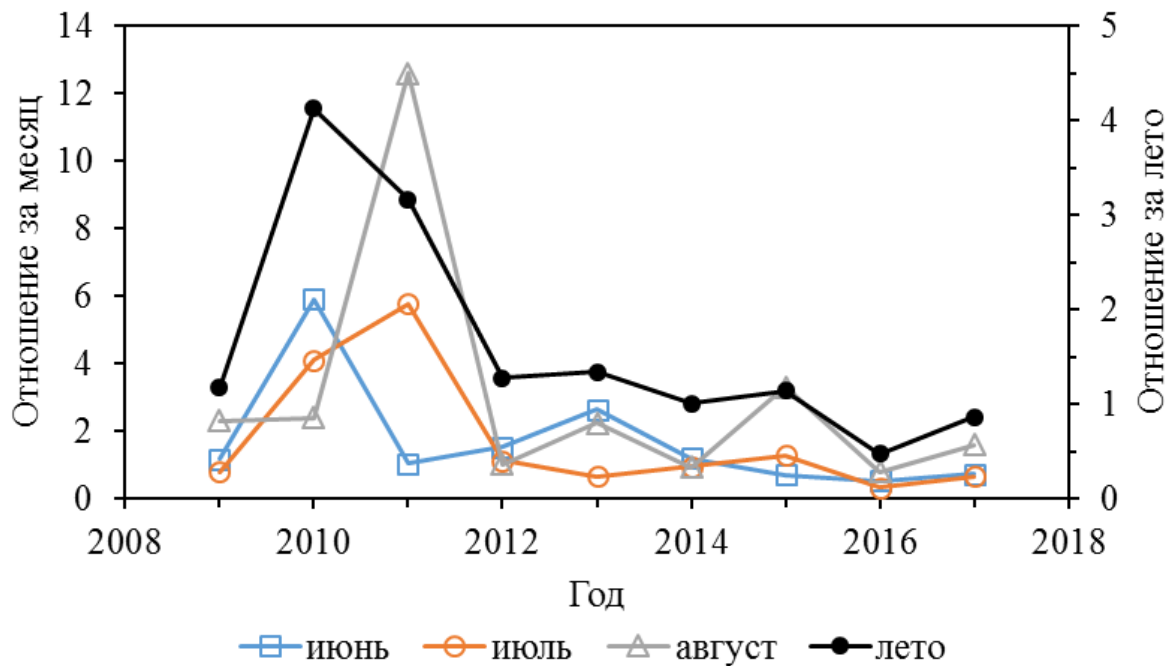


Рис. 4. Отношение суммарного по территории и в выбранный интервал времени количества грозных разрядов в восточном регионе к количеству в западном

Сопоставление с изменениями атмосферной циркуляции, классифицированной по методу Б. Л. Дзердзеевского

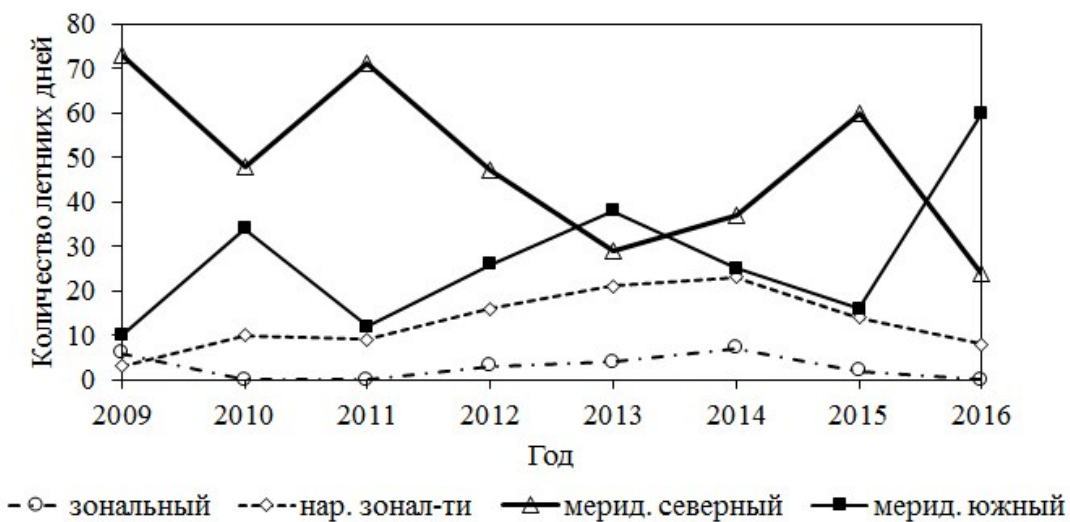


Рис. 5. Суммарная продолжительность групп ЭЦМ за летний сезон

В таблице 1 выделены ЭЦМ, при которых отношение числа дней, когда суточное количество грозных разрядов в восточном регионе превышало количество в западном регионе, к числу дней, когда суточное количество разрядов в западном регионе превышало количество в восточном, (последняя строка табл. 1) составляло более 2 раз. ЭЦМ, удовлетворяющими такому условию, стали 8а, 8вл, 12а и 12бл меридиональной северной группы циркуляции северного полушария.

При ЭЦМ 8а и 8вл в северном полушарии развиваются 2 близких по географическому положению блокирующих процесса и 2–3 выхода южных циклонов [13]. При ЭЦМ 8а блокирующие процессы не наблюдаются на территории Азии, вдоль северных широт Азии образуется полоса низкого давления и активизируются выходы южных циклонов со средиземного моря и вдоль Дальневосточного побережья Азии. При ЭЦМ 8вл блокирующий процесс направлен на восток Западной Сибири, а южные циклоны выходят на дальневосточный регион с монгольской ветви полярного фронта.

Таблица 1

Количество дней, соответствующее условиям доминирования грозовой активности восточного региона по сравнению с западным регионом, и ЭЦМ за летние сезоны (июнь – август) периода 2009–2016 гг.

ЭЦМ	2а	3	4б	6	8а	8вл	9а	10б	12а	12бл	13л
число дней ЭЦМ	14	50	17	24	21	15	106	23	119	59	218
отношение количества гроз. разрядов в восточном к западному ≤ 1	11	23	7	12	3	4	43	9	26	16	104
отношение количества гроз. разрядов в восточном к западному > 1	3	27	10	12	18	11	63	14	93	43	114
отношение числа дней с отн. более 1 к менее 1	0,27	1,17	1,43	1	6	2,75	1,46	1,56	3,58	2,69	1,1

При ЭЦМ 12а происходит 4 арктических вторжения, одно из которых осуществляется широкой полосой на Сибирь и распространяется на весь наш регион. Южные циклоны выходят в других секторах полушария. ЭЦМ 12бл образует схожую с 8вл структуру с областью высокого давления над Сибирью и низкого в Дальневосточном регионе. Вторжение арктических масс на Азию смещено на запад, а траектории южных циклонов более короткие.

Для того, чтобы установить причину, обуславливающую высокую грозовую активность, были рассмотрены отдельно сезонные вариации количества грозовых разрядов двух ранее выделенных масштабных регионов повышенной грозовой активности и ЭЦМ, соответствующие дням с локальными пиками вариаций и дням пониженной активности. Каждый год дни повышенной грозовой активности выбирались по уровню $\sim 0,7$ от максимума за лето, а дни пониженной грозовой активности – по уровню 0,1 от летнего максимума. В период с 2009 по 2016 гг. для западного региона выделены 27 дней повышенной грозовой активности (от 2 до 6 дней в каждом сезоне). Наиболее характерными ЭЦМ для высокой грозовой активности западного региона оказались ЭЦМ 9а и 13л (7 и 9 случаев соответственно). Остальные пики приходились на ЭЦМ 12а и 12бл (по 2 дня), 2а, 2б, 3, 4а, 6, 10а, 10б (по 1 дню за весь период). При этом в эти дни высокой грозовой активности отмечается доминирование именно западного очага по количеству грозовых разрядов, этому соответствуют 26 дней. Для восточного региона за весь рассматриваемый период выделены 40 дней максимальной грозовой активности (от 2 до 10 дней на каждый сезон, чаще – по 4 пика за сезон), из них 12 дней приходится на ЭЦМ 13л, 8 дней – на ЭЦМ 9а, 6 дней – на ЭЦМ 12а, 5 дней – на ЭЦМ 8а, менее – ЭЦМ 3, 12бл (по 3 дня), 9б, 8гл, 7ал (по 1 дню). В дни высокой активности восточного региона наблюдалось в основном доминирование активности восточного региона по сравнению с западным регионом – 38 дней, когда отношение суточного количества грозовых разрядов в восточном регионе к количеству в западном было более 1, из них 30 дней это отношение показывало значение более 2. Таким образом, в дни максимальной грозовой активности очагов активность одного из них существенно ниже.

ЭЦМ 9а и 13л являются наиболее способствующими грозовой активности ЭЦМ в целом, что также было показано в табл. 1. При ЭЦМ 9а антициклон с Европейской России распространяется на верхнее и среднее течение Оби, на остальной части Северной Азии развивается циклоническая деятельность с появлением временных антициклонических образований и формированием деформационных полей, обеспечивающих развитие и движение к северо-востоку полярно-фронтальных циклонов. Южные циклоны выходят вдоль Дальневосточного побережья. ЭЦМ 13л характеризуется циклоном на Северном полюсе и обширной областью пониженного давления, охватывающей большую часть внетропических широт Северного полушария. Циклоны, идущие с запада и с юго-запада, задерживаются, и их траектории приобретают северную составляющую. Проходящие по более восточным траекториям по-

лярно-фронтовые циклоны после регенерации быстро движутся в высоких широтах на восток или северо-восток. В приполярную область они проникают в районах Новосибирских островов, Восточно-Сибирского или Чукотского морей. ЭЦМ 13л отличается длительностью существования.

Заключение

Показано, что атмосферная циркуляция северного полушария, представляющая комплексную динамическую схему локализации барических образований, сильно влияет на грозовую активность двух регионов повышенной грозовой активности, расположенных на западносибирской равнине и в долине рек Амур и Сунгари. Как установлено в [20], развитие атмосферного блокирования над Западной Сибирью происходит с вовлечением воздушных масс летнего муссона над Дальним Востоком, что и отображается в вариациях соотношения количества грозовых разрядов двух массивных грозовых очагов. Чаще всего в обоих регионах грозы происходили при ЭЦМ 9а и 13л, однако в дни максимальной грозовой деятельности очагов активность одного из них была существенно ниже. ЭЦМ 8а, 8вл, 12а и 12бл чаще способствуют активному развитию гроз в Дальневосточной области, чем в Западной Сибири. В целом наблюдаемой в период 2009–2015 гг. динамической структуре грозовой активности соответствует преобладание северной меридиональной циркуляции. Летом 2016 г. циркуляция в целом определялась южным меридиональным типом, что сказалось на грозовой структуре Северной Азии, где активность западного региона преобладала по сравнению с восточным регионом.

Список литературы

1. Никитин Д. Системы грозопеленгации на страже электросетевого хозяйства // Энергорынок. 2010. № 6. С. 17–20.
2. ГОСТ Р 50571.19-2000. Электроустановки зданий. Ч. 4: Требования по обеспечению безопасности. Гл. 44: Защита от перенапряжений. Разд. 443: Защита электроустановок от грозовых и коммутационных перенапряжений. М. : Изд-во стандартов, 2001.
3. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector / H. J. Christian, R. J. Blakeslee, D. J. Voccipio, W. L. Boeck // J. Geophys. Res. AGU, 2003. Vol. 108, N D1. P. ACL 4-1-ACL 4-15.
4. Тарабукина Л. Д., Козлов В. И. Пространственно-временное распределение грозовых разрядов по территории северного региона Азии и его сравнение с солнечной активностью в 2009–2016 гг. // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 2. С. 70–74.
5. Гирс А. А., Кондратович К. В. Методы долгосрочных прогнозов погоды. М. : Гидрометеоиздат, 1978. С. 344.
6. Dzerdzeevskii B. L. Fluctuations of Climate and of General Circulation of the Atmosphere in extratropical latitudes of the Northern Hemisphere and some problems of dynamic climatology // TELLUS. Munksgaard International Publishers. 1962. Vol. 14, N 3. P. 328–336.
7. Козлов В. И., Муллаяров В. А., Каримов Р. Р. Пространственное распределение плотности грозовых разрядов на Востоке России по данным дистанционных наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 3. С. 257–262.
8. 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. Elsevier Science Publishing Company. 2002. Vol. 64, N 7. P. 817–879.
9. Abarca S. F., Corbosiero K. L., Galarneau T. J. An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth // J. Geophys. Res. AGU. 2010. Vol. 115. P. D18206.
10. Pierce E. T. Atmospherics and radio noise // Golde R. H. (Ed.). Lightning: Physics of Lightning. 1977. Vol. 1. Academic Press. P. 351–384.
11. Location accuracy of long distance VLF lightning location network / C. J. Rodger, J. B. Brundell, R. L. Dowden, N. R. Thomson // Annales Geophysicae. Copernicus Publications. 2004. Vol. 22. P. 747–758.
12. Brook M., Ogawa T. The cloud discharge / Lightning: Physics of Lightning. 1977. Vol. 1–2. Academic Press P. 191.
13. Дзердзеевский Б. Л. Избранные труды. Общая циркуляция атмосферы и климат. М. : Наука, 1975. 288 с.
14. Кононова Н. К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому. М. : Воентехиниздат, 2009. 372 с.
15. Relative detection efficiency of the World Wide Lightning Location Network / M. L. Hutchins, R. H. Holzworth, J. B. Brundell, C. J. Rodger // Radio Science. AGU. 2012. Vol. 47, N 6. P. RS6005.

16. Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 4: Природно-климатические изменения. М.: РАСКО, 2000. 270 с.
 17. Хромов С. П. Муссоны в общей циркуляции атмосферы // А. И. Воейков и современные проблемы климатологии. М., 1956. С. 84–108.
 18. Глебова С. Ю. Изменения атмосферного режима над дальневосточным регионом в 2000–2004 гг. и предполагаемые тенденции развития на ближайшие годы // Изв. ТИНРО. 2005. Т. 142. С. 214–222.
 19. Кононова Н. К. Изменения циркуляции атмосферы северного полушария в XX–XXI столетиях и их последствия для климата // Фундамент. и приклад. климатология. 2015. Т. 1, № 1. С. 133–162.
 20. Peculiarities of the atmospheric blocking events over the Siberia and Russian Far East region during summertime / O. Yu. Antokhina, P. N. Antokhin, E. V. Devjatova, V. I. Mordinov // Proc. SPIE 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. SPIE. 2017. Vol. 10466. P. 104665V.
-