
КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.583

ИССЛЕДОВАНИЕ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ АМПЛИТУДЫ ПЕРВОЙ ГАРМОНИКИ РЯДОВ СУТОЧНЫХ СУММ ОСАДКОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

© 2024 г. И. О. Попов^{1,2,*}, Е. Н. Попова^{2,**}

Представлено академиком РАН В.М. Котляковым 20.12.2023 г.

Поступило 20.12.2023 г.

После доработки 01.02.2024 г.

Принято к публикации 05.02.2024 г.

По данным станций метеонаблюдений проведена оценка статистической значимости величин амплитуды первой гармоники рядов среднесезонных суточных сумм осадков на территории России за 1961–2020 гг. и их изменений в 1991–2020 гг. по сравнению с периодом 1961–1990 гг. Показано, что на большей части станций первая гармоника имеет достоверное значение, отличное от шумового, кроме одиннадцати станций в южных регионах Европейской части России. Выявлено, что в среднем по России наблюдается достоверное уменьшение амплитуд первой гармоники рядов суточных сумм осадков. Выполнен анализ пространственного распределения исследуемых величин и продемонстрировано наличие обширных областей с их однородным характером.

Ключевые слова: изменение климата, осадки, преобразование Фурье, пермутационный тест

DOI: 10.31857/S2686739724050177

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что суточные значения осадков при многолетнем осреднении демонстрируют различные периодические колебания во времени [1]. Особое фундаментальное и прикладное значение имеют колебания годовой периодичности. Эти колебания вызваны разными причинами, которые в конечном счёте сводятся к годовым изменениям наклона земной оси относительно Солнца и, в результате, к периодическим изменениям потока солнечной радиации к земной поверхности и изменениям температуры нижних слоёв тропосферы, вызывающим периодические изменения содержания влаги в воздухе, сезонным изменениям в циркуляции атмосферы и т.п. Местные особенности годового хода осадков определяются широтой, рельефом, близостью морей и океанов, биотой и другими причинами [1].

Разные климатические зоны характеризуются разным годовым ходом осадков. Для умеренных широт характерен годовой ход суточных значений осадков, осреднённых за достаточно продолжительный период, с одним преобладающим максимумом, приходящимся, в основном, на летний или осенний период [2].

В настоящее время имеются несколько методов определения внутригодового хода количества осадков. В частности, были предложены различные индексы, позволяющие оценить как периодические, так и непериодические колебания и неоднородности [3, 4]. Преобразование Фурье является мощным инструментом, позволяющим исследовать периодическую структуру временных процессов самой разнообразной природы, что делает его широко применяемым в технике и научных исследованиях [5]. В климатологии этот метод также находит достаточно широкое применение [6–9].

Первая гармоника при анализе годового временного ряда определяет годовое периодическое колебание исследуемой величины, а также наличие одного выраженного годового максимума. Очевидно, это делает её особенно важной при анализе сезонных различий осадков в умеренных широтах [2]. Исследование изменений

¹Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля, Москва, Россия

²Институт географии Российской Академии наук, Москва, Россия

*E-mail: igor_o_popov@mail.ru

**E-mail: en_popova@mail.ru

годового хода осадков с применением преобразования Фурье проводилось, в частности, для Антарктиды [10].

Временной режим осадков на территории России исследовался в разных аспектах. В частности, был показан положительный тренд годовой и сезонной сумм осадков за последние десятилетия [11, 12]. Ряд исследований посвящён оценке изменений частот экстремальных осадков и их связи с изменением температурного режима поверхности Земли [13, 14]. Проводилось изучение изменения продолжительностей однородных периодов с осадками и без них [15]. При этом исследований годового хода осадков и его изменений, в частности, с применением преобразования Фурье, выполненных за последние десятилетия, авторами обнаружено не было.

Целью данной работы была оценка достоверности значений амплитуды первой гармоники годовых рядов среднемноголетних суточных сумм осадков на территории Российской Федерации в 1961–2020 гг. и их изменений за период 1991–2020 гг. по сравнению с периодом 1961–1990 гг., а также анализ пространственного распределения этих величин. Данное исследование – новое для территории РФ – является базовым для дальнейшего изучения годового хода осадков с применением анализа амплитуд и фаз гармоник, в том числе более высоких порядков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Источником метеоданных служила база результатов метеонаблюдений суточного разрешения TTTR, созданная во Всероссийском научно-исследовательском институте гидрометеорологической информации – Мировом центре данных (ВНИИГМИ-МЦД, <http://www.meteo.ru>). Были отобраны 418 станций, расположенных на территории России, данные по осадкам с которых имели менее 10% пропусков за период 1961–2020 гг., что, как показано, не оказывает достоверного влияния на изменение статистических характеристик временных рядов [16].

Суточные значения осадков осреднялись вместе и отдельно по двум анализируемым периодам. Данные за 29 февраля в високосные годы отбрасывались. Для полученных рядов из 365 значений среднемноголетних суточных значений производилось быстрое преобразование Фурье с помощью пакета `scipy.stats.fft` для языка программирования Python 3. Полученные коэффициенты быстрого преобразования имеют комплексную форму. Амплитуду k -ой гармоники A_k

можно получить, рассчитав модуль соответствующих комплексных коэффициентов по формуле:

$$A_k = 2 \left(\text{Re}_k^2 + \text{Im}_k^2 \right)^{1/2},$$

где Re_k и Im_k – вещественная и мнимая части комплексного числа.

Очевидно, временные ряды могут иметь незначимые гармонические составляющие, представляющие собой случайные шумы. В данном исследовании производился отбор станций, имеющих статистически достоверные, отличные от шумовых, значения амплитуд первой гармоники рядов суточных сумм осадков, осреднённых за период 1961–2020 гг.

В случае нормального распределения данных известны достаточно простые формулы, позволяющие дать оценку доверительных интервалов амплитуд гармоник [17]. Однако при распределении, отличном от нормального, эти формулы могут давать очень сильно завышенные значения доверительных границ.

Тест Колмогорова–Смирнова на нормальность распределения исследуемых рядов среднемноголетних суточных сумм осадков показал, что для всех станций распределение этих величин было сильно отлично от нормального (p -значения ниже 10^{-5}). При этом для 78% станций этот тест позволил принять гипотезу о гамма-распределении с параметрами, рассчитанными методом моментов. По этой причине определение статистической значимости амплитуд гармонических составляющих проводилось с помощью пермутационного теста, не имеющего ограничения по характеру распределения анализируемых данных [6, 18]. В качестве нулевой гипотезы было принято случайное распределение значений во времени, при котором все гармоники имеют одинаковые амплитуды, т.е. данные представляют собой белый шум. Для проведения теста значения временного ряда случайным образом перемешивались. Для каждой такой случайной последовательности производилось быстрое преобразование Фурье и вычислялась амплитуда первой гармоники. Эта процедура повторялась 10^4 раз. Граница значимости амплитуды первой гармоники для каждой станции определялась как 95%-й процентиль полученного случайного распределения.

Исследование достоверности наблюдаемых изменений значений амплитуд первой гармоники в 1991–2020 гг. ($A_1^{(2 \text{ набл.})}$) по сравнению с периодом 1961–1990 гг. ($A_1^{(1 \text{ набл.})}$) также

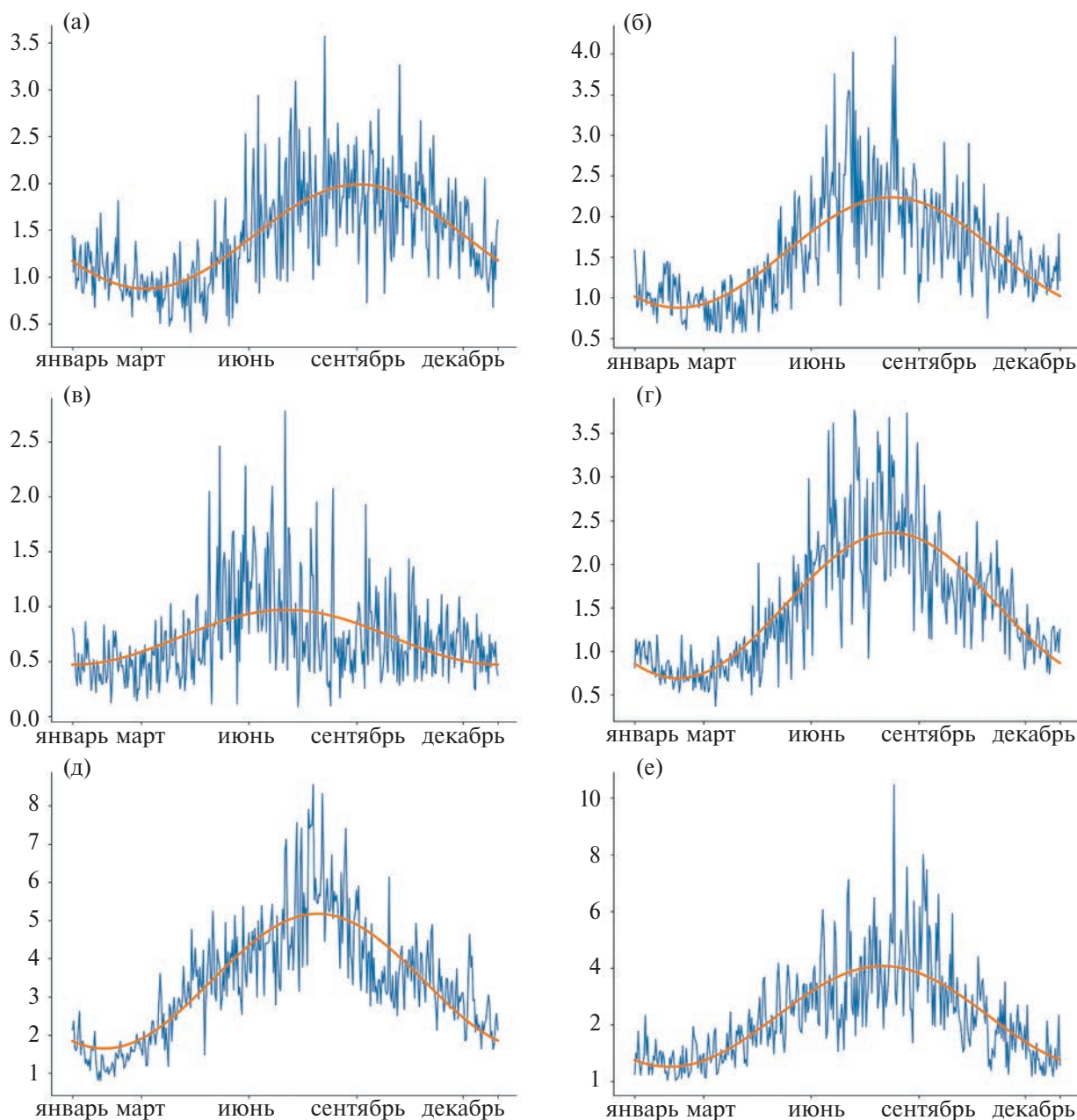


Рис. 1. Графики годового хода среднемноголетних суточных сумм осадков за период 1961–2020 гг. (синяя линия) и хода первой гармоники (оранжевая линия). Данные для станций: (а) WMO 22324 (Умба, 66°41' с. ш., 34°21' в. д.), (б) WMO 27037 (Вологда, 59°19' с. ш., 39°55' в. д.), (в) WMO 34866 (Яшкуль, 46°11' с. ш., 45°21' в. д.), (г) WMO 23867 (Ларьяк, 61°06' с. ш., 80°15' в. д.), (д) WMO 29974 (Оленья Речка, 52°48' с. ш., 93°14' в. д.), (е) WMO 31909 (Терней, 45°0' с. ш., 136°36' в. д.). На оси абсцисс обозначены даты начала соответствующих месяцев.

проводилось с помощью пермутационного теста. Станции, не продемонстрировавшие достоверно отличных от шума значений амплитуд первой гармоники, не участвовали в этом исследовании.

Пермутационный тест для оценки достоверности изменений амплитуд проводился следующим образом. В качестве нулевой гипотезы

было взято предположение о неизменности амплитуд обоих периодов. Для её проверки для каждой станции вычислялись значения амплитуд годовых рядов суточных сумм осадков, осреднённых для каждого из двух периодов $A_1^{(1 \text{ набл.})}$ и $A_1^{(2 \text{ набл.})}$. Вычислялось отношение $R_1^{\text{набл.}} = A_1^{(2 \text{ набл.})} / A_1^{(1 \text{ набл.})}$. Далее данные для двух периодов объединялись. Проводилось случайное

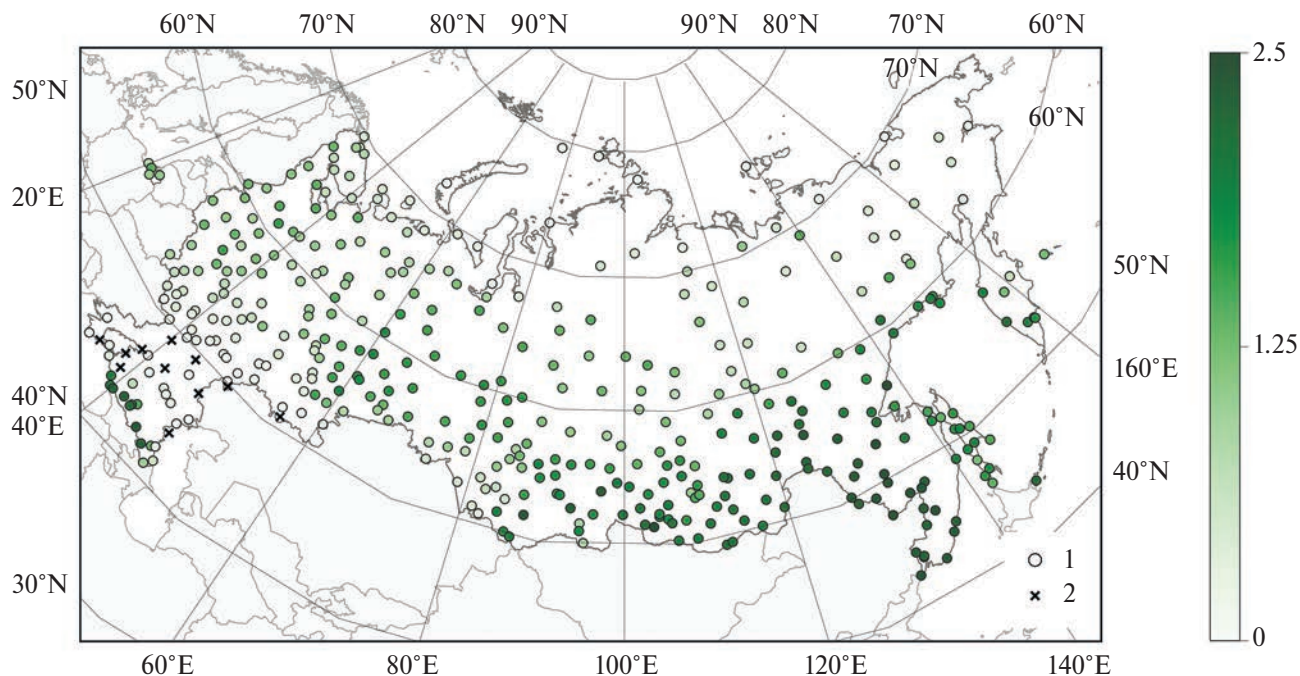


Рис. 2. Пространственное распределение значений амплитуд первой гармоники ряда среднегоголетних суточных сумм осадков за период 1961–2020 гг. Условные обозначения: 1 – станции со статистически значимой амплитудой, 2 – станции со статистически незначимой амплитудой.

перемешивание годовых рядов обоих периодов без нарушения последовательности суточных значений. Перемешанные таким образом последовательные множества рядов делились на две равные части, содержащие случайно объединённые ряды годовых данных из обоих периодов. Для каждого подмножества вычислялись средние значения суточных сумм осадков, проводилось быстрое преобразование Фурье и вычислялись амплитуды первой гармоники $A_1^{(1 \text{ перм.})}$ и $A_1^{(2 \text{ перм.})}$ и отношения $R_1^{\text{перм.}} = A_1^{(2 \text{ перм.})} / A_1^{(1 \text{ перм.})}$. Этот процесс проводился для каждой станции 10^4 раз.

В результате для каждой станции было получено множество случайных значений $\{R_1^{\text{перм.}}\}$ мощностью 10^4 элементов. Достоверность наблюдаемых изменений производилась процентильным методом: если наблюдаемое значение $R_1^{\text{набл.}}$ было меньше 5%-го перцентиля пермутационного распределения, делался вывод о достоверном уменьшении амплитуды второго периода. Если же больше 95%-го перцентиля, делался вывод о достоверном увеличении. В остальных случаях делался вывод об отсутствии значимого изменения амплитуды.

На основе полученных результатов были построены карты, отображающие значения

исследуемых величин на станциях метеонаблюдения на территории России.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Было определено, что для первой гармоники 11 станций имели статистически незначимые (неотличимые от шумовых) значения амплитуд. Все эти станции расположены в южных регионах России.

На рис. 1 представлены график годового хода среднегоголетних суточных сумм осадков за период 1961–2020 гг. и график восстановленного хода первой гармоники на шести станциях из разных регионов России. Можно видеть, что первая гармоники удовлетворительно определяет ход исследуемых временных рядов, за исключением станции WMO 34866 (Яшкуль, Республика Калмыкия, рис. 1 в), что характерно для южных регионов Европейской части России (ЕЧР), где большое значение имеют гармоники второго порядка.

На рис. 2 представлена карта пространственного распределения на территории Российской Федерации значений амплитуд первой гармоники за период 1961–2020 гг.

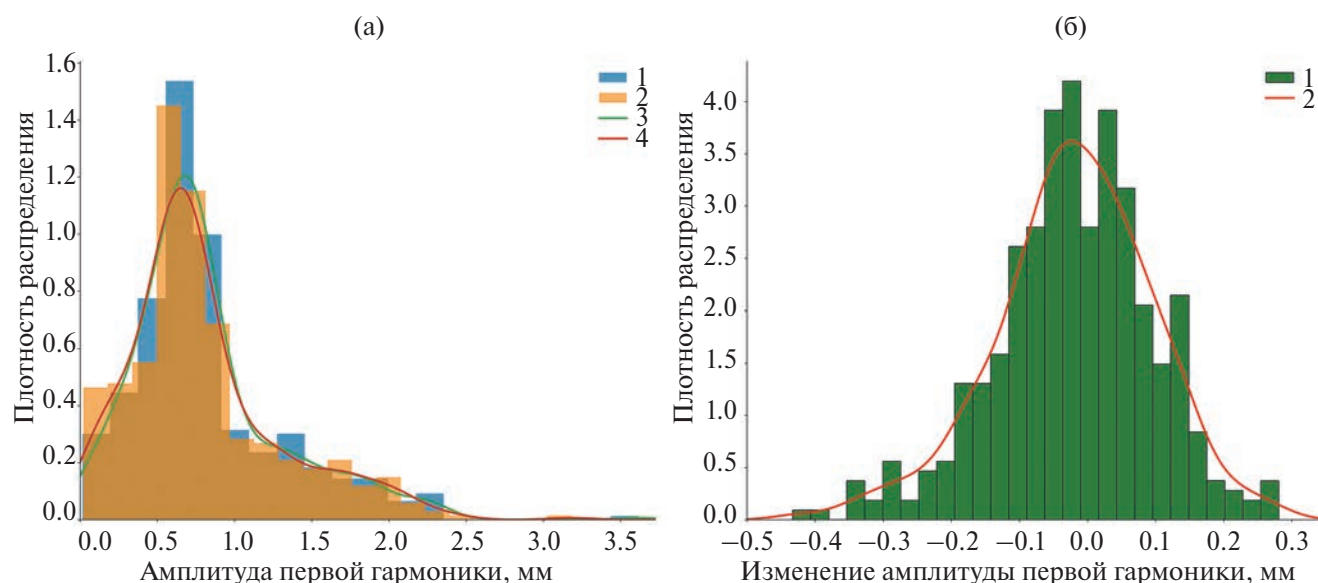


Рис. 3. (а) – гистограммы (1, 2) и ядерные оценки (3, 4) распределений значений амплитуд первой гармоники рядов среднееголетних суточных сумм осадков для периодов 1961–1990 гг. (1, 3) и 1991–2020 гг. (2, 4). (б) – гистограмма (1) и ядерная оценка (2) распределения изменений значений амплитуд первой гармоники среднееголетних суточных сумм осадков за период 1991–2020 гг. по сравнению с периодом 1961–1990 гг.

Как видно на рис. 2, максимальные значения амплитуд наблюдаются в Хабаровском и Приморском краях и в горных областях Северного Кавказа, Алтая, Восточных Саян, горных систем Забайкалья, в горах Джугджур на побережье Охотского моря, а также в юго-западной части Камчатки. Области достаточно небольшой амплитуды на территории ЕЧР и Западной Сибири разделяются областью несколько повышенной амплитуды вдоль Уральских гор. Коэффициент корреляции величин амплитуд на станциях метеонаблюдения и их высоты над уровнем моря равен 0.42. Также достаточно большая корреляция наблюдается между амплитудой первой гармоники и средней за период 1961–2020 гг. суточной суммой осадков: коэффициент линейной корреляции равен 0.4. Очевидно, что для большой амплитуды годовых колебаний суточных сумм осадков требуется и их большое среднеегодовое количество. При этом, как известно, наветренные склоны горных систем характеризуются повышенными объёмами выпадающих осадков [19].

Большая амплитуда на Дальнем Востоке может быть объяснена действием муссона умеренных широт: зимой эти области находятся под действием Азиатского антициклона, определяющего малое количество осадков, летом же восточноазиатские циклоны приносят большое количество осадков, в несколько раз превышающее зимнее количество.

Область наименьшей амплитуды годового хода осадков наблюдается в южных степных и полупустынных регионах ЕЧР (рис. 2). Эти области характеризуются достаточно засушливым климатом, что и определяет малую величину годового разброса значений осадков. В этом же регионе расположены все 11 станций, демонстрирующих отсутствие статистически достоверного значения амплитуды первой гармоники. В целом в этом регионе отмечен особый характер годового хода осадков, отличный от остальной территории РФ. В частности, практически на всех станциях значение амплитуды второй гармоники превышало амплитуду первой гармоники, что проявляется в двух выраженных максимумах: весеннем и осеннем. При этом на северном Кавказе годового ход осадков такой же, как и на другой территории России: с одним выраженным максимумом. Эти особенности делают данный регион заслуживающим отдельного исследования.

На рис. 3 а представлены гистограммы и ядерные оценки (гауссовым ядром) [6] распределений амплитуд первой гармоники преобразования Фурье для двух анализируемых периодов, а на рисунке 3 б – гистограммы и ядерные оценки их изменений. Как видно, в целом преобладает тенденция к снижению значений амплитуд. Действительно, среднее значение амплитуд первой гармоники в период 1961–1990 гг. равно 0.818 мм, в период 1991–2020 гг. – 0.799 мм. Среднее значение изменений составило –0.02 мм (стандартное

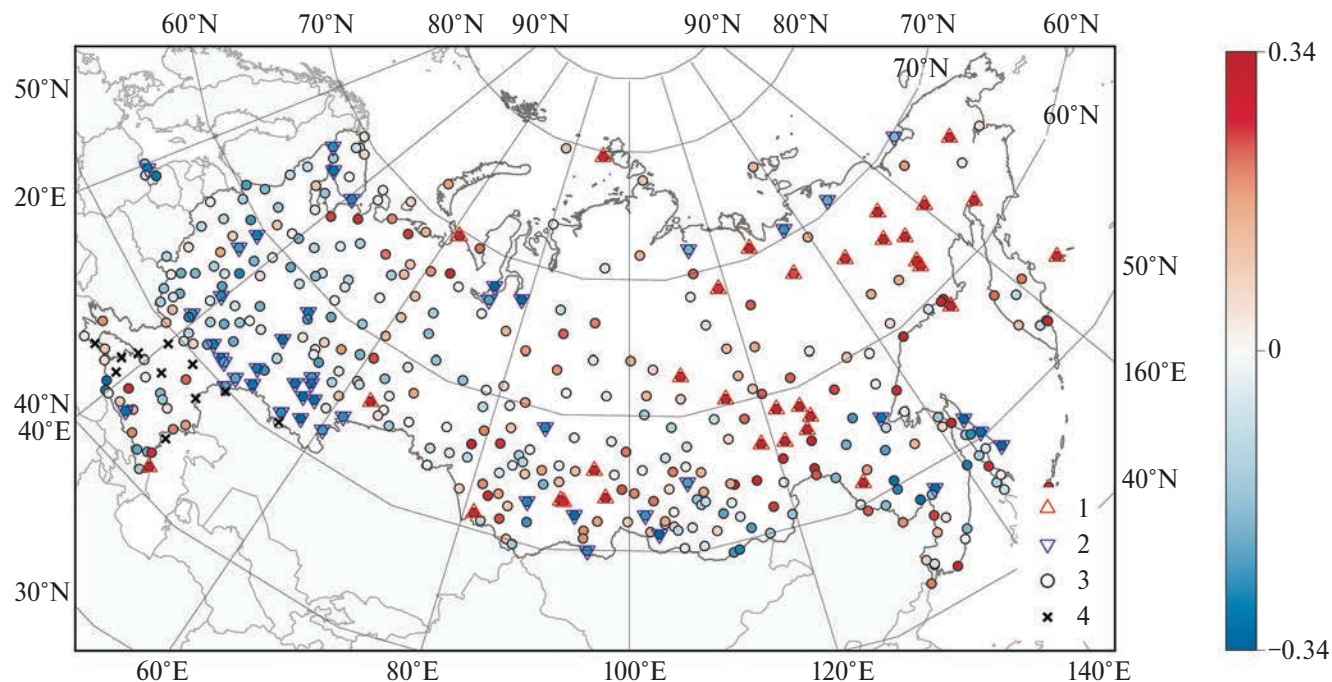


Рис. 4. Пространственное распределение значений разностей амплитуд первой гармоники рядов среднегоголетних суточных сумм осадков за периоды 1991–2020 и 1961–1990 гг. Условные обозначения: 1 – станции со статистически значимым увеличением амплитуды, 2 – станции со статистически значимым уменьшением амплитуды, 3 – станции со статистически значимой амплитудой первой гармоники за период 1961–2020 гг., 4 – станции со статистически незначимой амплитудой первой гармоники за период 1961–2020 гг.

отклонение 0.117 мм). С помощью бутстрепа при доверительном уровне 95% было показано, что доверительный интервал среднего значения изменений составляет $-0.0321...-0.0094$, что позволяет утверждать достоверность уменьшения значений амплитуд первой гармоники преобразования Фурье исследуемых рядов данных в среднем по территории России. Достоверное увеличение амплитуды отмечено на 32 станциях, достоверное уменьшение на 46. В целом это согласуется с глобальным трендом изменения годовой амплитуды осадков [20].

На рис. 4 представлена карта пространственного распределения разностей амплитуд первых гармоник рядов осредненных суточных сумм осадков второго и первого исследуемого периода. На ней видно, что станции с одинаковой тенденцией и величиной изменений амплитуд распределены неслучайно и образуют достаточно протяженные пространственные кластеры. Эта же особенность характерна также для распределения станций с достоверным изменением этой величины. Видно, что в западной части Российской Федерации на территории ЕЧР и в Западной Сибири преобладает тенденция к уменьшению амплитуды первой гармоники рядов

суточных сумм осадков (за исключением района Уральских гор, о. Новая Земля, ряда южных и северных приморских регионов), а в её восточной части – в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке (за исключением ряда южных и северных приморских областей и большей части о. Сахалин) – к её увеличению. В Южной Сибири наблюдается значительная мозаичность расположения областей с разным характером изменений этого показателя. Выявленные закономерности нуждаются в дальнейшем исследовании и установлении причин, вызывающих эти явления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований показано статистически достоверное уменьшение в среднем по России значений амплитуды первой гармоники рядов суточных сумм осадков за период 1991–2020 гг. по сравнению с периодом 1961–1990 гг. Изучено пространственное распределение величин амплитуд осредненных годовых рядов суточных сумм осадков на территории России и их изменений за указанные периоды. Выявлена положительная корреляция амплитуд первой гармоники со средней за исследуемый

период суточной суммой осадков и высотой над уровнем моря. Показано наличие больших областей с однородным характером изменений, различающихся в зависимости от своего географического положения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят М.Ю. Бардина за прочтение рукописи и ряд полезных замечаний и правок. Также авторы благодарят академика РАН Владимира Михайловича Котлякова за положительный отзыв о настоящей работе и рекомендацию её к печати. Мы также благодарны рецензентам за прочтение рукописи статьи и высказанные замечания, несомненно улучшившие ее качество.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Первичная обработка и статистический анализ данных выполнены по теме 3.2. “Мониторинг глобального климата и климата Российской Федерации и её регионов, включая Арктику. Развитие и модернизация технологий мониторинга” плана НИТР Росгидромета на 2020–24 гг., утверждённого приказом № 745 от 31.12.2019. Анализ пространственного распределения полученных результатов проведён в рамках Государственного задания Института географии РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Strangeways I.* Precipitation. Theory, Measurement and Distribution. Cambridge University Press. 2007. DOI: 10.1017/CBO9780511535772.
2. *Хромов С. П., Петросянц М. А.* Метеорология и климатология. М.: Издательство Московского Университета, 2012. 582 с.
3. *Markham C. G.* Seasonality of Precipitation in the United States // *Annals of the Association of American Geographers*. 1970. Т. 60. V. 3. P. 593–597.
4. *Imteaz M. A., Hossain I.* Climate Change Impacts on ‘Seasonality Index’ and its Potential Implications on Rainwater Savings // *Water Resource Manage.* 2023. V. 37. P. 2593–2606. DOI: 10.1007/s11269-022-03320-z.
5. *Лайонс Р.* Цифровая обработка сигналов. М.: “Бином”, 2006. 656 с.
6. *Nasser R. A., Hedayat F.* Rainfall Forecasting Using Fourier Series // *Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2012. V. 6. № 9. P. 1258–1262. DOI: 10.17265/1934-7359/2012.09.019.
7. *Villarreal F. J. G., Mendoza V. I. M.* Fast Fourier transform analysis of precipitation data for the Colorado river basin // *Proceedings of the 37th IAHR World Congress (Kuala Lumpur, Malaysia, August 13–18, 2017)*. P. 5639–5645.
8. *Ussalu J. L. M., Bassrei A.* Climate dynamics of southern region of Mozambique: statistics and Fourier analysis // *Revista Brasileira de Climatologia*. 2021. V. 29. P. 134–156. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rbclima.v29i0.75088>
9. *Morales J. E., Poveda G.* Diurnally driven scaling properties of Amazonian rainfall fields: Fourier spectra and order-q statistical moments // *Journal of Geophysical Research*. 2009. V. 114. P. 1–10. D11104, DOI: 10.1029/2008JD011281
10. *Marshall G. J.* On the annual and semi-annual cycles of precipitation across Antarctica // *International Journal of Climatology*. 2009. V. 29. № 15. P. 2298–2308. DOI: 10.1002/joc.1810.
11. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова; Росгидромет. СПб.: “Наукоемкие технологии”, 2022. 676 с.
12. *Popova E. N., Popov I. O., Semenov S. M.* Assessment of Variations in the Annual Sum of Active Temperatures and Total Precipitation during the Vegetation Period in Russia and Neighboring Countries // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2018. V. 43. № 6. P. 412–417.
13. *Золина О. Г., Булыгина О. Н.* Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2016. Т. 1. С. 84–103. DOI: 10.21513/2410-8758-2016-1-84-103
14. *Aleshina M. A., Semenov V. A., Chernokulsky A. V.* A link between surface air temperature and extreme precipitation over Russia from station and reanalysis data // *Environmental Research Letters*. 2021. V. 16. № 10. 105004. DOI: 10.1088/1748-9326/ac1cba.
15. *Понов И. О., Понова Е. Н.* Анализ изменения режима осадков на территории Российской Федерации во второй половине 20–начале 21 века с применением байесовской оценки параметров марковской цепи // *Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле*. 2022. Т. 502. № 1. С. 38–44. DOI: 10.31857/S2686739722010054.
16. *Zolina O., Simmer C., Gulev S. K., Kollet S.* Changing structure of European precipitation: Longer wet periods leading to more abundant rainfalls // *Geophysical Research Letters*. 2010. V. 37. L06704. DOI: 10.1029/2010GL042468.
17. *Pruscha H.* Statistical Analysis of Climate Series. Berlin; Heidelberg: Springer, 2013. 176 p. DOI: 10.1007/978-3-642-32084-2.
18. *Brockwell P. J., Davis R. A.* Time Series: Theory and Methods. New York, N.Y.: Springer, 1991. 580 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-0320-4.

19. *Roe G. H.* Orographic Precipitation // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2005. V. 33. P. 645–671. DOI: 10.1146/annurev.earth.33.092203.122541.
20. *Wang B., Li X., Huang Y., Zhai G.* Decadal trends of the annual amplitude of global precipitation // Atmospheric Science Letters. 2016. V. 17. P. 96–101. DOI: 10.1002/asl2.631.

STUDY OF OBSERVED CHANGES IN THE FIRST HARMONIC AMPLITUDE OF THE DAILY PRECIPITATION AMOUNT SERIES IN THE TERRITORY OF RUSSIA

I. O. Popov^{a,b,#}, E. N. Popova^{b,##}

Presented by Academician of the RAS V.M. Kotlyakov December 20, 2023.

^a*Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russian Federation*

^b*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: igor_o_popov@mail.ru*

^{##}*E-mail: en_popova@mail.ru*

Using the data from weather observation stations, an assessment of the statistical significance of the first harmonic amplitude of the average long-term daily precipitation amount series in Russia in 1961–2020 and their changes in 1991–2020 compared to 1961–1990 is made. It is shown that at most stations the first harmonic has a reliable value different from the noise, except for eleven stations in the southern regions of the European Part of Russia. It is revealed that, on average, there is a significant decrease in the first harmonic amplitudes of the daily precipitation series across Russia. An analysis of the spatial distribution of the studied quantities is performed and the presence of large areas with their homogeneous character is demonstrated.

Keywords: climate change, precipitation, Fourier transform, permutation test