### УДК 551.594.6

Научная статья

## Анализ 11-летней динамики пространственного распределения плотности молний в Северной Азии

### Л. Д. Тарабукина, В. И. Козлов, Д. Е. Иннокентьев

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю. Г. Шафера СО РАН, 677027, г. Якутск, пр. Ленина, 31

E-mail: tarabukina@ikfia.ysn.ru

Проведен анализ 11-летних временных рядов количества грозовых разрядов суммарно по территориям двух крупных областей повышенной плотности молний (более 10 раз по сравнению со значениями на окружающем пространстве): условно обозначенных как восточный регион — 40-55° с.ш., 110-140° в.д., и западный регион — 47-62° с.ш., 60-90° в.д. Дискретное разложение рядов (разрешение в 1 сутки) с помощью вейвлет-функции Мейера до 5 уровня (восточный) и 4 уровня (западный) показало смещение максимума сезонного хода грозовой активности в регионах в начало и ближе к августу из года в год с периодом около 3 лет. Периодичность в вариациях грозовой активности более выражена в Фурье-спектрах в западном регионе: 4, 7, 14 дней. Плотность молний в Северной Азии в пространстве можно описать как пояс вокруг 50<sup>°</sup> с.ш. со смещением южнее на востоке и значительном увеличении плотности в двух областях. Предложено аналитическое выражение в виде изменяющейся с долготой гауссовой функции широтного хода, суммированной с линейной функцией фонового спада общего уровня активности к северу. Параметры, входящие в гауссову функцию, представлены зависимостью плотности от долготы. Параметр широты достаточно аппроксимируется линейной функцией долготы, параметр уширения распределения по широте – суммой трех гауссовых функций. Их межгодовое изменение пренебрегалось в данном решении. Параметр, ответственный за описание пика плотности, описывается суммой двух гауссовых функций, и в их коэффициенты введена зависимость от года. Межгодовые вариации коэффициентов вторичных функций предложено представлять в виде суммы Фурье-рядов с двумя-тремя гармониками. Таким образом, получены оценки вариабельности параметров аналитического выражения широтно-долготного распределения плотности грозовых разрядов в десятилетнем масштабе.

Ключевые слова: грозовая активность, гроза, Северная Азия, широтный ход.

### DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-159-173

Поступила в редакцию: 19.10.2020

В окончательном варианте: 01.02.2021

Для цитирования. Тарабукина Л. Д., Козлов В. И., Иннокентьев Д. Е. Анализ 11летней динамики пространственного распределения плотности молний в Северной Азии // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2021. Т. 34. № 1. С. 159-173. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-159-173

Контент публикуется на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru)

© Тарабукина Л. Д., Козлов В. И., Иннокентьев Д. Е., 2021

**Финансирование.** Исследование выполнялось при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта 18-35-00215 мол а. Приборная база поддерживается за счет бюджетной темы II.16.2.1. (номер госрегистрации AAAA-A17-117021450059-3).

### Введение

Согласно результатам наблюдений за грозовой активностью детектором OTD на спутнике Microlab-1 среднемноголетняя плотность грозовых разрядов на средних и высоких широтах в Азии более 3 раз ниже [1], чем плотность на более южных широтах. Такие значения плотности обуславливают низкий интерес исследователей в получении более точных современных данных, охватывающих всю северную часть Азии. К сожалению, эта территория слишком обширная для развертывания дорогостоящих многопунктовых сетей грозолокации высокой пространственной плотности на ней, как это было реализовано в европейской части России [2] -[5]. Поэтому для наблюдений за грозовой активностью используются большебазовые распределенные системы, основанные на приеме радиоизлучения очень низкой частоты, распространяющегося с малым затуханием на расстояния в десятки тысяч километров внутри естественного волновода, образованного подстилающей поверхностью и нижними слоями ионосферы [6] - [8]. Несмотря на имеющиеся отечественные разработки [9], [3], единственной действующей почти на всей территории России большебазовой отечественной системой грозолокации остается «Верея-МС», использующаяся для нужд авиалесохраны [10], [11]. Глобальные многопунктовые системы представлены небольшим количеством, часть из которых являются коммерческими [8], [12]. Однако для территории Сибири и в целом вокруг азиатской части России плотность станций резко падает. Спутниковый мониторинг также ограничен для анализа грозовой активности на азиатской части России [1].

## Оборудование

В работе использованы данные многопунктовой системы World wide lightning location network (WWLLN), один из пунктов которой был установлен в 2009 г. в центре города Якутска [13]. Сеть включает в себя более 70 датчиков по всему миру [6]. Импульсы молниевых разрядов очень низкой частоты регистрируются не менее чем пятью датчиками с расстояния более 6000 км, синхронизированных по времени группы [14], [15]. Как и в случае любой большебазовой сети, WWLLN обычно обнаруживает удары молнии с более сильными токами [15]. Датчик регистрирует импульсы грозовых разрядов как «облако-земля» (O3), так и «облако-облако» (ОО). Из-за ограничения диапазона очень низкими частотами и введенного порога по амплитуде сигналов, чаще регистирируются ОЗ разряды. Система обнаруживает меньшее количество ОО разрядов [16]. Однако в грозу обычно ОО молнии происходят более чем в два раза чаще, чем ОЗ удары [17] - [19]. Таким образом, WWLLN обнаруживает примерно одинаковое количество ударов обоих типов. Эффективность детектирования сети оценивалась ~10-15% для любого грозового разряда и ~30% для ударов с пиковыми токами более 40 кА по спутниковым данным для тропических регионов (в 2013, 2017 [20], [21]) и данным коммерческих сетей (как например в 2010 году) [22]. Эффективность детектирования увеличилась с ростом количества приемных пунктов до значений более 60-80% для всех разрядов с пиковыми токами более 50 кА [23]. Разность положений грозового разряда, определяемых спутниковым оптическим датчиком и WWLLN, в 2013 г. флуктуировала около 5-10 км [20]. Эффективность обнаружения варьирует в пространстве. Поэтому карты плотности молний, построенные по сетке 0.25 градуса по широте и долготе, корректировались по модели относительной эффективности детектирования, разработанной организаторами сети [24]. Каждый час плотность молний уточнялась с картами относительной эффективности детектирования, линейно интерполированными с разрешения в 1 градус на сетку с шагом 0.25 градуса. Обработка данных и поиск аналитического решения производились с помощью средств Matlab, the Mathworks Inc.

### Среднемноголетняя плотность грозовых разрядов

На территории северной Азии с границами 40-80<sup>o</sup> с.ш. и 60-180<sup>o</sup> в.д., охватывающей азиатскую часть России, наблюдается зона повышенной плотности молний, простирающаяся на средних широтах с Западносибирской равнины до восточного побережья, в которой выделяются три региона со среднемноголетней плотностью молний, превышающей значения плотности остальных территорий более чем в 10 раз (рис. 1) [25].



Рис. 1. Суммарная за летние месяцы плотность грозовых разрядов, усредненная за 2009–2019 гг. и скорректированная на относительную эффективность детектирования сети

Две крупные области повышенной плотности молний (более 10 раз по сравнению со значениями на окружающем пространстве) условно обозначены нами как «восточный» регион с условными границами  $40-55^{\circ}$  с.ш.,  $110-140^{\circ}$  в.д. и «западный» регион —  $47-62^{\circ}$  с.ш.,  $60-90^{\circ}$  в.д. Области формируются под действием разных барических систем: доминирование западного переноса в западном регионе и летнего муссонного процесса в восточном регионе. Также выделяется меньшая по охватываемой площади и с более низкими значениями плотности молний область с условными границами  $45-60^{\circ}$  с.ш.,  $90-110^{\circ}$  в.д., обозначенная нами как «центральный» регион.

В целом плотность молний из года в год имеет распределение с медианой около 0.058 молний·км<sup>-2</sup>·год<sup>-1</sup>, первым квартилем около 0.013–0.024 молний·км<sup>-2</sup>·год<sup>-1</sup> и третьим квартилем около 0.12–0.23 молний·км<sup>-2</sup>·год<sup>-1</sup>. Максимальное значение плотности по сетке 0.25 градусов отмечалось в зоне повышенной активности от

1.17 до 4.44 молний⋅км<sup>-2</sup>⋅год<sup>-1</sup>. В 2017 г. распределение плотности претерпевало некоторое смещение в сторону высоких значений, когда медиана и квартили повысились примерно в 1.3–1.5 раза по сравнению со среднемноголетними значениями. Просматривается значительная разница плотности молний на границе между сушей и мировым океаном [26] - [28], [8]. Особенно это заметно по контуру побережья на юго-востоке территории, где среднемноголетняя плотность молний претерпевает скачок около 5 раз/градус при переходе с океана на сушу. Высокие значения годовой плотности молний над океаном достигаются в северо-западной части Тихого океана южнее 45<sup>o</sup> с.ш. [29], [30].

# Анализ пространственного распределения ежегодной плотности грозовых разрядов

Плотность молний в Северной Азии в пространстве можно описать как зону вокруг 50<sup>°</sup> с.ш. со смешением южнее на востоке и значительном увеличении плотности особо в двух областях. Нами предложено аналитическое выражение в виде изменяющейся с долготой гауссовой функции широтного хода, суммированной с линейной функцией фонового спада общего уровня активности к северу. Гауссова функция выбрана, как наиболее простая. Усложнение функции лишь незначительно уменьшает невязки, но значительно усложняет расчет и может приводить к неопределенностям на пограничных масштабах, например введением зависимостей гиперболического типа. В общем виде в мировом масштабе было предложено наблюдаемые зоны повышенной грозовой активности по широте [31], [32] описывать синусоидальным законом [33]. В настоящей работе рассматривается частный случай, когда колебательный характер широтной зависимости пренебрегается и аппроксимация сводится к линейному спаду на север. Аппроксимация в виде функции Гаусса подбиралась нелинейным методом наименьших квадратов для широтных срезов с шагом в 0.25 градусов по долготе по карте ежегодной плотности молний, скорректированной на относительную эффективность сети (в этом состоит отличие значений коэффициентов от стационарного среднемноголетнего выражения в [25]).

Предлагается аналитическое выражение плотности молний, распределенной по широте ( $\phi$ ) и долготе ( $\lambda$ ) в зависимости от года наблюдения (t):

$$P(\varphi,\lambda,t) = A(\lambda,t) \exp\left(-\left(\frac{\varphi - B(\lambda)}{C(\lambda)}\right)^2\right) + A_2(t)\varphi + B_2(t)$$

После адаптации выражения плотности молний для каждого летнего сезона 2009–2019 гг., для данной работы были введены ограничения: ежегодные флуктуации  $B(\lambda)$  и  $C(\lambda)$  параметров были приняты незначительными. Параметры усреднялись за 11 лет, и таким образом зависимость от долготы аппроксимировалась робастным линейным методом наименьших квадратов, исключая выбросы около 100–120° в.д. и 140–160° в.д., где срез по широте плохо описывается одиночной гауссовой функцией:  $B(\lambda) = -0.2\lambda + 74.2$ ,  $R^2 = 0.98$ , (95% доверительный интервал уклона:

$$-0.23 - -0.205); C(\lambda) = 5.9 \exp\left(-\left(\frac{\lambda - 74.4}{23.9}\right)^2\right) + 23.1 \exp\left(-\left(\frac{\lambda - 116.4}{6.1}\right)^2\right) +$$

+32.3 exp
$$\left(-\left(\frac{\lambda - 168.9}{29.3}\right)^2\right)$$
,  $R^2 = 0.89$ .

Параметр  $B(\lambda)$  характеризует линейное смещение зоны плотности молний на юг при увеличении долготы. Параметр  $C(\lambda)$  определяет ширину зоны по широте, которая формируется за счет пространственного распределения плотности молний в трех регионах: западном, восточном и над северо-западной частью Тихого океана. Разброс над третьим регионом самый значительный, так как модель плохо описывает континентальные грозы на севере и южные грозы над океаном.

Изменение плотности молний с годами представлено нами через вариации коэффициента значений максимума плотности молний, которые приходятся на регионы повышенной плотности, западный и восточный регионы (рис. 2):



**Рис. 2.** Флуктуации параметра  $A(\lambda, t)$  по долготе, год помечен цветом маркера. Пунктирная линия обозначает аппроксимацию среднемноголетнего

и флуктуации коэффициентов линейного хода:  $A_2(t)$  и  $B_2(t)$  (рис. 3)



Рис. 3. Значения (точечный маркер) и аппроксимации (линия) коэффициентов A<sub>2</sub>(t) (слева) и B<sub>2</sub>(t) (справа)

Коэффициент детерминации аппроксимации  $A(\lambda,t)$ , выведенной методом наименьших квадратов, за каждый год варьирует в пределах от 0.34 (2019 г.) до 0.83 (2011 г.).

Коэффициенты, зависящие от года наблюдения были аппроксимированы рядами Фурье с помощью нелинейного метода наименьших квадратов и имеют следующий вид:

$$a_n(t) = \alpha_0 + \sum_{k=1}^{2-3} \left( \alpha_k \cos\left(k\omega t\right) + \beta_k \sin\left(k\omega t\right) \right).$$

Описания вариаций параметров  $A_2(t)$  и  $B_2(t)$  одночастотным колебанием с периодом ~ 5.4 года соответствуют коэффициенту детерминации равному ~ 0.4. Сумма колебаний двух частот показывает несоответствие поведения аппроксимации за пределами рассматриваемого интервала лет с параметром  $B_2(t)$ , изменяя значения в отрицательную сторону, не представляющей физического смысла. Сумма колебаний двух частот соответствует параметру  $A_2(t)$  с  $R^2 = 0.66$ . Дополнение выражения третьей гармоникой показывает соответствие с данными обоих параметров с коэффициентом детерминации до 0.89 (рис. 3).

- Коэффициенты  $A_2(t)$  (в скобках приведены границы 95% доверительного интервала):  $\alpha_0 = -0.0028$  (-0.0032--0.0025);  $\alpha_1 = 2.2 \times 10^{-4}$ ,  $\beta_1 = -6.2 \times 10^{-5}$ ,  $\alpha_2 = -2.2 \times 10^{-5}$ ,  $\beta_2 = 3.8 \times 10^{-4}$ ,  $\alpha_3 = 4.2 \times 10^{-5}$ ,  $\beta_3 = 4.8 \times 10^{-4}$ ,  $\omega = 0.63$  (0.52-0.74),  $R^2 = 0.9$ ;
- коэффициенты  $B_2(t)$ :  $\alpha_0 = 0.24$  (0.21–0.26),  $\alpha_1 = -0.004$ ,  $\beta_1 = -0.003$ ,  $\alpha_2 = 0.0063$ ,  $\beta_2 = -0.027$ ,  $\alpha_3 = 0.0061$ ,  $\beta_3 = -0.0385$ ,  $\omega = 0.64$  (0.53–0.76),  $R^2 = 0.85$ .

В целом скорость спада плотности молний на север  $A_2(t)$  и значения плотности на южной границе  $B_2(t)$  флуктуируют в пределах 1.5 раза, но с учетом порядка значений флуктуации можно принять незначительными.

Полученные аппроксимации вариаций коэффициентов в двух гауссовых функциях, входящих в выражение параметра  $A(\lambda, t)$ , который характеризует пик плотности молний, ожидаемо состоят, в основном, из колебаний гармоник ~ 11 лет.

1)  $a_n(t)$  — вариации величины пиков плотности в западном (~70<sup>o</sup> с.ш.) и восточном (~129<sup>o</sup> с.ш.) (рис. 4) регионах рассматриваемой территории (в скобках



Рис. 4. Значения коэффициента *a<sub>n</sub>* (маркер) и его аппроксимация (линия) в западном регионе (слева), восточном регионе (справа)

приведены границы 95% доверительного интервала):

• Западный регион:  $\alpha_0 = 0.34$  (0.26-0.42),  $\alpha_1 = -0.06$ ,  $\beta_1 = -0.1$ ,  $\alpha_2 = -0.03$ ,  $\beta_2 = 0.03$ ,  $\omega = 0.56$  (0.17-0.95),  $R^2 = 0.84$ ;

• Восточный регион:  $\alpha_0 = 0.37$  (0.19-0.54),  $\alpha_1 = 0.04$ ,  $\beta_1 = -0.01$ ,  $\alpha_2 = 0.12$ ,  $\beta_2 = 0.04$ ,  $\alpha_3 = 0.07$ ,  $\beta_3 = 0.09$ ,  $\omega = 0.98$  (0.82-1.14),  $R^2 = 0.7$ ;

Полученные вариации согласуются с вариациями упрощенной интегральной характеристики — суммарным по территории и за лето количеством грозовых разрядов в рассматриваемых регионах (рис. 5).



Рис. 5. Суммарное годовое количество грозовых разрядов в регионах Северной Азии (кривые с маркерами) и линейный тренд с указанием доверительного интервала (штрих-линии)

Количество грозовых разрядов, зарегистрированных WWLLN по всей территории Северной Азии, показывает некий положительный тренд в 2009–2019 гг.: 86863.8*x* – 1.7 × 10<sup>8</sup> (95% доверительный интервал коэффициента наклона от 11027 до 162700.6 разряд/год), где *x* — порядок года наблюдения, с коэффициентом детерминации 0.43. Так же положительный тренд имеют вариации количества грозовых разрядов в западном и центральном регионах. Западный регион: 39298.7*x* – 7.8 × 10<sup>7</sup>, (доверительный интервал 95% от 1775.8 до 76821.7 разряд/год,  $R^2 = 0.38$ ), и центральный регион: 12496.8*x* – 2.5 × 10<sup>7</sup>, где *x* — порядок года (доверительный интервал 95% от –174.1 до 25167.8 разряд/год,  $R^2 = 0.356$ ).

Вариация количества разрядов в восточном регионе не проявляет тенденцию за 11 лет наблюдения по уровню значимости 0.05:  $-11412.9x + 2.4 \times 10^7$ , где x – порядок года наблюдения,  $R^2 = 0.036$  (наклон входит в доверительный интервал

95% от -55354.2 до 32528.5). В каждой вариации суммарного количества грозовых разрядов выделяется локальный пик 2017 г.

**2)**  $b_n(t)$  — смещение долготы пика плотности молний на запад и восток (рис. 6)



**Рис. 6.** Значения коэффициента *b<sub>n</sub>* (маркер) и его аппроксимация (линия) в западном регионе (слева), восточном регионе (справа)

- западный регион:  $\alpha_0 = 71.71$  (60.84–82.58),  $\alpha_1 = -3.46$ ,  $\beta_1 = 6.29$ ,  $\alpha_2 = -11.12$ ,  $\beta_2 = -6.72$ ,  $\omega = 0.95$  (0.79–1.11),  $R^2 = 0.56$ ;
- восточный регион:  $\alpha_0 = 129.7$  (127.5–131.9),  $\alpha_1 = 2.2$ ,  $\beta_1 = -0.32$ ,  $\alpha_2 = -0.12$ ,  $\beta_2 = 2$ ,  $\alpha_3 = 2$ ,  $\beta_3 = 0.38$ ,  $\omega = 0.54$  (0.35–0.74),  $R^2 = 0.85$ ;





Рис. 7. Значения коэффициента *c<sub>n</sub>* (маркер) и его аппроксимация (линия) в западном регионе (слева), восточном регионе (справа)

- западном регионе:  $\alpha_0 = 36.39$  (30.86–41.93),  $\alpha_1 = 6.1$ ,  $\beta_1 = 2.7$ ,  $\alpha_2 = 0.65$ ,  $\beta_2 = -4.73$ ,  $\omega = 0.74$  (0.57–0.91),  $R^2 = 0.61$ ;
- ВОСТОЧНОМ РЕГИОНЕ:  $\alpha_0 = 8.9$  (8.12–9.67),  $\alpha_1 = -0.18$ ,  $\beta_1 = -1.15$ ,  $\alpha_2 = 0.78$ ,  $\beta_2 = 0.26$ ,  $\alpha_3 = 0.41$ ,  $\beta_3 = -0.41$ ,  $\omega = 1.31$  (1.04–1.57),  $R^2 = 0.84$ .

Таким образом краткосрочные тренды за 11 лет в изменениях пространственного распределения плотности молний не наблюдаются, кроме значимой положительной

тенденции пика плотности в западном регионе. Вариации показывают колебательный характер. При чем амплитуда колебаний в градусах долготы (параметры  $b_n(t)$ ,  $c_n(t)$ ) в западном регионе намного превышает амплитуды колебаний параметров в восточном регионе, где грозовая активность представляется более локализованной, вероятно, благодаря муссонному происхождению. Для повышения значимости необходимо продолжение увеличения лет наблюдений.

## Сезонный ход

Для анализа ежегодных изменений вида сезонного хода количества грозовых разрядов за сутки были применены методы сглаживания с помощью скользящего среднего с окном в 14 дней декомпозиции вариаций до 5 уровня с принятым в данной работе базисным дискретным вейвлетом Мейера [34]. Окно скользящего среднего выбрано как максимальная длительность циклона умеренных широт, либо длительность серии из 2 циклонов [35].



Рис. 8. Пример сезонного разрядов хода суммарного количества грозовых «западном» (верхняя панель). «восточном» (средняя панель) и В панель) регионах в 2018-2019 «центральном» (нижняя гг. Поверх экспериментальных данных наложены скользящие средние (сплошная линия), коэффициенты аппроксимации 5 уровня (пунктирная линия), и 4 уровня (пунктирная линия с коротким штрихом)

Сглаживающие методы сезонного хода количества грозовых разрядов показывают наличие до 4 периодов повышенной грозовой активности выше порогового значения в 75% распределения за 11 лет при фильтрации скользящим средним за 14 дней и декомпозиции вейвлет-преобразованием до 4 уровня со средним значением 1.9 периодов для западного региона, 2.9 для восточного региона и 2.8 для центрального региона. Декомпозиция до 5 уровня оставляет в среднем 1–2 локальных максимума, то есть сезонный ход имеет вид полуволны с одной или двумя модами, подобный ход является типовым и в локальных наблюдениях [36] (рис. 8).

Выбранный порог в 75% распределения значений за 11 лет составил 1527, 3190 и 4413 молнии/сутки для центрального, восточного и западного регионов соответственно.

Пики грозовой активности, обусловленные интенсивными грозами, покрывающими большую часть рассматриваемого региона, приходятся на начало и двадцатые числа июня, середину июля и реже на начало августа. Время наступления этих пиков грозовой активности достаточно устойчиво, хотя величина их варьируется от года к году. Наблюдается смещение максимума сезонного хода грозовой активности в регионах в начало и ближе к августу из года в год с периодом около 3 лет. Смещение наблюдалось как в дискретном разложении рядов (разрешение в 1 сутки) с помощью дискретного вейвлета Мейера до 5 уровня, а также при простом интегрировании количества грозовых разрядов по всей площади регионов за месяц. Подобное явление смещения максимума сезонного хода наблюдалось в региональных измерениях в Якутии с 2007 года, до этого максимум стабильно приходился на июль [37].

### Периодичность внутри сезона

В спектрах Фурье 11-летних рядов суммарного суточного количества грозовых разрядов явны гармоники годового колебания: 372.4, 186.2, 120.5, 91, 43–45, 22.3–23.9, 11.3–11.7, 5.7–5.9 и 2.8. Помимо гармоник можно выделить некоторые следующие периоды длительностью менее месяца: 4, 7, 14, 17 дней. Эти периоды выделяются в вариациях количества грозовых разрядов во всех трех регионах повышенной плотности молний. Остальные периоды, присущие для отдельных регионов, приведены в таблице.

Таблица

западный			восточный			центральный		
Период	Частота	Ампли-	Период	Частота	Ампли-	Период	Частота	Ампли-
день	день <sup>-1</sup>	туда	день	день <sup>-1</sup>	туда	день	день <sup>-1</sup>	туда
29.9	0.034	346.2	29.05	0.034	298.2	26.09	0.038	298.2
_	—	—	—	—	_	19.7	0.051	114.4
17.7	0.057	307.3	16.93	0.059	204.9	17.1	0.058	125.2
14.9	0.067	365.9	14.58	0.069	263.9	13.6	0.073	77.3
_	—	—	9.55	0.105	220.9	9.2	0.108	112
7.6	0.131	244.6	7.94	0.126	150.2	7.9	0.126	115.2
_	—	—	7.3	0.137	193.5	6.1	0.164	74.82
5	0.199	148.7	6.32	0.158	189.9	5.5	0.183	54.1
3.8	0.262	185.5	4.41	0.227	271.2	4.4	0.225	85.93

Периодичность грозовой активности в спектрах Фурье

Выделенные Фурье-анализом периоды выявляются так же с помощью непрерывного вейвлет-преобразования (рис. 9).



Рис. 9. Коэффициент непрерывного вейвлет-преобразования для трех регионов

Периодичность в 7 и 14 дней проявляется не стабильно, что можно объяснить вариациями количества в сериях циклонов и антициклонов на обозреваемой площади год от года.

### Заключение

Декомпозиция ряда (суточного разрешения) с использованием дискретной вейвлет функции Мейера на пятый уровень (восточный) и четвертый уровень (западный) показала смещение максимума сезонной вариации в регионах с начала июня до начала августа год от года с периодом около 3 лет.

Периодичность сезонных колебаний числа молний, полученных Фурье анализом, более отчетливо проявилась в западной области: 4, 7, 14, 17 суток.

Пространственное распределение плотности молний в Северной Азии можно описать как пояс около  $50^{\circ}$  с.ш. со смещением более чем на 5 градусов по широте к югу на востоке со значительными пиками плотности, особенно в двух регионах. Аналитическое выражение предлагается в виде широтной функции Гаусса, изменяющейся с долготой, суммированной с линейной функцией по мере уменьшения фона к северу от общего уровня грозовой активности. Параметры, входящие в функцию Гаусса, представлены зависимостью плотности от долготы. Параметр положения по широте в достаточной степени аппроксимируется линейной функцией долготы, а параметр расширения широтного распределения представляет собой сумму трех функций Гаусса. Параметр, отвечающий за описание пика плотности, определяется суммой двух функций Гаусса, а их коэффициенты зависят от года как сумма ряда Фурье с двумя или тремя гармониками. Таким образом, в западном регионе выделяется 11-летний положительный тренд в грозовой активности (около

60-90° в.д., 47-62° с.ш.), наблюдаются значительные смещения максимума вдоль долготы до 20 градусов. Грозовая активность в восточном регионе не проявляет многолетних тенденций и более локализована в отличие от активности в западном регионе (не более 10 градусов смещение максимума до долготе).

**Конкурирующие интересы.** Авторы заявляют, что конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

**Авторский вклад и ответственность.** Все авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

### Список литература/References

- [1] Cecil D. J., Buechler D. E., Blakeslee R. J., "Gridded lightning climatology from TRMM-LIS and OTD: Dataset description", *Atmospheric Research*, **135** (2014), 404–414.
- [2] Снегуров А. В., Снегуров В. С., "Сравнение характеристик многопунктовых грозопеленгационных систем", *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*, 2019, № 595, 22–62.. [Snegurov A. V., Snegurov V. S., "Sravnenie kharakteristik mnogopunktovykh grozo-pelengatsionnykh sistem", *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voeykova*, 2019, № 595, 22–62 (in Russian)].
- [3] Снегуров А. В., Снегуров В. С., "Система местоопределения гроз", Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, 2017, № 586, 117–140. [Snegurov A. V., Snegurov V. S., "Sistema mestoopredeleniya groz", Trudy Glavnoygeofizicheskoy observatorii im. A.I. Voeykova, 2017, № 586, 117–140 (in Russian)].
- [4] Аджиев А. Х. и др., "Территориальные особенности грозовой активности на Северном Кавказе по метеорологическим и инструментальным данным", *Метеорология и гидрология*, 2015, № 4, 46–52. [Adzhiev A. Kh. et al., "Territorial'nye osobennosti grozovoy aktivnosti na SevernomKavkaze po meteorologicheskim i instrumental'nym dannym", *Meteorologiya i gid-rologiya*, 2015, № 4, 46–52 (in Russian)].
- [5] Аджиева А. А., Кокоева М. Н., "Динамический мониторинг данных параметров токов молний на территории юга европейской части России", Инженерный вестник Дона, 2019, № 5, 3. [Adzhieva A. A., Kokoeva M. N., "Dinamicheskiy monitoring dannykh parametrov tokov molniy na territorii yuga evropeyskoy chasti Rossii", Inzhenernyy vestnik Dona, 2019, № 5, 3 (in Russian))].
- [6] "World Wide Lightning Location Network.", wwlln.net (дата обращения: 8.08.2020)..
- [7] Шанкибаева М. Х., Каранина С. Ю., Кочеева Н. А., "Изучение характера проявления гроз в горах юга Западной Сибири", В сборнике: современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России. Материалы Всероссийской научнопрактической конференции, 2018, 428–433. [Shankibaeva M. Kh., Karanina S. Yu., Kocheeva N. A., "Izuchenie kharaktera proyavleniya groz v gorakh yuga Zapadnoy Sibiri", V sbornike: sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii. Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 2018, 428-433 (in Russian)].
- [8] Said R. K., Cohen M. B., Inan U. S., "Highly intense lightning over the oceans: Estimated peak currents from global GLD360 observations", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **118**:13 (2013), 6905–6915.
- [9] Кононов И. И. и др., "Амплитудно-гиперболический метод местоопределения молниевых разрядов", Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, 2016, № 581, 176–192. [Kononov I. I. et al., "Amplitudno-giperbolicheskiy metod mestoopredeleniya molnie-vykh razryadov", Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voeykova, 2016, № 581, 176–192 (in Russian)].
- [10] Орлова А. А., Валеев А. Р., Раскулова А. И., "Системы пеленгации грозовой активности", Электротехнические комплексы и системы, 2017, 164–168. [Orlova A. A., Valeev A. R., Raskulova A. I., "Sistemy pelengatsii grozovoy aktivnosti", Elektrotekhnicheskie kompleksy i sistemy, 2017, 164–168 (in Russian)].
- [11] Московенко В. М., Знаменщиков Б. П., Золотарев С. В., "Применение системы грозопеленгации «Верея-МР» в интересах электроэнергетики России", *Новое в российской электроэнергетике*, 2012, № 2, 15–23. [Moskovenko V. M., Znamenshchikov B. P.,

Zolotarev S. V., "Primenenie sistemy grozopelengatsii «Vereya-MR» v interesakh elektroenergetiki Rossii", *Novoe v rossiyskoy elektroenergetike*, 2012, №2, 15–23 (in Russian)].

- [12] Koehler T. L., "Cloud-to-ground lightning flash density and thunderstorm day distributions over the contiguous United States derived from NLDN measurements: 1993–2018", *Monthly Weather Review*, **148**:1 (2020), 313–332.
- [13] 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, 8:3 (2011), 257–262. [Kozlov V. I., Mullayarov V. A., Karimov R. R., "Prostranstvennoe raspredelenie plotnosti grozovykh razryadov na Vostoke Rossii po dannym distantsionnykh nablyudeniy", Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 8:3 (2011), 257–262 (in Russian)].
- [14] Dowden R. L., Brundell J. B., Rodger C. J., "VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites", *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **64** (2002), 817–830.
- [15] Hutchins M. L. et al., "Far-field power of lightning strokes as measured by the World Wide Lightning Location Network", J. Atmos. Ocean. Technol., **29** (2012), 1102–1110.
- [16] Rodger C. J. et al., "Detection efficiency of the VLF World-Wide Lightning Location Network (WWLLN): Initial case study", Ann. Geophys., 24 (2006), 3197–3214.
- [17] De Souza P. et al., "The intracloud/cloud-to-ground lightning ratio in Southeastern Brazil", *Atmos. Res.*, **91** (2009), 491–499.
- [18] Soriano L. R., de Pablo F., "Total flash density and the intracloud/cloud-to-ground lightning ratio over the Iberian Peninsula", *J. Geophys. Res. Atmos.*, **112** (2007), D13114.
- [19] Adzhiev A. H., Kuliev D. D., "Characteristics of Storm Activity and Parameters of Lightning Discharges in the South of the European Part of Russia", *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 54 (2018), 372–379.
- [20] Rudlosky S. D., Shea D. T., "Evaluating WWLLN performance relative to TRMM/LIS", *Geophys. Res. Lett.*, 40 (2013), 2344–2348.
- [21] Bürgesser R. E., "Assessment of the World Wide Lightning Location Network (WWLLN) detection efficiency by comparison to the Lightning Imaging Sensor (LIS)", Q. J. R. Meteorol. Soc., 143 (2017), 2809–2817.
- [22] Abarca S. F., Corbosiero K. L., Galarneau T. J., "An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth", J. Geophys. Res. Atmos., 115 (2010).
- [23] Holzworth R. H. et al., "Global Distribution of Superbolts", J. Geophys. Res. Atmos., 124 (2019), 9996–10005.
- [24] Hutchins M. L. et al., "Relative detection efficiency of the World Wide Lightning Location Network", *Radio Sci.*, 2012, № 47, 1–9.
- [25] Тарабукина Л. Д., Козлов В. И., Каримов Р. Р., "Аналитическое выражение для распределения плотности грозовых разрядов по территории Северной Азии", Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 13:3 (2016), 184–191. [Tarabukina L. D., Kozlov V. I., Karimov R. R., "Analiticheskoe vyrazhenie dlya raspredeleniya plotnosti grozovykh razryadov po territorii Severnoy Azii", Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 13:3 (2016), 184–191 (in Russian)].
- [26] Williams E., Stanfill S., "The physical origin of the land-ocean contrast in lightning activity", *Comptes Rendus Physique*, **3**:10 (2002), 1277–1292.
- [27] Hutchins M. L., et al., "Radiated VLF energy differences of land and oceanic lightning", *Geophysical Research Letters*, **40**:10 (2013), 2390–2394.
- [28] Boccippio D. J., Goodman S. J., Heckman S., "Regional differences in tropical lightning distributions", *Journal of Applied Meteorology*, **39**:12 (2000), 2231–2248.
- [29] Zhang W. et al., "Lightning climatology over the northwest Pacific region: An 11-year study using data from the World Wide Lightning Location Network", *Atmospheric Research*, 210 (2018), 41–57.
- [30] Tsurushima D., Sakaida K., Honma N., "Spatial distribution of cold-season lightning frequency in the coastal areas of the Sea of Japan", *Prog. in Earth and Planet. Sci.*, 4 (2017), 7.

- [31] Sato M. et al., "Global distribution of intense lightning discharges and their seasonal variations", *Journal of Physics D: Applied Physics*, **41**:23 (2008), 234011.
- [32] Beirle S. et al., "Global patterns of lightning properties derived by OTD and LIS", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **14**:10 (2014), 2715–2726.
- [33] Mackerras D. et al., "Global lightning: Total, cloud and ground flash estimates", *Journal* of Geophysical Research: Atmospheres, **103**:D16 (1998), 19791–19808.
- [34] Московский С. Б., Сергеев А. Н., Лалина Н. А., "Очистка сигнала от шумов с использованием вейвлет-преобразования", Universum: технические науки, 2015, № 2 (15), https://7universum.com/ru/tech/archive/item/1958 (дата обращения: 16.10.2020). [Moskovskiy S. B., Sergeev A. N., Lalina N. A., "Ochistka signala ot shumov s ispol'zovaniem veyvlet-preobrazovaniya", Universum: tekhnicheskie nauki, 2015, №2 (15) (in Russian)].
- [35] Дашко Н. А., Курс лекций по синоптической метеорологии, ДВГУ, Владивосток, 2005, http://sites.google.com/site/dashkonina/Home (дата обращения: 16.10.2020). [Dashko N. A., Kurs lektsiy po sinopticheskoy meteorologii, DVGU, Vladivostok, 2005 (in Russian)].
- [36] Козлов В. И., Муллаяров В. А., Грозовая активность в Якутии, ЯФ Изд-ва СО РАН, Якутск, 2004, 103 с. [Kozlov V. I., Mullayarov V. A., Grozovaya aktivnost' v Yakutii, YaF Izd-va SO RAN, Yakutsk, 2004 (in Russian), 103 pp.]
- [37] Tarabukina L., Kozlov V., "Seasonal Variability of Lightning Activity in Yakutia in 2009–2019", *Atmosphere*, **11**:9 (2020), 918.

MSC 86A10

Research Article

## Analysis of 11-years dynamics in spatial distribution of lightning density in North Asia

### L. D. Tarabukina, V. I. Kozlov, D. E. Innokentiev

Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of the SB RAS, 677027, Yakutsk, Lenina ave., 31, Russia

E-mail: tarabukina@ikfia.ysn.ru

In this study, we analyzed 11-year time series of lightning strokes number over two large areas with increased lightning density (more than 10 times compared with the values in the surrounding area). The so-called "eastern" region is  $40-55^{\circ}$  N,  $110-140^{\circ}$  E, and the "western" region is  $47-62^{\circ}$  N,  $60-90^{\circ}$  E. The discrete decomposition of the series (of daily resolution) using the Meyer wavelet function to fifth level (eastern) and forth level (western) showed a shift in the maximum of seasonal variation in the regions from the beginning of June to beginning of August from year to year with a period of about 3 years. The periodicity in the seasonal variations of lightning number obtained by the Fourier spectra appeared in the western region more clearly: 4, 7, 14 days. The spatial distribution of lightning density in North Asia can be described as a belt around 50° N with a more than 5 degrees latitude shift to the south in the east with significant peaks in density especially in two regions. The analytical expression is suggested in the form of a latitudinal Gaussian function varying with longitude summarized with a linear function as the background decline to the north of the general lightning activity level. Thus, estimates of the variability of the analytical expression parameters defined the latitudinal-longitudinal distribution of the lightning density on a ten-year scale were obtained.

Key words: lightning activity, thunderstorm, North Asia, analytical expression.

DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-159-173

Original article submitted: 19.10.2020

Revision submitted: 01.02.2021

**For citation.** Tarabukina L. D., Kozlov V. I., Innokentiev D. E. Analysis of 11-years dynamics in spatial distribution of lightning density in North Asia. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2021, **34**: 1, 159-173. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-159-173

**Competing interests.** The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

**Contribution and Responsibility.** All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

*The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License* (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru)

© Tarabukina L. D., Kozlov V. I., Innokentiev D. E., 2021

**Funding.** The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the research project 18-35-00215 mol a. The instrument base is supported by budgetary theme II.16.2.1. (state registration number AAAA-A17-117021450059-3).