

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

Экстремальные погодные явления, обусловленные потеплением климата

А.А. Рузмайкин

Влияние потепления климата на увеличение частоты экстремальных погодных явлений исследуется с помощью простой статистической модели и с использованием самого продолжительного непрерывного ряда температурных наблюдений в Центральной Англии за 1659–2021 гг. Установлено, что сдвиг средней месячной температуры, обусловленный потеплением климата, оказывает значительное влияние на вероятность возникновения экстремальных температур. Так, вероятность возникновения аномально высоких температур в настоящее время по сравнению с XVII веком возросла примерно в пять раз, что подтверждается данными этого ряда наблюдений. Средняя температура в XX веке в каждом месяце оказалась выше или равной максимальной температуре периода 1659–1719 гг. В период с 1961 по 2021 год вероятность достижения определённых температурных значений в 5,2 раза выше, чем вероятность наблюдения температуры, большей или равной максимальной температуре 1659–1719 гг.

Ключевые слова: глобальное потепление, экстремальные погодные явления, длиннейший ряд температурных наблюдений

PACS numbers: 92.60.Ry, 92.60. Wc, 92.70.Mn

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2026.07.040168>

Содержание

1. Введение. О взаимосвязи погоды и климата (1003).
 2. Влияние небольшого изменения климата на вероятность экстремальных погодных явлений (1003).
 3. Применение предложенной модели к данным о температуре в Центральной Англии (1005).
 4. Заключение (1007).
- Список литературы (1007).

1. Введение.

О взаимосвязи погоды и климата

Всемирная метеорологическая организация (ВМО), согласно своим официальным документам, определяет климат как усреднённые погодные условия для конкретного региона за длительный период времени, от месяцев до тысячелетий. ВМО использует 30-летний период для определения климатической нормы и соответствующей статистической величины, называемой "средним значением". Примечательно, что это хорошо согласуется с простым определением, приписываемым писателю

Марку Твену: "Климат — это то, чего вы ожидаете, а погода — это то, что вы получаете", поскольку "математическое ожидание" — это синоним "среднего значения" в статистике. Это статистическое упрощение, сводящее определение климата за рассматриваемый период к одному числу (среднему значению), существенно ограничивает его практическое применение. Более общее определение климата как "статистики погоды" (см. [1–3]) открывает широкий спектр возможностей применения этого расширенного понятия. В частности, оно позволяет оценить характер экстремальной реакции на внешнее воздействие на климат [12]. В настоящей работе, не углубляясь в рассмотрение более детальных определений климата, в частности, подробно обсуждаемых Верндлем [3], мы применяем простое определение климата как вероятностного распределения погоды, описываемого через распределение температуры.

2. Влияние небольшого изменения климата на вероятность экстремальных погодных явлений

В настоящее время установлено, что, начиная с доиндустриальных времён, выбросы парниковых газов, вызванные деятельностью человека, привели к увеличению частоты и/или интенсивности некоторых экстремальных погодных явлений, в частности, экстремальных температурных аномалий. Региональные изменения интенсивности и частоты экстремальных климатических явлений, как правило, связывают с глобальным потеплением. Новые данные подтверждают выводы, сформулированные в специальном докладе МГЭИК о

А. Рузмайкин

Department of Physics and Astronomy,
California State University Northridge,
18111 Nordhoff St, Northridge, CA 91330
E-mail: aruzmaik@gmail.com

Статья поступила 13 февраля 2026 г.,
после доработки 19 мая 2026 г.

последствиях глобального потепления на $1,5^{\circ}\text{C}$ (SR1.5) [4], о том, что даже относительно небольшое глобальное потепление ($+0,5^{\circ}\text{C}$) с *высокой степенью достоверности* приводит к статистически значимым изменениям экстремальных явлений в глобальном масштабе и для крупных регионов Земли. В частности, это относится к экстремальным температурам (*очень вероятно*), усилению сильных осадков (*высокая степень достоверности*), в том числе связанных с тропическими циклонами (*средняя степень достоверности*), и усилению засух в некоторых регионах [4]. Существует также ряд научных работ, посвящённых установлению связи между изменением климата и характеристиками экстремальных явлений.

Эти исследования показали, что антропогенное изменение климата сопровождается нестационарностью статистического распределения климатических переменных. Нестационарность может быть обусловлена сдвигом среднего значения или изменением формы распределения вероятности температуры во времени [5, 6]. В случае сдвига среднего значения, Баллерини и Резник [5] установили, что для временных рядов с линейным трендом частота регистрации экстремумов становится постоянной в асимптотическом пределе. Для гауссовых распределений вероятность установления нового рекорда по сравнению с предыдущим должна уменьшаться со временем. Круг [6] предложил статистику экстремальных рекордов для временных рядов с монотонным уширением распределения вероятности. Он показал, что когда ширина распределения растёт по степенному закону во времени n , среднее число событий, устанавливающих рекорды, асимптотически имеет порядок $\ln n$ для распределений со степенным хвостом, таких как распределение Фреше в статистике экстремальных значений, порядок $(\ln n)^2$ для распределений экспоненциального типа (класс Гумбеля) и порядок $n^{1/(v+1)}$ для распределений с ограниченной областью определения (статистика класса Вейбулла), где показатель степени v описывает поведение распределения на верхней (или нижней) границе области определения.

Хансен и др. [7] расширили анализ изменения глобальной температуры поверхности, проведённый Институтом космических исследований имени Годдарда (GISS), и рассмотрели вопросы общественного восприятия и реальности глобального потепления. Вопреки распространённому заблуждению, темпы потепления не снизились. Глобальная температура в последнее десятилетие растёт так же быстро, как и в предыдущие два десятилетия, несмотря на ежегодные колебания температуры поверхностного слоя тропических океанических вод, связанные с циклом Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Рекордно высокая глобальная скользящая средняя температура за 12 месяцев за весь период инструментальных наблюдений была достигнута в 2010 г.

Рамсторф и Куму [8] разработали теоретический подход для количественной оценки влияния долгосрочных трендов на ожидаемое количество экстремальных значений в произвольных временных рядах, используя аналитические решения и моделирование методом Монте-Карло для изучения влияния трендов потепления на температурные рекорды. Они установили, что количество рекордных событий увеличивается приблизительно пропорционально отношению тренда потепления к краткосрочному стандартному отклонению. Краткосрочная

изменчивость уменьшает число температурных рекордов, тогда как климатическое потепление увеличивает его. Для экстремальных значений, превышающих заданный порог, зависимость от тренда потепления является сильно нелинейной. Авторы также установили, что климатическое потепление увеличило количество новых рекордов глобальной средней температуры, ожидаемых в последнее десятилетие, с 0,1 до 2,8.

Покажем взаимосвязь между изменением среднего значения распределения температуры и экстремальными событиями при помощи простой математической модели и проиллюстрируем её статистическим анализом экстремальных значений для выбранного региона с длительным рядом температурных наблюдений. Охарактеризуем погодные явления в месячном масштабе времени по их температуре и определим климат как функцию распределения вероятностей погодных явлений в долгосрочном масштабе времени.

Температура Земли демонстрирует регулярные колебания, такие как суточные колебания температуры (например, дневная температура, как правило, выше ночной), сезонные колебания (в Северном полушарии летняя температура, как правило, выше зимней температуры) и некоторые более длительные колебания палеоклиматического характера. После вычитания этих колебаний из данных о температуре остаётся только "шум", т.е. отклонения фактической температуры от среднего циклического поведения, которые распределены случайным образом.

Если построить график распределения вероятностей этих данных, обычно получается функция распределения с максимальной вероятностью в среднем значении и убывающими вероятностями в правом и левом "хвостах" распределения. Здесь мы рассматриваем хорошо известное и наиболее простое гауссово (нормальное) распределение:

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Z^2}{2}\right), \quad (1)$$

где $Z = (x - \mu)/\sigma$, x — температура T , а μ и σ — среднее значение и стандартное отклонение (ср. [9, 10]).

Одной из важных особенностей гауссова распределения является его экспоненциальное убывание для значений Z , больших чем $Z^2 = 2$. Вследствие этого небольшой сдвиг среднего значения μ приводит к очень большим изменениям вероятностей при $Z > \sqrt{2}$. Соответствующие значения температуры T , определяемые условиями $T > \mu + 2\sigma$ и $T < \mu - 2\sigma$, реализуются с вероятностью 0,02275 и 0,02275, соответственно. Экстремумами можно считать значения высокой и низкой температуры за этими пределами, а положительный сдвиг среднего значения μ рассматривать как "потепление климата". При предположении о том, что функция распределения сохраняет свою форму, положительный сдвиг среднего значения приводит к увеличению вероятности возникновения высоких температур по сравнению с их значениями, рассчитанными с использованием исходного (несдвинутого) распределения. Таким образом, возникновение экстремальных погодных явлений можно ожидать с большей вероятностью. Вероятность экстремальных значений значительно возрастает даже при небольшом сдвиге среднего значения при условии сохранения прежнего порога экстремального значения.

Распределение вероятностей температуры зависит от региона Земли и не обязательно является нормальным. Однако существует множество распределений, характеризующихся своим средним значением и симметричными "хвостами", подобными нормальному распределению. В примере, описанном в следующем разделе, мы используем эмпирическую функцию распределения и сравниваем её с нормальным распределением.

3. Применение предложенной модели к данным о температуре в Центральной Англии

Для иллюстрации и анализа влияния сдвига среднеклиматической нормы на экстремальные погодные явления рассмотрим данные о температуре в Центральной Англии с января 1659 г. по сентябрь 2021 г., представленные в ряде наблюдений по этому региону Центра Хэдли Метеорологической службы Великобритании [11]. Эти данные представляют собой наидлиннейший непрерывный ряд инструментальных ежемесячных наблюдений за температурой. Q–Q график (график квантиль – квантиль) на рис. 1 показывает, насколько близко распределение температуры в Центральной Англии к гауссовому распределению.

Теперь проанализируем эмпирическое распределение температуры в летний период в Центральной Англии. На рисунке 2 показан временной ряд температуры за три летних месяца.

Как видно из рисунка, 95 % доверительный интервал для μ смещается вправо со временем, что позволяет исключить влияние случайных статистических флуктуаций в качестве альтернативного объяснения "глобального потепления", т.е. положительному сдвигу среднеклиматической нормы (среднего значения). Если 95 % доверительный интервал для μ за 1659–1719 гг. расположен левее 95 % доверительного интервала за 1961–2021 гг. и не перекрывается с ним, это означает, что с 95 % вероятностью средняя месячная температура в 1659–1719 гг. была статистически значимо ниже, чем в 1961–2021 гг., и что изменение температуры объясняется не случайными статистическими флуктуациями, а внешними факторами.

Напомним, что формула для 95 % доверительного интервала для истинного среднего значения имеет вид:

$$\langle \mu \rangle - \frac{1,96\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \langle \mu \rangle + \frac{1,96\sigma}{\sqrt{n}},$$

где $\langle \mu \rangle$ — выборочное среднее значение, σ — выборочное стандартное отклонение, n — размер выборки, а μ — истинное среднее значение генеральной совокупности. В нашем случае x соответствует температуре T , а μ и σ — среднее значение и стандартное отклонение (см. [9, 10]).

Теперь проверим, перекрываются ли 95 % доверительные интервалы на эмпирических данных.

Рассмотрим средние месячные температуры за январь в 1659–1719 гг. Из данных следует, что $\langle \mu \rangle = 2,6733$ и $\sigma = 2,1016$ (что является средним значением и стандартным отклонением набора данных); следовательно, 95 % доверительный интервал для среднего значения равен $2,1415 \leq \mu \leq 3,2051$.

Теперь повторим вычисление для средних месячных температур за январь в 1961–2021 гг. Из данных следует,

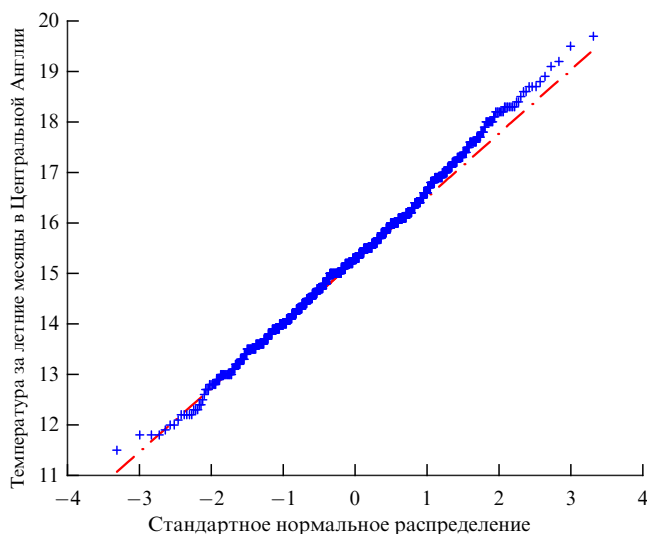


Рис. 1. Значения температуры в Центральной Англии за летние месяцы 1659–2021 гг., упорядоченные по возрастанию (синяя кривая), в зависимости от квантилей нормального распределения (красная прямая линия).

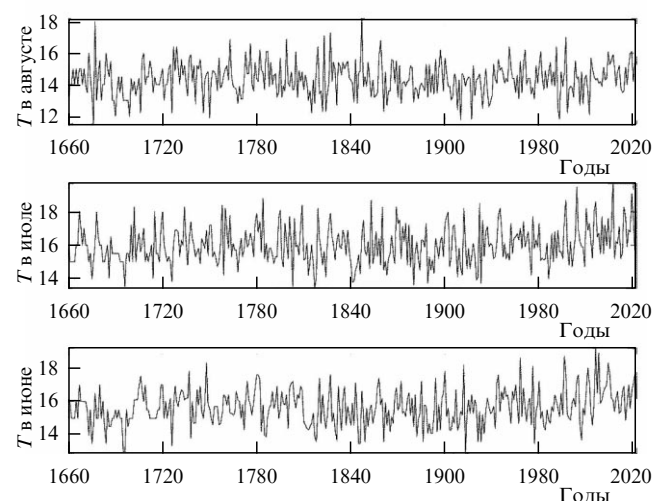


Рис. 2. Временной ряд температур в Центральной Англии за летние месяцы 1659–2021 гг.

что $\langle \mu \rangle = 4,155$ и $\sigma = 1,7651$ (что является средним значением и стандартным отклонением набора данных); следовательно, 95 % доверительный интервал для среднего значения равен $3,7087 \leq \mu \leq 4,6016$.

Вычисления показывают, что 95 % доверительные интервалы $[2,1415; 3,2051]$ и $[3,7087; 4,6016]$ не перекрываются, и поэтому мы можем с 95 % уверенностью утверждать, что повышение средней месячной температуры в январе с периода 1659–1719 гг. до периода 1961–2021 гг. обусловлено не случайными статистическими флуктуациями, а потеплением климата.

Разделим данные о температуре за июль (в градусах Цельсия) на последовательные 10-летние интервалы и проанализируем, как изменяется вероятность экстремальных значений при небольшом сдвиге среднего значения этой летней температуры. На рисунке 3 показаны распределения температуры в начальном (1659–1669 гг.) и конечном (2011–2021 гг.) временных интервалах. В на-

Таблица. Сравнение экстремальных значений среднемесячной температуры за периоды 1659–1719 гг. и 1961–2021 гг. В первом столбце указан месяц. Во втором столбце приведена максимальная среднемесячная температура (в °C) за период 1659–1719 гг.; в скобках указано количество повторений этого максимума. В третьем столбце указана вероятность того, что максимальная температура наблюдалась в период 1659–1719 гг. (например, в марте максимум 7 °C наблюдался дважды, поэтому вероятность составляет 2/60). В четвертом столбце перечислены все значения температуры за период 1961–2021 гг., которые превышают или равны максимальным температурам, указанным во втором столбце (например, для марта показаны все средние температуры за период 1961–2021 гг., значения которых превышают или равны 8,2 °C). В пятом столбце приведены вероятности для значений, представленных в четвертом столбце.

Месяц	Максимальная температура (1659–1719 гг.), °C	Эмпирическая вероятность (1659–1719 гг.)	Значения температуры (1961–2021 гг.), °C	Эмпирическая вероятность (1961–2021 гг.)
Январь	6,5	1/60	6,5; 6,6; 6,7; 6,8; 7,0	5/60
Февраль	6,5	1/60	6,7; 6,7; 7,0; 7,3; 7,3	5/60
Март	7; 7	2/60	7,0; 7,0; 7,2; 7,2; 7,2; 7,4; 7,5; 7,5; 7,5; 7,6; 7,6; 7,6; 7,7; 7,8; 7,9; 7,9; 7,9; 8,3; 8,3; 8,4; 8,7	21/60
Апрель	9,5; 9,5; 9,5; 9,5	4/60	9,5; 9,6; 9,8; 10,0; 10,2; 10,3; 10,4; 11,2; 11,8	9/60
Май	13	1/60	13,0; 13,0; 13,1; 13,2; 13,2; 13,3; 13,4; 13,6	8/60
Июнь	16; 16; 16; 16	4/60	16,0; 16,1; 16,1; 16,4; 17,0	5/60
Июль	18,3	1/60	18,6; 18,7; 19,1; 19,5; 19,7	5/62
Август	17,5	1/60	17,6; 17,6; 17,6; 17,6; 18,0; 18,3; 18,7; 18,9; 19,2	9/60
Сентябрь	15; 15	2/60	15,1; 15,1; 15,2; 15,6; 15,9; 16,0; 16,8	7/60
Октябрь	11,5; 11,5; 11,5	3/60	11,6; 11,7; 11,7; 11,8; 11,9; 11,9; 12,4; 12,5; 12,5; 12,5; 12,6; 12,9; 13,0; 13,0; 13,1; 13,3	16/60
Ноябрь	8; 8	2/60	8,0; 8,0; 8,1; 8,1; 8,2; 8,3; 8,4; 8,5; 8,5; 8,5; 8,6; 8,7; 9,5; 9,6; 10,1	15/60
Декабрь	7,5	1/60	7,5; 8,1; 9,7	3/60

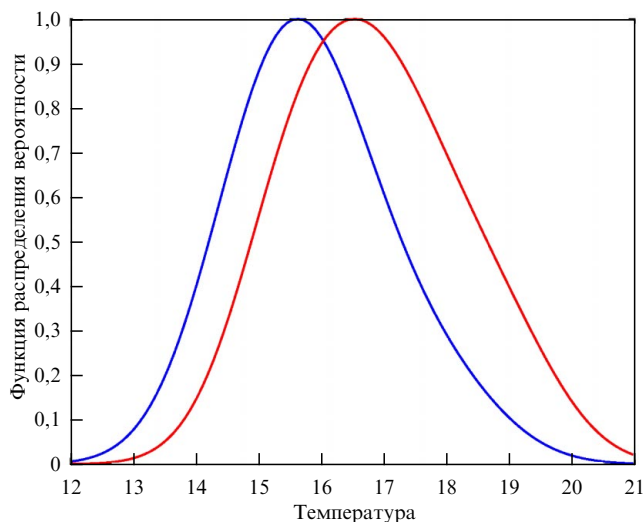


Рис. 3. Функции распределения вероятностей (PDF) температуры в Центральной Англии в июле за первые 60 лет наблюдения (1659–1719 гг., синяя кривая, $\mu = 15,72$, $\sigma = 0,99$) и за период с 2011 по 2021 гг. (красная кривая, $\mu = 16,41$, $\sigma = 1,27$).

чальном распределении $\mu = 15,72$, а $\sigma = 0,99$. Тогда экстремальными являются значения T , превышающие 17,37 или ниже 12,49. (Для гауссова распределения начальная вероятность экстремальной температуры равна $P(T > 17,37) = 1 - P(2) = 0,02275$.) Со временем среднее значение μ увеличилось на 0,69, в результате чего T стала

гауссовой случайной величиной с $\mu = 16,41$ и $\sigma = 1,27$. Тогда вероятность возрастает до $P(T > 17,37) = 1 - P(1,25) = 0,10565$, поэтому небольшое увеличение μ приводит к увеличению вероятности экстремальных значений $T > 17,37$ в 4,64 раза.

Напомним, что пороговое определение экстремальных значений T осталось неизменным при изменении μ . При изменении порога экстремального значения на $T > 18,29$ и приняв $\mu = 16,41$, получаем $P(T > 18,29) = 0,02275$, т.е. вероятность превышения этого порога не меняется.

Теперь рассмотрим ту же задачу, но для выборок данных отдельно за периоды времени 1659–1719 гг. и 1961–2021 гг. Каждая из этих выборок содержит 60 наблюдений, что означает, что максимальным экстремумом будет значение температуры, которое соответствует ровно одному наблюдению. Это абсолютный максимум выборки за этот период времени. Поскольку имеется 60 наблюдений, эмпирическая вероятность экстремальной температуры составит $1/60 = 0,0167$. Из таблицы стандартного нормального распределения следует, что эта вероятность соответствует значению $Z = 2,13$.

Предположим, что выборка за данный период времени имеет гауссово распределение (что является разумным выбором). Например, рассмотрим выборку средних месячных температур за январь за период 1659–1719 гг. Как отмечалось ранее, выборочное среднее и выборочное стандартное отклонение для этой выборки равны $\langle \mu \rangle = 2,6733$ и $\sigma = 2,1016$. Это означает, что экстремально высокой считается любая температура, превышающая $T_e = \langle \mu \rangle +$

$+2,13 \times \sigma = 7,1497$. Как упоминалось ранее, в период с 1659 по 1719 гг., при условии гауссова распределения, температура выше T_e реализуется с вероятностью 0,0167. Рассмотрим теперь выборку средних месячных температур за январь за период с 1961 по 2021 гг. Как известно, выборочное среднее и выборочное стандартное отклонение для этой выборки равны $\langle \mu \rangle = 4,155$ и $\sigma = 1,7651$.

Рассмотрим, насколько вероятно достижение температуры выше $T_e = 7,1497$ в более поздний период с 1961 по 2021 гг. Рассчитаем значение Z для T_e . Используя формулу для Z , получаем $Z = (T_e - \langle \mu \rangle) / \sigma = 1,6966$.

Таким образом, согласно таблице стандартного нормального распределения температура выше T_e реализуется с вероятностью $P(Z > 1,6966) = 0,0446$, что примерно в 2,6707 раза выше. Таким образом, видно, что сдвиг среднего значения приводит к почти трехкратному увеличению вероятности реализации экстремальной температуры.

Сравним также первые 60 наблюдений в ряду температурных данных (1659–1719 гг.), когда максимальная температура $T_{\max}$ имела эмпирическую вероятность $1/101$, с последними 60 наблюдениями (1960–2022 гг.), чтобы определить, сколько наблюдений превысили $T_{\max}$ (см. таблицу).

4. Выводы

Как показывают представленные данные, в среднем вероятность того, что в период 1961–2021 гг. температура в каждом месяце окажется выше или равной максимальной температуре за период 1659–1719 гг., в 5,2 раза выше, чем вероятность того, что в период 1659–1719 гг. температура окажется выше или равной максимальной температуре этого же периода. Это наблюдение согласуется с простой теоретической моделью, основанной на гауссовом распределении.

Таким образом, сдвиг средней месячной температуры, обусловленный глобальным потеплением, оказывает значительное влияние на вероятность возникновения высоких температур. Согласно полученным резуль-

татам, вероятность возникновения anomalно высоких температур в ряду наблюдений за температурой в Центральной Англии в настоящее время по сравнению с XVII веком возросла примерно в пять раз.

Благодарности. Автор выражает благодарность профессору Анастасии Рузмайкиной за помощь в анализе данных. Автор также благодарит рецензента за полезные комментарии, способствовавшие улучшению статьи.

Список литературы

1. Hulme M, Dessai S, Lorenzoni I, Nelson D R *Geoforum* **40** 197 (2009)
2. Bothe O "What even is Climate?" *Geosci. Commun. Discuss.* (2018) Preprint, DOI:10.5194/gc-2018-11
3. Werndl C *Br. J. Philos. Sci.* **67** 337 (2016) DOI:10.1093/bjps/axu048
4. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) "Global Warming of 1.5° C", An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty (Eds V Masson-Delmotte et al.) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2018); Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds V Masson-Delmotte et al.) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2021) Ch. 11
5. Ballerini R, Resnick S I *Adv. Appl. Probab.* **19** 801 (1987)
6. Krug J J. *Stat. Mech.* **7** P07001 (2007)
7. Hansen J, Ruedy R, Sato M, Lo K *Rev. Geophys.* **48** RG4004 (2010)
8. Rahmstorf S, Coumou D *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **108** 17905 (2011)
9. Колмогоров А Н *Основные понятия теории вероятностей* (М.: Наука, 1974); Kolmogorov A N *Foundations of the Theory of Probability* (New York: Chelsea Publ. Co., 1956)
10. McPherson G *Statistics in Scientific Investigation. Its Basis, Application, and Interpretation* (Springer Texts in Statistics) (New York: Springer, 1990) p. 73, DOI:10.1007/978-1-4757-4290-9_5
11. Parker D E, Legg T P, Folland C K *Int. J. Climatol.* **12** 317 (1992)
12. Рузмайкин А *УФН* **184** 297 (2014); Ruzmaikin A *Phys. Usp.* **57** 280 (2014)

On weather extremes caused by climate warming

A.A. Ruzmaikin

Department of Physics and Astronomy, California State University Northridge, 18111 Nordhoff Str., Northridge, CA, 91330, USA

E-mail: aruzmaik@gmail.com

The influence of climate warming on the increase in extreme weather events is investigated using a simple statistical model and the longest known record of the Central England temperature for 1659–2021. It is found that the shift in the mean monthly temperature due to climate warming has a significant influence on the probability of observing extreme temperatures. Thus, the probability of seeing high temperatures at the present time relative to the 17th century increases by approximately a factor of five in the temperature record. The average temperature in the 20th century is greater than or equal to the maximum temperature in 1659–1719 in each month. In 1961–2021 the probability of achieving of a specific temperature is 5.2 times larger than the probability of seeing the temperature greater than or equal to the maximum temperature in 1659–1719.

Keywords: climate warming, extreme events, longest temperature record

PACS numbers: 92.60.Ry, 92.60. Wc, 92.70.Mn

Bibliography — 12 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **196** (9) 1003–1007 (2026)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2026.07.040168>

Received 13 February 2026, revised 19 May 2026

Physics – Uspekhi **69** (9) (2026)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2026.07.040168>