

УДК 519.254 + 551.581.1

Декомпозиция широтного хода средней многолетней температуры по данным метеостанций Северного полушария и астрономической инсоляции в период 1897–2010 гг.

В.А. Тартаковский[✉], В.Г. Максимов, В.А. Крутиков*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

Поступила в редакцию 05.12.2023;
после доработки 22.01.2024;
принята к печати 25.03.2024

В связи с актуальностью исследований стабильности климата результаты измерения температуры на метеорологических станциях Северного полушария и данные астрономической инсоляции упорядочиваются по возрастанию широты и подвергаются совместному анализу для различных выборок в интервале 1897–2010 гг. Подобные исследования развиваются в связи с расширением сети метеостанций и накоплением новых данных. С помощью пошаговой регрессии широтного хода средней многолетней температуры к полиному от астрономической инсоляции выделяются детерминируемый Солнцем широтный тренд температуры и флуктуирующие остатки регрессии, в которых проявляются индивидуальные особенности данных. Отсутствие взаимодействия этих составляющих достигается численно для любых выборок. Установлено, что в Северном полушарии для имеющихся выборок широтный тренд средней многолетней температуры полностью определяет потепление и вносит ~82% в общую дисперсию температуры. Границы областей, где температуры выше и ниже широтного тренда средней многолетней температуры, выделяют известные географические структуры и тем самым верифицируют тренд.

Ключевые слова: астрономическая инсоляция, широтный ход температуры, полиномиальная регрессия, широтный тренд температуры; astronomical insolation, latitudinal temperature variation, polynomial regression, latitudinal temperature trend.

Введение

Климатическая система открыта для вынуждающего воздействия — входные потоки энергии и массы рассеиваются, трансформируются и ассимилируются в системе, часть энергии возвращается в космос. В значительной степени внешнее воздействие создается Солнцем, которое рассматривается как непосредственный источник радиации, магнитного поля, частиц плазмы и модулятор иных космических влияний [1].

Система находится в стационарном неравновесном состоянии, которое поддерживается механизмами самоорганизации при всепроникающем влиянии Солнца. В пространстве и времени наблюдается синхронизм некоторой группы геосферных процессов, как альтернатива происходят индивидуальные флуктуации элементарных процессов, которые совместно с групповым поведением характеризуют

устойчивость системы, — усиление флуктуаций приближает климатическую систему к переходу в новое качественное состояние [2].

Явление представляется предельно сложным, но есть, безусловно, актуальная задача, подлежащая решению, — мониторинг меры стабильности климата. Меры могут быть разными, но применимыми в мониторинге и связанными с наблюдениями реакций целостной системы, включающей Солнце, Землю, другие планеты и окружающее космическое пространство. На этом пути необходимо оценивать проявления вынуждающего солнечного воздействия в средней многолетней температуре на метеостанциях. В качестве оценки самого воздействия на распределенном входе в геосферу будем рассматривать астрономическую инсоляцию [3]. Анализ, проведенный в работах [4–6], подтверждает правомерность такого подхода в рамках астрономической теории климата.

Температурное поле формируется в геосфере и фиксируется на метеостанциях как конечный результат взаимодействия множества процессов различной природы, т.е. температура на распределенном

* Валерий Абрамович Тартаковский (trtk@list.ru);
Виталий Григорьевич Максимов (vitaly00@inbox.ru);
Владимир Алексеевич Крутиков (urmant@mail.ru).

выходе — на метеостанциях — есть результат нелинейной трансформации астрономической инсоляции, поступающей на распределенный вход — верхнюю границу атмосферы.

Вход в систему обеспечен корректными расчетами астрономической инсоляции, выход — многолетними наблюдениями температуры на многочисленных метеостанциях (см. раздел «Материалы и методы»), поэтому оценки солнечного воздействия могут быть максимально точными при минимуме данных. Это не достигается в рамках глобальных и частных климатических моделей [7, 8], где для настройки параметров модели, начальных и граничных условий необходимы обширные эмпирические данные о распределении многочисленных элементов климата.

Развивая работу [9], представим температурные данные конечным рядом линейно независимых степеней астрономической инсоляции (рис. 1, цв. вкладка) или инсоляционным полиномом, моделирующим нелинейное преобразование инсоляции в геосфере. Таким преобразованием, например, является многократное рассеяние [10]. Каждый акт рассеяния создает собственный набор степеней возмущающего воздействия; в этом смысле инсоляционный полином есть некоторая аналогия природных процессов.

При долговременном мониторинге поставленная задача решается путем сопоставления входа с выходом с применением пошаговой регрессии с предикторами из степеней инсоляции: выделяются тренд широтного хода средней многолетней температуры и остатки регрессии. Оценка коэффициентов детерминации широтных трендов для различных выборок есть мера групповых геосферных трансформаций солнечного воздействия, остатки регрессии — мера проявления стохастичности при трансформациях. Найденные величины характеризуют эволюцию обозначенной целостной системы.

С помощью регрессии с предикторами из степеней инсоляции формируется в общем случае линия регрессии с изменчивостью, ограниченной степенью инсоляционного полинома. Но широтный тренд, в отличие от линии регрессии, не должен воспроизводить все масштабы температурных колебаний и минимизировать дисперсию остатков регрессии. Он оценивается визуально по широтному ходу средней многолетней температуры [11] и соответственно некоторой физической реальности — географическим структурам. Затем при этих ограничениях выявляется влияние степени инсоляционного полинома на соотношение дисперсий обсуждаемых составляющих и, следовательно, максимизируется коэффициент детерминации. Численно подтверждается отсутствие взаимодействия детерминируемых Солнцем групповых процессов с индивидуальными флуктуациями температуры на метеостанциях.

В разработанном алгоритме пошаговой регрессии имеется возможность визуально и количественно оценивать результаты каждого шага и согласовывать их с исходным широтным ходом средней многолетней температуры. Используемые обозначения,

встроенные функции пакета Mathcad и алгоритм приведены в Приложении.

Описанные операции являются элементами долговременного мониторинга меры стабильности климата, цель работы — ее вычисление и исследование для конкретных выборов.

Материалы и методы

Для вычисления средних значений и среднеквадратических отклонений температуры использовались ряды последовательных среднемесячных значений температуры из электронной базы данных CRUTEM.5.0.1.0 [12]. Отбирались станции, у которых данные отсутствовали не дольше одного месяца подряд. В результате сформированы выборки среднемесячных значений температуры в Северном полушарии на множестве из 3669 метеостанций в интервале с 1971 по 2010 г.; на подмножестве из 1265 станций в интервалах [1897; 1927], [1971; 2010], [1971; 1990], [1991; 2010]. Они представляются самыми длинными и объемными для данной базы данных. На Международной метеорологической конференции (Варшава, 1935) в качестве достаточного интервала для оценивания характеристик климата установили интервал не менее 30 лет. В дальнейшем решили, что при осреднении температуры воздуха время стационарности может быть от 20 до 1000 лет [13].

Известно, как рассчитывают среднюю температуру широтного круга [14], которая необходима для построения изаномалий. Обычно широтные круги проводят с шагом 5–10°, что приводит к потере информации. Внешне похожая операция реализуется в настоящей работе при выполнении регрессии. Однако для построения широтного тренда вычисляются моменты температуры путем усреднения по всем широтам, где располагаются метеостанции.

Вычисления средних значений и среднеквадратических отклонений астрономической инсоляции за обозначенные периоды производились на основе таблицы ее среднемесячных значений из электронной базы [15], где использовались данные высокоточных астрономических эфемерид [16]. Метод расчета инсоляции для этой базы данных приведен в работах [17, 18]. Значения инсоляции представлены для 36 широтных зон от 90° ю.ш. до 90° с.ш.

Среднеквадратические отклонения астрономической инсоляции c_n (см. рис. 1) используются в работе для оптимизации выборки за счет устранения данных, характеризующихся как выбросы на части станций. Общность модели тренда при этом возрастает в смысле ее пригодности для различных выборов.

В указанной базе данных инсоляции среднемесячные значения соответствуют 1/12 части тропического года, а при формировании температурных рядов за начало года принята дата весеннего равноденствия. Исходные ряды температуры и инсоляции совмещались на широтах расположения метеостанций путем сплайн-интерполяции (lspline, Mathcad).

Регрессия инсоляционным полиномом и обсуждение результатов

При полиномиальной регрессии коэффициент детерминации R^2 должен расти вместе со степенью полинома [19]. В данном случае наблюдается монотонный рост. Особенность этого роста в том, что начиная со степени полинома $P = 4$ коэффициент детерминации растет очень медленно и склонен к насыщению — проявляется сродственность примененной суперпозиции степеней инсоляции широтному ходу средней многолетней температуры.

В табл. 1 приводятся оценки изменения R^2 для различных выборок. Видно, что последовательность инсоляционных полиномов — регрессоров степени P — сходится с ростом P к широтному тренду $\hat{l}_n$ по мере, равной коэффициенту детерминации широтного тренда. После $P = 10$ достигается более выраженное насыщение R^2 . Кроме того, визуальный анализ широтного хода средней многолетней температуры t_n и широтного тренда $\hat{l}_n$ показывает, что они в целом лучше соответствуют друг другу при таком выборе степени полинома. В дальнейшем необходимо дополнительное исследование общности этого эмпирического факта.

С одной стороны, с целью увеличения R^2 целесообразно удалить некоторые метеостанции из выборки, расценивая их как выбросы, с другой — желательно охватить все. Алгоритм пошаговой регрессии оптимизирует эти противоречивые обстоятельства (см. Приложение). На первом шаге рассчитывается широтный тренд (#3) для исходной выборки, на втором шаге производится дискриминация выбросов и широтный тренд корректируется (#9).

В выборке температур на метеостанциях присутствует широтная гетероскедастичность (рис. 2, цв. вкладка), поэтому порог дискриминации выбросов должен изменяться по широте. Для его вычисления (#6) используется среднеквадратичное отклонение инсоляции c_n : определяются ее огибающие env_n , по которым вычисляются две мажоранты en_n , симметричные относительно среднего остатков регрессии, путем линейной трансформации широтного хода c_n (см. рис. 1 и 2). Метеостанции, у которых остатки регрессии лежат вне области, охватываемой мажорантами, устраняются из анализа; затем повторно рассчитывается линейная регрессия $\text{linfit}(a_0 + a_1 l_m, t_m) \rightarrow \hat{l}_m$ (#9) с найденным на этапе #3 трендом. Изменения коэффициента мажоранты h (табл. 2) в единицах c_n позволяет сдвигать и раздвигать их относительно $\text{mean}(\epsilon_n) = 0$, тем самым оптимизируя целевую функцию в виде $MR^2/100N$. Расчеты показали, что оптимум лежит в окрестности $h = 2$ для исследованной выборки (табл. 2).

Оператором #3 решается система линейных нормальных уравнений метода наименьших квадратов. В эту систему входит уравнение с предиктором в нулевой степени, поэтому среднее значение остатков регрессии должно быть точным нулем для любых выборок. В результате во всех случаях отсутствует прямое влияние остатков регрессии на глобальное потепление, которое обусловлено только изменениями широтного тренда средней многолетней температуры. Метрики, приведенные в табл. 3, рассчитывались исходя из средней многолетней температуры для интервала 1971–2010 гг. и подтверждают сказанное.

Таблица 1

Коэффициенты детерминации (%) широтного тренда средней многолетней температуры в зависимости от степени инсоляционного полинома для различных выборок

P	Период, гг.					
	количество метеостанций					
	1971–2010	1971–1990	1991–2010	1898–1927	1988–2017	1971–2010
	1264	1264	1264	1264	1264	3486*
1	65,61	65,91	65,22	66,06	65,42	74,55
2	65,61	79,27	78,89	79,28	79,02	79,45
3	79,55	79,68	79,32	79,50	79,44	80,43
4	81,74	81,83	81,55	81,66	81,65	81,60
5	82,08	82,15	81,92	82,28	82,01	81,84
6	82,27	82,33	82,12	82,55	82,20	81,60
7	82,28	82,34	82,13	82,59	82,21	81,71
8	82,36	82,42	82,20	82,66	82,28	81,84
9	82,38	82,44	82,22	82,70	82,30	82,25
10	82,46	82,52	82,30	82,77	82,38	82,32
11	82,47	82,53	82,31	82,77	82,39	82,44
12	82,47	82,53	82,32	82,78	82,40	82,46
13	82,48	82,53	82,32	82,78	82,40	82,46
14	82,48	82,54	82,33	82,79	82,41	82,46
30	82,50	82,56	82,34	82,80	82,43	82,48
40	82,50	82,55	82,34	82,80	82,42	82,35
$\overline{R_p^2}$	82,34(0,13)	82,18(0,13)	82,41(0,12)	82,61(0,19)	82,27(0,13)	82,14(0,21)

Примечание. Коэффициенты значимы по критерию Фишера на уровне 0,01. В круглых скобках указан доверительный интервал по Пирсону. * Применено удаление выбросов, $h = 2$.

Таблица 2

Статистики широтного хода средней многолетней температуры

$100M/N, \%$	$R^2, \%$	$MR^2/100N$	h	$\delta^2(\varepsilon_m), \%$	$\delta^2(\bar{l}_m), \%$
88,69	84,58	0,750	1,5	15,42	84,58
95,01	82,32	0,782	2,0	17,68	82,32
98,75	78,97	0,780	3,0	21,03	78,97
100	75,14	0,751	∞	24,86	75,14

Примечание. Данные с 3669M/N метеостанций за 1971–2010 гг. Конечные значения h обеспечивают удаление выбросов. Коэффициенты детерминации значимы по критерию Фишера на уровне 0,01.

Таблица 3

Метрики тренда и остатков регрессии широтного хода средней многолетней температуры

Теоретические значения	Вычисленные значения	
	$h = \infty$	$h = 2$
$\text{corr}(\bar{l}_m, \varepsilon_m) = 0$	$\sim 1 \cdot 10^{-14}$	$\sim 7 \cdot 10^{-16}$
$1 - \delta^2(\bar{l}_m) - \delta^2(\varepsilon_m) = 0$	$\sim 1 \cdot 10^{-14}$	$\sim 7 \cdot 10^{-16}$
$\text{mean}(\varepsilon_m) = 0, ^\circ\text{C}$	$\sim 7 \cdot 10^{-15}$	$\sim -1 \cdot 10^{-14}$

Примечание. Данные с 3669M/N станций (табл. 2). Применено удаление выбросов при $h = 2$.

При вычислениях суммируются длинные массивы малых и больших чисел; с ростом степени предиктора накапливаются значительные ошибки из-за конечности мантиссы. Разработанный алгоритм пошаговой регрессии с высокой точностью обеспечивает отсутствие взаимодействия двух составляющих аддитивной смеси: широтного тренда и остатков регрессии. Для этого на втором шаге регрессии оператор #9 производит линейную трансформацию тренда $\bar{l}_m$, при этом коэффициент детерминации практически не меняется, а метрики из табл. 3 целенаправленно приближаются к машинному нулю при любом выборе метеостанций и временных интервалов, что верифицирует алгоритм на уровне вычислений. Следствием этого является совпадение расчетных значений коэффициента детерминации широтного тренда и его относительной дисперсии (см. табл. 2).

Результаты пространственно-временного анализа различных выборок (см. табл. 1–3) показывают, что отраженные в выборках процессы стационарны и однородны по отношению к коэффициенту детерминации найденного тренда, который в исследованных выборках составил $\sim 82\%$. Широтный тренд в сумме с остатками регрессии образует исходный широтный ход средней многолетней температуры $t_n = \bar{l}_n + \varepsilon_n$.

Верификация широтного тренда средней многолетней температуры путем сопоставления с географическими структурами

Для выделения границ географических областей остатки регрессии разделялись на две составляющие с разными знаками: $(t_n - \bar{l}_n) \geq 0$ и $(t_n - \bar{l}_n) < 0$. Эти разности отражают энергоизбыточные и энергоде-

фицитные по отношению к широтному тренду области (рис. 3, цв. вкладка). Принадлежность этих областей известным географическим регионам с соответствующим температурным режимом будет верифицировать найденный широтный тренд. Области не имеют строгой зональности, как если бы они определялись непосредственно солнечной радиацией. Косвенное солнечное влияние реализуется через глобальные теплые и холодные океанические течения и атмосферную циркуляцию.

В Европе, до Урала, исключая горные районы, температура находится выше широтного тренда, в этом смысле территория является энергоизбыточной. Тепло Северной Атлантики формирует здесь существенно более высокую температуру, чем на тех же широтах в центре континента и чем если бы нагрев этой территории определялся только приходом солнечного излучения.

За Уралом средняя многолетняя температура на метеостанциях ниже температуры тренда, территория энергодефицитна. Территория открыта охлаждающему влиянию Северного океана и холодных течений Тихого океана. Часты арктические вторжения холодного воздуха. В холодное полугодие территория находится под властью обширного малоподвижного азиатского максимума давления, формирующего здесь экстремально холодные условия.

На юго-востоке Азии средняя многолетняя температура ниже широтного тренда из-за того, что высочайшие горные вершины блокируют западный перенос и способствуют формированию здесь меридиональных процессов, которые определяются взаимодействием суши и океана. В горах в целом температура ниже, чем на равнине, так как температура с высотой снижается, в высоких горах нивальный пояс способствует выхолаживанию, что оказывает охлаждающее влияние на близлежащие территории. В результате над Юго-Восточной Азией муссоны, а не западный перенос, определяют поле температуры. Влажный воздух с океана в течение почти полугодия холоднее, чем воздух, насыщенный водяным паром.

Крайнему югу и юго-востоку побережья Азии свойственен тропический муссонный климат, к тому же сразу от побережья начинаются Южно-Китайские горы, наиболее крупные хребты которых (Наньлин и Уишань) являются климаторазделом: с юга и юго-востока от них температура выше широтного тренда, а к западу и северо-западу – ниже.

Также заметна энергоизбыточная зона, углубляющаяся от залива Бохайвань в материк вдоль Северо-Восточной равнины, левобережья нижнего течения р. Хуанхэ. Здесь температура выше широтного тренда, хотя в холодное полугодие сюда поступает воздух с севера и северо-запада, но этот поток, спускаясь в равнину, адиабатически нагревается. Эта зона обрамлена севернее и западнее горными системами, над которыми температура ниже широтного тренда за счет охлаждающего влияния гор. Зона с температурой выше широтного тренда видна в районе Туранской низменности, с очень жарким летом, и районе Тянь-Шаня, где

есть смягчающее влияние огромной водной массы оз. Иссык-Куль, а на восточных склонах Тянь-Шаня части фены [20].

Области температур выше и ниже широтного тренда в Северной Америке отражают рельеф континента. Система Кордильер на востоке и Аппалачи на западе являются энергодефицитными. Вдоль обширной территории с пониженным рельефом в северо-восточной части Северной Америки беспрепятственно проникают холодные воздушные массы из Арктики. Теплые потоки из акватории Карибского моря и Мексиканского залива проникают на сушу с юга через Великие равнины и долину р. Миссисипи. На восточном побережье широтный тренд показывает влияние на температуру Гольфстрима и холодного Лабрадорского течения.

Рассчитанный широтный тренд выявляет и другие менее протяженные, но ясно очерченные структуры. Температура выше тренда фиксируется на станциях в зоне Куроисио, Аляскинского теплого течения; ниже — в Альпах, Пиренеях, на станциях, где действуют прибрежные течения в Охотском море и Калифорнийское течения. Рядом лежащие острова в океанах могут иметь разные знаки остатков регрессии, что указывает на наличие в их окрестностях долгоживущих разнонаправленных процессов; на Гавайских островах эти процессы, видимо, обусловлены разной высотой горных вершин. Самый крупный остров архипелага (о. Гавайи) является энергодефицитным. На острове выше горы, их северные и северо-восточные склоны в большей степени подвержены влиянию пассатов, которые приносят влагу, иногда может выпадать снег.

Используя широтный тренд средней многолетней температуры, представленный инсоляционным полиномом десятой степени, можно выделить реальные географические регионы — энергодефицитные и энергоизбыточные. При необходимости есть возможность проводить более детальную классификацию по этим критериям [21]. Таким образом, найденный тренд вполне объективен и детерминируется прямо и косвенно вынуждающим воздействием Солнца, индицируемого астрономической инсоляцией.

Заключение

Метеостанции Северного полушария упорядочивались по широте, широтный ход средней многолетней температуры подвергался регрессии к полиному, образованному суперпозицией последовательных степеней астрономической инсоляции. Выделялись широтный тренд и индивидуальные, по метеостанциям, флуктуации средней многолетней температуры. Таким способом может быть осуществлен долговременный мониторинг меры стабильности климата. Разработанные алгоритмические решения способствовали выявлению функциональных свойств найденных составляющих и новых закономерностей в климатической системе.

Разработан вариант алгоритма пошаговой регрессии, оптимизирующий объем выборки и коэффициент детерминации широтного тренда с помо-

щью среднеквадратичного отклонения инсоляции в качестве мажоранты широтного хода средней многолетней температуры.

Дополнительный шаг линейной регрессии с машинной точностью обеспечил отсутствие корреляции широтного тренда с остатками регрессии и нулевое среднее последних. В этих условиях широтный тренд средней многолетней температуры полностью определяет потепление в местах расположения метеостанций Северного полушария.

Инсоляционный полином выше четвертой степени переводит рост коэффициента детерминации широтного тренда в область квазинасыщения, обеспечиваются его высокие значения по шкале Чеддока; точность и сложность модели широтного тренда в виде инсоляционного полинома слабо связаны для исследованных степеней полинома.

Широтный тренд верифицирован высокими коэффициентами детерминации по шкале Чеддока, соответствием широтному ходу средней многолетней температуры и совпадением границ известных географических областей с теми, где температура выше и ниже широтного тренда в Северном полушарии.

В рамках исследованных выборок впервые установлено, что широтный тренд вносит ~82% в дисперсию широтного хода средней многолетней температуры; эта константа определена закономерным солнечным воздействием на геосферу. Остатки регрессии (18%) характеризуют индивидуальность флуктуаций температуры на метеостанциях.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность к.г.н. Н.Н. Чередыко за помощь и полезные обсуждения.

Финансирование. Фундаментальные исследования были проведены в рамках госзадания ИМКЭС СО РАН (№ 121031300155-8).

Приложение

Используемые обозначения

$n, m = 1, 2, 3, \dots$ — текущие номера метеостанций из выборки объема N или $M \leq N$;

ϕ_n, λ_n — широта, долгота места расположения метеостанции с номером n ;

t_n — средняя многолетняя температура за период наблюдения на метеостанциях, упорядоченная по широте и номеру n ;

s_n, c_n — среднее и среднеквадратичное отклонение астрономической инсоляции на широте метеостанции с номером n за исследуемый период;

$\hat{l}_n = \sum_{p=0}^P a_p s_n^p$ — широтный тренд средней много-

летней температуры на широте метеостанций с номером n , представленный инсоляционным полиномом степени P ;

a_p — коэффициент инсоляционного полинома при степени $p = 0, 1, 2, \dots, P$;

$\varepsilon_n = t_n - \hat{l}_n$ — остатки регрессии;

$R^2 = 1 - \sum_n \varepsilon_n^2 / \sum_n [t_n - \text{mean}(t_n)]^2$ — коэффициент детерминации тренда;

$\overline{R_p^2}$ — среднее значение коэффициента детерминации по выборке полиномов степени P ;

$\delta^2(\hat{l}_m) = \text{var}(\hat{l}_m) / \text{var}(t_n)$ — относительная дисперсия тренда;

$\delta^2(\varepsilon_n) = \text{var}(\varepsilon_n) / \text{var}(t_n)$ — относительная дисперсия остатков регрессии;

en_n — мажоранта остатков регрессии;

h — коэффициент при $\text{stdev}(\varepsilon_n)$ для вычисления мажоранты остатков регрессии.

Встроенные функции Mathcad вычисляют: среднее значение — mean; среднее квадратичное отклонение — stdev; дисперсию — var; коэффициент корреляции — corr; коэффициенты линейной регрессии — line; коэффициенты полиномиальной регрессии — linfit. Для определения критических значений распределения Фишера использовалась встроенная функция Exel ФРАСПОБР.

Алгоритм

#1. Ввод матрицы данных:

$$\|\phi_n, \lambda_n, t_n, s_n, c_n\|; n \in [1, N].$$

#2. Упорядочение матрицы данных по широте:

$$\|\phi_n, \lambda_n, t_n, s_n, c_n\|; \phi_{n+1} > \phi_n; n = 1, 2, 3, \dots, N.$$

#3. Вычисление широтного тренда, предикторы s_n^p :

$$\text{linfit}\left(\sum_p a_p s_n^p, t_n\right) \rightarrow \hat{l}_n.$$

#4. Вычисление остатков регрессии:

$$\varepsilon_n := t_n - \hat{l}_n.$$

#5. Вычисление коэффициента детерминации:

$$R^2.$$

#6. Вычисление мажоранты остатков en_n из огибающей env_n , предиктор c_n :

$$\text{line}(c_n, |\varepsilon_n|) \rightarrow env_n;$$

$$en_n := env_n - \text{mean}(env_n) + h \cdot \text{stdev}(\varepsilon_n).$$

#7. Селекция метеостанций:

$$t_n := \text{if}(t_n < en_n \cup t_n > -en_n, t_n, z).$$

#8. Исключение метеостанций, отмеченных символом «z», и их перенумерация: набор 1, 2, 3, ..., N заменяется на 1, 2, 3, ..., M; $M \leq N$.

#9. Вычисление широтного тренда по полиному степени $P = 1$ от широтного тренда $\hat{l}_m$, вычисленного в #3:

$$\text{linfit}(a_0 + a_1 \hat{l}_m, t_m) \rightarrow \hat{l}_m.$$

#10. Вычисление остатков регрессии:

$$\varepsilon_m := t_m - \hat{l}_m.$$

#11. Вычисление коэффициента детерминации:

$$R^2.$$

#12. End.

Примечание. Число со знаком # обозначает номер строки алгоритма.

Список литературы

1. Albert A., Alfaro R., Alvarez C., Arteaga-Velázquez J. C., Rojas Avila D., Solares Ayala H. A., Babu R., Belmont-Moreno E., Brisbois C., Caballero-Mora K. S., Capistrán T., Carramiñana A., Casanova S., Chaparro-Amaro O., Cotti U., Cotzomi J., Coutiño de León S., De la Fuente E., Hernandez Diaz R., Dingus B.L., Duvernois M.A., Durocher M., Díaz-Vélez J. C., Ellsworth R.W., Engel K., Espinoza C., Fan K.L., Fang K., Alonso Fernández M., Fleischhack H., Fraija N., García-González J.A., Garfias F., González M.M., Goodman J.A., Harding J. P., Hernandez S., Hinton J., Huang D., Hueyotl-Zahuantitla F., Hütemeyer P., Iriarte A., Joshi V., Kaufmann S., Lee J., Linnemann J.T., Longinotti A.L., Luis-Raya G., Malone K., Martinez O., Martinez-Castro J., Matthews J.A., Miranda-Romagnoli P., Morales-Soto J.A., Moreno E., Mostafá M., Nayerhoda A., Nellen L., Nisa M.U., Noriega-Papaqui R., Olivera-Nieto L., Omodei N., Araujo Pérez Y., Pérez-Pérez E.G., Rho C.D., Rosa-González D., Ruiz-Velasco E., Salazar H., Salazar-Gallegos D., Sandoval A., Schneider M., Serna-Franco J., Smith A.J., Son Y., Springer R.W., Tibolla O., Tollefson K., Torres I., Torres-Escobedo R., Turner R., Ureña-Mena F., Varela E., Villaseñor L., Wang X., Watson I. J., Willox E., Yun-Cárcamo S., Zhou H., de León C., Beacom J. F., Linden T., Ng K.C.Y., Peter A.H.G., Zhou B. (HAWC Collaboration) Discovery of gamma rays from the quiescent Sun with HAWC // Phys. Rev. Lett. 2023. V. 131, N 5. P. 051201. DOI: 10.1103/PhysRevLett.131.051201.
2. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. М.: Прогресс, 1986. 432 с.
3. Инсоляция. Различия в требованиях к инсоляции в различных климатических районах. Солнцезащитные средства. URL: <https://studfile.net/preview/5428066/page:65/> (дата обращения: 10.11.2023).
4. Berger A., Li X.S., Loutre M.F. Modelling Northern Hemisphere ice volume over the last 3 Ma // Sci. Direct. Quatern. Sci. Rev. V. 18, N. 1. 1999. P. 1–11.
5. Elkitabbi M., Rial José A. An outsider's review of the astronomical theory of the climate: Is the eccentricity-driven insolation the main driver of the ice ages? // Earth Sci. Rev. 2001. V. 56, N 1. P. 161–177. DOI: 10.1016/S0012-8252(01)00061.
6. Rousseau Denis-Didier, Bagniewski W., Ghil M. Abrupt changes and the astronomical theory: Are they related? // Clim. Past. 2022. V. 18, № 2. P. 249–271. DOI: 10.5194/cp-18-249-2022.
7. Дымников В.П., Володин Е.М., Галин В.Я., Глазнов А.В., Грицун А.С., Дианский Н.А., Лысков В.Н. Климат и его изменения: математическая теория и численное моделирование // Сибир. журн. вычислительной математики. 2003. Т. 6, № 4. С. 347.
8. Лобанов В.А. Лекции по климатологии. Ч. 2. Динамика климата. В 2 кн.: Кн. 2. СПб.: РГГМУ, 2018. 377 с.
9. Тартаковский В.А., Чередько Н.Н., Максимов В.Г. Определение средней широтной температуры путем линейной трансформации астрономической инсоляции

- // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 11. С. 902–907. DOI: 10.15372/АОО20191104.
10. Бусыгин В.П., Гаврилович А.Б., Рублев А.Н. Распределение длин пробега фотонов, выходящих через атмосферу Земли в Космос // Изв. АН БССР. Сер. физ.-мат. наук. 1991. № 6. С. 80–85.
 11. Диагностика регрессионных моделей. URL: http://creativity.ipras.ru/texts/AspSem/lobanov_10_03_11.pdf (дата обращения: 10.05.2023).
 12. Архив Университета Восточной Англии. URL: <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/crutem5/data/CRUTEM.5.0.1.0/download.html> (дата обращения: 19.04.2023).
 13. Монин А.С. Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 248 с.
 14. Хромов С.П., Петросянец М.А. Метеорология и климатология: учебник. 7-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, 2006. 520 с.
 15. Солнечная радиация и климат. Солярная теория климата. URL: <http://www.solar-climate.com/sc/bd01.htm> (дата обращения: 11.05.2023).
 16. Giorgini J.D., Yeomans D.K., Chamberlin A.B., Chodas P.W., Jacobson R.A., Keesey M.S., Lieske J.H., Ostro S.J., Standish E.M., Wimberly R.N. JPL's on-line solar system data service // Bull. Am. Astron. Soc. 1996. V. 28, N 3. P. 1158.
 17. Федоров В.М. Инсоляция Земли и современные изменения климата. М.: Физматлит, 2018. 232 с.
 18. Федоров В.М. Инсоляционная контрастность и тенденции изменения современного климата // Окружающая среда и энерговедение. 2022. № 3. С. 56–66. DOI: 10.24412/26586703-2022-3-56-66.
 19. Курзаева Л.В. Регрессионный анализ в электронных таблицах // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исслед. 2016. № 12-7. С. 1234–1238. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=11019> (дата обращения: 14.06.2023).
 20. Chung Y.-S. On the observations of yellow sand (dust storms) in Korea // Atmos. Env. Part A. General Top. 1992. V. 26, N 15. P. 2743–2749. DOI: 10.1016/0960-1686(92)90010-I.
 21. Тартаковский В.А., Крутиков В.А., Волков Ю.В., Чередыко Н.Н. Классификация климата путем анализа фазы температурных рядов // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 8. С. 711–717. DOI: 10.15372/АОО20150806.

V.A. Tartakovsky, V.G. Maximov, V.A. Krutikov. Decomposition of the latitudinal variation in the long-term average temperature using data from weather stations in the Northern Hemisphere and on astronomical insolation in 1897–2010.

Temperature data at weather stations in the Northern Hemisphere and astronomical insolation data are ordered by increasing latitude and analyzed together for different samples between 1897 and 2010. By step-by-step regression of the latitudinal variation in the long-term average temperature to a polynomial of astronomical insolation, a latitudinal temperature trend determined by the Sun and fluctuating regression residuals, in which individual features of data appear, are identified. The absence of interaction of these components is numerically achieved for any samples. It has been established that in the Northern Hemisphere for the available samples, the latitudinal trend in the long-term average temperature completely determines the warming and contributes about 82% to the total temperature dispersion. The boundaries of areas where temperatures are above and below the latitudinal trend in the long-term average temperatures reveal known geographic structures, thereby verifying the trend.

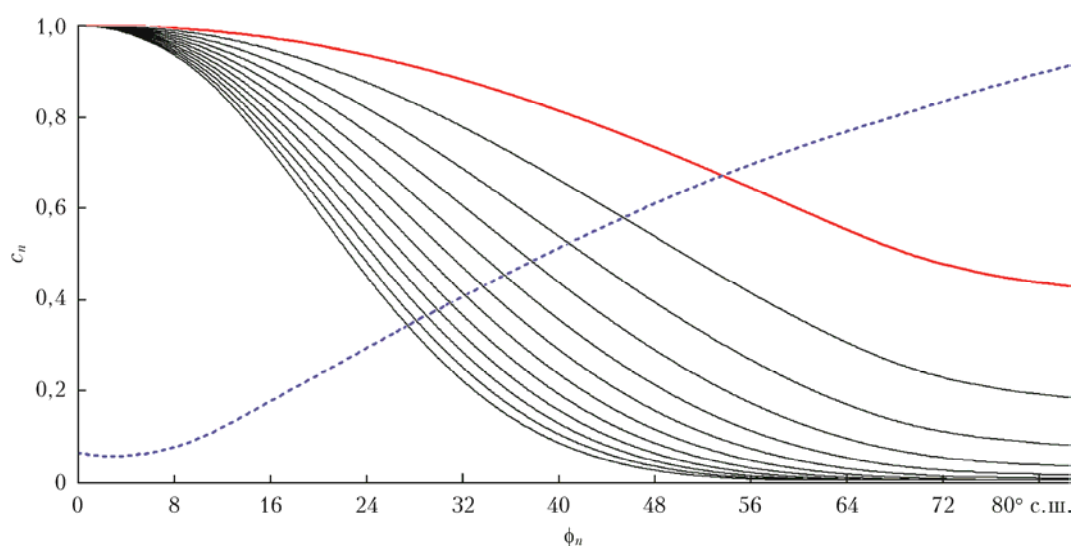


Рис. 1. Степени астрономической инсоляции, нормированной на $415,124 \text{ Вт/м}^2$: степень 1 (красная линия), степени 2–12 (черные линии); среднеквадратичное отклонение инсоляции (синий пунктир). Данные приведены к широте метеостанций с номерами n в период 1971–2010 гг.

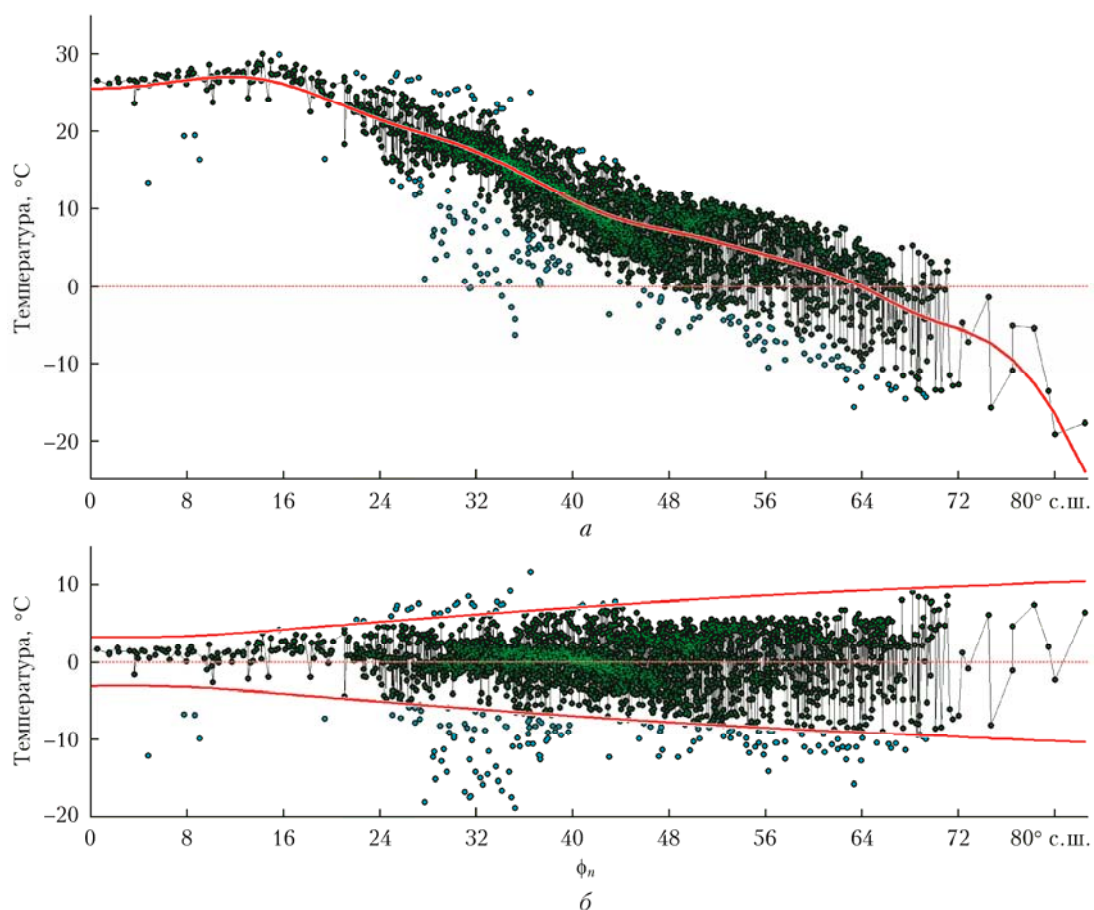


Рис. 2. Широтный тренд $\hat{t}_n$ (красная линия) средней многолетней температуры t_n на метеостанциях с номерами n (а): применена регрессия полиномом 10-й степени от инсоляции s_n по 3486 черно-зеленым кружкам — 95,01% всех метеостанций из выборки ($h = 2$), $R^2 = 82,32\%$, 1971–2010 гг. (табл. 2, 3); селекция метеостанций по остаткам регрессии ε_n на метеостанциях с номерами n (б): мажоранты остатков en_n (красные линии) получены линейной трансформацией среднеквадратичного отклонения инсоляции s_n , голубые кружки — 183 не принятые в расчет метеостанции, данные которых расцениваются как выбросы

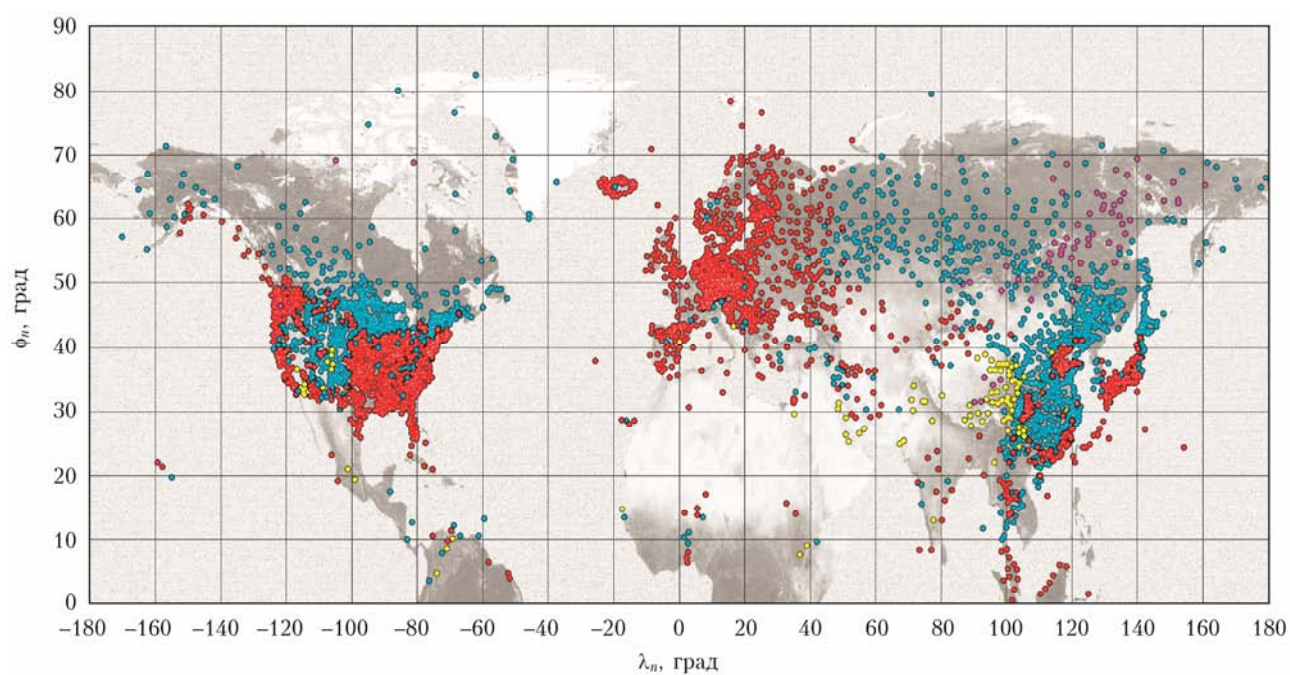


Рис. 3. Географические структуры, отображенные 3669 метеостанциями, на 1767 (красные кружки ~48,2%) средняя многолетняя температура находится выше широтного тренда, на 1719 (синие кружки ~46,8%) – ниже; на 183 – данные определены как выбросы ~5% (положительные – желтые, отрицательные – сиреневые)