Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 270–273.

УДК 551.590.21
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-270
ORCID 0000-0002-5842-1428

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕЛОМНЫХ МОМЕНТОВ ДЛЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

К.Е. Кириченко, А.А. Караханян, С.И. Молодых

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

DETERMINING TRANSITION POINTS FOR NEAR-SURFACE TEMPERATURE TIME SERIES

K.E. Kirichenko, A.A. Karakhanyan, S.I. Molodykh

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

Аннотация. Метод обнаружения скачкообразного изменения (разладки) свойств наблюдаемого временного ряда применен к временным рядам приповерхностной температуры: земной шар, Северное и Южное полушария. Определены моменты перехода по направлению роста в ходе кумулятивных сумм, рассчитанных для анализируемых временных рядов. Обнаруженные моменты перехода в ходе кумулятивной суммы, рассчитанной для глобальной температуры, являются общими для всех временных рядов. Показана необходимость учета распределения суши и океана при определении моментов изменений в динамике приповерхностной температуры.

Ключевые слова: кумулятивная сумма, временной ряд, приповерхностная температура, скорость роста температуры, глобальное потепление.

Abstract. A method for detecting sharp changes in properties of an observed time series is applied to near-surface temperature time series for the globe and the Northern and Southern Hemispheres. Transition points in the direction of growth in the course of cumulative sums calculated for the analyzed time series are determined. The found transition points in the cumulative sum calculated for global temperature are common to all time series. The necessity of taking into account the distribution of land and ocean for determining the moments of changes in the dynamics of near-surface temperature is shown.

Keywords: cumulative sum, time series, near-surface temperature, rate of temperature increase, global warming.

ВВЕДЕНИЕ

Основными компонентами климатической системы Земли, определяющими ее теплосодержание, являются Мировой океан, атмосфера, суша и криосфера. Увеличение интенсивности и скорости изменений характеристик данных компонентов, в первую очередь, приповерхностной температуры является сегодня неоспоримым фактом. Наблюдаемые климатические изменения обусловлены как внутренней изменчивостью системы, так и внешними причинами естественного (солнечная и вулканическая активность) и антропогенного происхождения. Среди регуляторов внутренних процессов климатической системы отметим важнейшую роль Мирового океана в формировании глобального климата вследствие большой инерционности океана по отношению к атмосфере [Гулев, 2023].

Методы математической статистики широко используются при обработке данных наблюдений в метеорологии и солнечно-земной физике. Временные ряды обычно анализируются в предположении, что статистические свойства наблюдаемого ряда сохраняются постоянными во времени или медленно изменяются. Наряду с этим, эффективным решением многих практических задач является последовательное обнаружение скачкообразного изменения (разладки) свойств наблюдаемого временного ряда, происходящего в неизвестный момент времени. Алгоритм кумулятивных сумм получил наибольшее распространение среди различных подходов и методов обнаружения разладки временных рядов [Никифоров, 1983; Филаретов, Репин, 2020].

Поскольку метеорологические величины, в том числе и приповерхностная температура, имеют нормальное распределение вероятностей, вычислим кумулятивную сумму в гауссовском случае, используя метод многократной проверки гипотез H_1 (нет разладки): $\theta = \theta_1$ и H_2 (есть разладка): $\theta = \theta_2$ согласно критерию Неймана—Пирсона для вспомогательной выборки x_t^{t+n-1} объемом n из всей последовательности. Для выборки кумулятивная сумма имеет вид [Никифоров, 1983]

$$S_n^t = \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{\sigma^2} \left[\sum_{i=t}^{t+n-1} x_i - n\frac{\theta_2 - \theta_1}{2}\right]$$

Сигнал о положительной разладке подается, если $x_n > \sigma(\theta_2 > \theta_1)$, где $x_n = \frac{1}{n}\sum_{i=t}^{t+n-1} x_i$ σ^2 — дисперсия оценки x_n.

ДАННЫЕ

Анализируемые временные ряды получены по данным среднемесячной приповерхностной температуры в аномалиях от нормы (1961–1990) с 1850 по 2021 г. в сетке 5°×5° [Brohan et al., 2006; https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.crutem4.html].

Вычисленные среднегодовые значения усреднены по пространству методом взвешенного усреднения. Данный математический подход позволяет учесть вклад площади (вес) в каждое значение элемента. Весовая функция пропорциональна произведению доли площади в ячейке на косинус широты в замкнутой области. Временные ряды пространственно-осредненных среднегодовых аномалий приповерхностной температуры (земной шар, Северное и Южное полушария) сглажены 10-летними средними для уменьшения межгодовой изменчивости температуры (рис. 1).

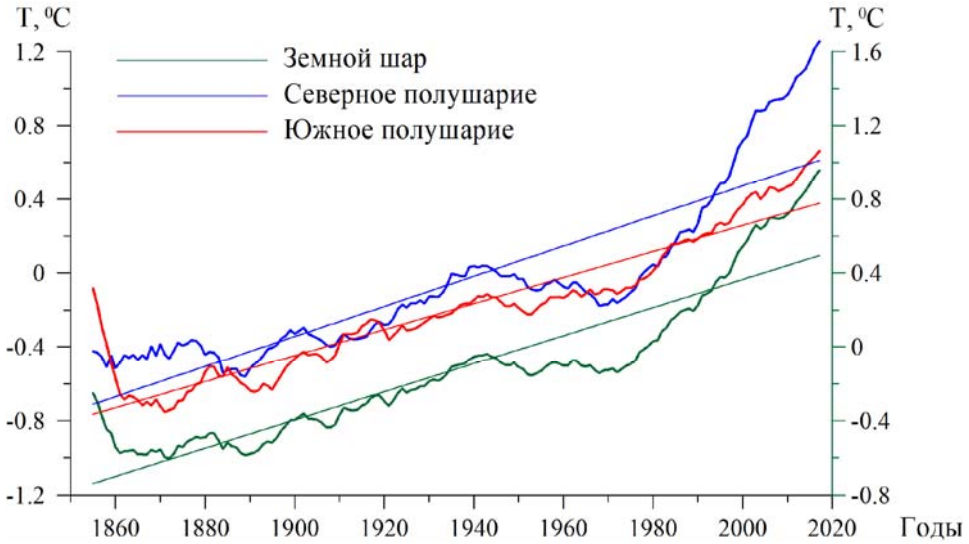

Рис.1. Скользящие 10-летние средние температуры, пространственно-осредненные по земному шару, Северному и Южному полушариям.

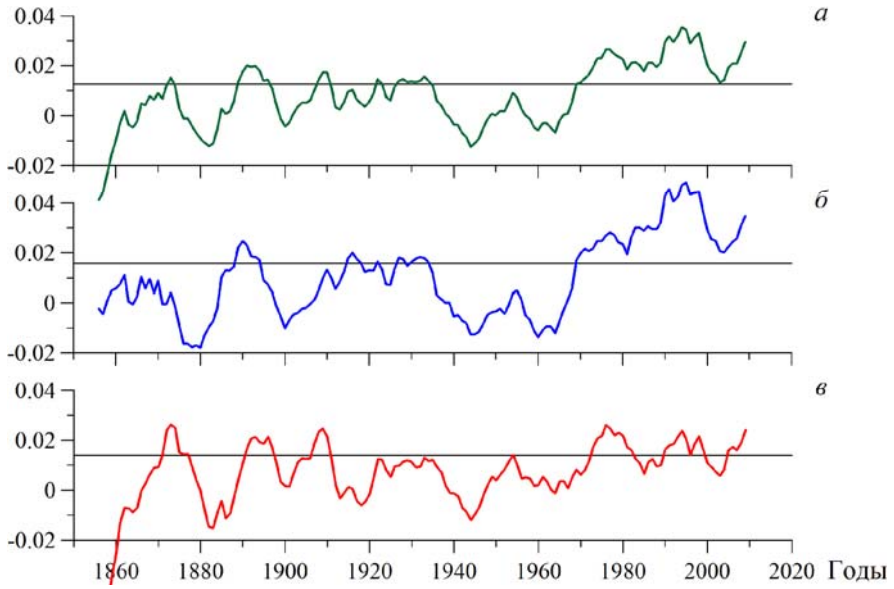

Рис. 2. Кумулятивные суммы (S_t), рассчитанные по 9-летней выборке для временных рядов приповерхностной температуры: земной шар (*а*), Северное (*б*) и Южное (*в*) полушария.

В качестве скалярного параметра θ выбрана скорость роста приповерхностной температуры, которая за временной период (1850–2021 гг.) составляет в год 0.0076, 0.0082, и 0.0071 соответственно для земного шара, Северного и Южного полушарий. Следовательно, принимаем $\theta_1 = 0, \theta_2 = 0.0076$/год для земного шара и $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 0.0082$/год, $\theta_2 = 0.0071$/год для полушарий. Кумулятивная сумма рассчитана для пяти вариантов с объемом выборки от 8 до 12 лет. Пример графического представления кумулятивной суммы и ее дисперсии, полученной для каждого временного ряда приповерхностной температуры с объемом выборки 9 лет, показан на рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Применение критерия о разладке к временным рядам позволило определить моменты перехода приповерхностной температуры из одного состояния в другое для земного шара, Северного и Южного полушарий (табл. 1). Обнаруженные моменты перехода в ходе кумулятивной суммы, рассчитанной для глобальной температуры, являются общими для анализируемых временных рядов с некоторыми отличиями в каждой выборке. Для первой половины XX в. выделяются три момента изменений скорости роста: начало 1870-х, 1888–1890 и начало 1900-х гг. Вторая половина прошлого века характеризуется резким ростом кумулятивной суммы с 1969 г. Моментом перехода по направлению роста в ходе кумулятивной суммы в текущем столетии является 2005 г.

Отметим, что момент перехода скорости роста, характерный для начала периода, который принято считать современным глобальным потеплением, произошел раньше в Северном полушарии, возможно, из-за распределения суши и океана на

полушарии. Кроме того, период современного глобального потепления характеризуется несколькими моментами изменений в ходе кумулятивной суммы, рассчитанной для временного ряда приповерхностной температуры Южного полушария: начало 1970-х, 1987–1991, 2004–2008 гг.

Таблица 1. Моменты перехода (год) в ходе кумулятивных сумм, рассчитанных для временных рядов приповерхностной температуры

Объем выборки				
8 лет	9 лет	10 лет	11 лет	12 лет
Земной шар				
	1873	1872		
1890	1889	1889	1889	1888
1908	1908	1908	1907	1907
1971	1969	1969	1969	1969
2005				
Северное полушарие				
1889	1889	1888	1887	1887
1916	1915	1914	1914	1915
1970	**1969**	**1969**	**1969**	**1969**
Южное полушарие				
1871	1871	1871	1870	1869
1891	1891	1891	1890	1889
1907	1907	1906	1905	1904
1973	**1973**	**1972**	**1972**	**1971**
1991	1990	1989	1988	1987
2008	2005	2005	2004	

Для изучения влияния подстилающей поверхности на изменение вариаций приповерхностной температуры проведен аналогичный анализ над разными средами: сушей и океаном. Анализируемые временные ряды получены по данным среднемесячной приповерхностной температуры в аномалиях от нормы (1951–1980 гг.) за период с 1880 по 2025 г. в сетке 2º×2º [Lenssen et al., 2024; https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.gistemp.html]. На основе наблюдательных данных показано, что суша теплеет вдвое быстрее океана в Северном полушарии в период современного глобального потепления (рис. 3). Отмеченные различия в поведении температур над сушей и океаном могут быть обусловлены различием их теплоемкостей и изменениями энергообмена в системе атмосфера—океан—суша. Кумулятивные суммы рассчитывались с использованием следующих параметров: для Северного полушария $\theta_1 = 0, \theta_2 = 0.011$/год для суши и $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 0.006$/год для океана; для Южного полушария $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 0.0072$/год и. $\theta_1 = 0, \theta_2 = 0.0065$/год.

Полученные моменты перехода по направлению роста в ходе кумулятивных сумм, рассчитанных для временных рядов температуры над сушей и океаном с объемом выборки 9 лет приведены в табл. 2. Обнаружено, что момент начала как первой, так и второй волн потепления над сушей произошел раньше в Южном полушарии. Начало повышения приповерхностной температуры над океаном наблюдалось примерно в одно время в обоих полушариях в течение первой волны потепления, установленной за инструментальный период наблюдений. Момент начала роста температуры над океаном произошел значительно раньше в Южном полушарии для второй волны потепления или периода современного глобального потепления. Полученные моменты изменения в ходе кумулятивных сумм, рассчитанных для анализируемых временных рядов приповерхностной температуры, согласуются с результатами работы [Ранькова, 2025] и дополнительно подтверждают периоды климатических эпох в климатической системе, отмеченные в работе [Кириченко, 2014].

Таблица 2. Моменты перехода (год) в ходе кумулятивных сумм, рассчитанных для временных рядов температуры над разными подстилающими поверхностями

	Северное полушарие	Южное полушарие
Суша	**1913**, 1925, **1967**, 1980	**1907**, 1928, **1963**, 1966, 1971, 1989
Океан	**1908**, 1912, 1927, **1972**, 1995, 2002	**1906**, 1927, **1962**, 2003

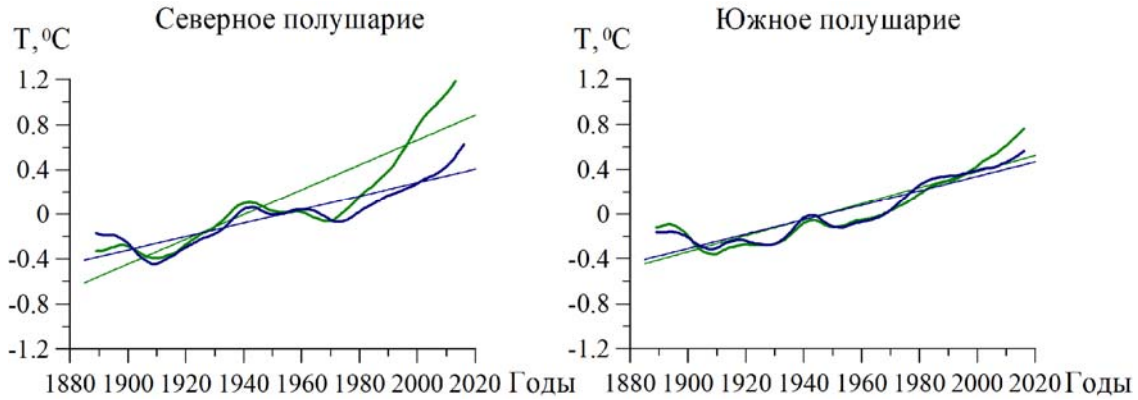

Рис. 3. Скользящие 10-летние средние температуры, пространственно-осредненные над сушей (темно-зеленая линия) и океаном (темно-синяя линия).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение метода обнаружения резкого изменения свойств наблюдаемого временного ряда по правилу Неймана—Пирсона к временным рядам приповерхностной температуры позволило определить моменты резкого перехода скорости изменения температуры в сторону ее возрастания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гулев С.К. Глобальные изменения климата и Мировой океан // Проблемы прогнозирования. 2023. № 6. С. 25–36.

Никифоров И.В. Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов. М.: Наука, 1983. 200 с.

Кириченко К.Е., Коваленко В.А., Молодых С.И. Проявление солнечной активности в температуре поверхности Мирового океана // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 2. С. 154–157.

Ранькова Э.Я., Самохина О.Ф., Антипина У.И., Смирнов В.Д. Особенности температурного режима у поверхности Земного шара в 2024 году. Современное состояние глобального потепления // Фундаментальная и прикладная климатология. 2025. Т. 11, № 2. С. 237–279.

Филаретов Г.Ф., Репин Д.С. Методические аспекты исследования алгоритмов обнаружения разладки временных рядов // ИТНОУ. 2020. № 1. С. 27–32.

Brohan P., Kennedy J.J., Harris I. and et. al. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850 // J. Geophys. Res.: Atmos. 2006. V. 111, iss. D12. D12106.

Lenssen N., Schmidt G.A., Hendrickson M. and et. al. A GISTEMPv4 observational uncertainty ensemble // J. Geophys. Res. Atmos. V. 129, iss. 17. e2023JD040179.

URL: https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.crutem4.html (дата обращения 26.05.2026).

URL: https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.gistemp.html (дата обращения 26.05.2026).