

УДК 551.521.3

Эмерджентные свойства климатической системы. Производные среднегодовой температуры на метеостанциях Северного полушария

В.А. Тартаковский, Н.Н. Чередыко, В.Г. Максимов*

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

Поступила в редакцию 14.12.2020 г.

Проанализированы производные среднегодовой температуры по данным 927 метеостанций Северного полушария за период 1955–2016 гг. Изменения производных рассматриваются как проявления эмерджентного свойства целостной климатической системы. Введена мера этих проявлений. Она имеет вид функционала, который включает усреднение положительных и отрицательных производных и вычисление их коэффициентов корреляции. Установлено, что выборочное распределение сумм противоположных экстремумов производных среднегодовой температуры симметрично и имеет больший эксцесс, нежели нормальное. В исследуемый период значения меры уже находятся вблизи своих предельных значений, поэтому необходима ежегодная оценка изменений меры эмерджентных свойств в системе многоканального мониторинга.

Ключевые слова: мониторинг изменений климата, эмерджентные свойства, климатическая система; climate change monitoring, emergent properties, climate system.

Введение

Климатическая система открыта для внешнего воздействия; потоки энергии и массы рассеиваются, трансформируются и ассимилируются в пределах возможностей системы, а избыточная энергия удаляется за ее пределы. В конкретном месте энергия может возрастать и убывать, в результате достигается баланс, который может изменяться в процессе эволюции системы. Такая самоорганизующаяся система будет находиться в стационарном неравновесном состоянии [1], или в состоянии «проточного равновесия» [2].

Климатическая система также является нелинейным осциллятором с широким спектром собственных частот. На этих частотах возможен резонанс с внешним воздействием, вызывающий значительные отклонения от средних значений метеорологических процессов. При этом само внешнее воздействие может быть небольшим, но вовлекать в процесс внутреннюю энергию системы, накопленную, в частности, за счет парникового эффекта [3, 4].

В процессе самоорганизации повышается согласованность разнонаправленных потоков энергии. В общем случае этот процесс носит колебательный характер. Максимальная согласованность типична для критического состояния, за которым возникают бифуркации в фазовом пространстве системы. Наблюдения показали, что глобальное потепление

способствует увеличению частоты и интенсивности экстремальных явлений, усиливается нестабильность климатической системы, что есть проявления ее приближения к области бифуркаций [5–11].

Изучение сложных систем эффективно путем выявления их свойств, связанных с наличием самой системы и обеспечением ее существования. Эти системные свойства известны как эмерджентные [12] и подлежат определению. При этом полагается, что эмерджентные свойства системы не могут быть сведены к свойствам ее подсистем и отдельных элементов или суперпозиции их свойств.

Из практических соображений и потребностей мониторинга эмерджентное свойство должно быть измеримым. Необходимо ввести меру изменчивости, вычисляя которую по результатам наблюдений, можно будет оценить состояние целостной климатической системы. Конструкция меры неочевидна, но мы считаем, что она должна представлять собой сложный функционал, привязанный к конкретным метеостанциям, который неявно зависит от всех процессов в системе, идентифицируемых на основе эмпирических представлений и наблюдаемых данных. В частности, ассимиляция энергии в атмосфере и в активном слое почвы, перенос воздушных масс, изменение структуры температурных полей в пространстве и времени, уход энергии из системы. Это обширные, но не строгие требования; возможны различные конструкции, выделяющие требуемые аспекты эволюции климатической системы. В любом случае целесообразно иметь в виду именно эмерджентные свойства с целью получения обобщенных знаний о климатической

* Валерий Абрамович Тартаковский (trtk@list.ru); Наталья Николаевна Чередыко (atnik3@rambler.ru); Виталий Григорьевич Максимов (vitaly00@inbox.ru).

системе. В настоящей работе вводятся варианты требуемой меры эмерджентных свойств с использованием некоторого функционала от коэффициентов корреляции Пирсона положительных и отрицательных производных среднегодовой температуры на метеостанциях.

Энергетический баланс есть необходимое условие сохранения целостной климатической системы. Совокупности характеристик его изменчивости следует рассматривать как источник эмерджентных свойств системы. В соответствии с кинетической теорией энергия поступательного движения молекул газа прямо пропорциональна его абсолютной температуре. С учетом этих обстоятельств корреляция положительных и отрицательных производных температуры на метеостанциях будет также характеризовать корреляции входящих и исходящих потоков энергии в местах измерения.

Далее исследуются меры эмерджентных свойств и элементы их конструкции. Полученные результаты интерпретируются путем сопоставления с известными свойствами системы, находящейся в состоянии проточного равновесия. Делаются выводы о возможности применения введенной меры эмерджентных свойств для мониторинга состояния целостной климатической системы.

Данные наблюдений и расчетные соотношения

Будем использовать ряды среднемесячных температур за период 1955–2016 гг., вычисленные по срочным данным 927 метеостанций в Северном полушарии, предоставляемые Университетом Восточной Англии [13]. Рассматриваемая база большей частью основана на температурных данных, аккумулируемых в Глобальной исторической климатологической сети (GHCN). Сеть признана во всем мире и содержит информацию, необходимую для количественной оценки климатических изменений [14]. В базе проводится профессиональная корректировка однородности рядов данных для минимизации неклиматических эффектов, а также автоматический контроль качества данных [15, 16]. Ряды температур с метеостанций отбирались в том случае, если поддерживался режим непрерывных наблюдений, а общее количество отсутствующих данных не превышало 3% от числа использованных среднемесячных значений.

Формировались исходные ряды $t_{s,y}$ среднегодовых температур (°C) с временным индексом $y = 1955, 1956, \dots, 2016$ на метеостанции с номером $s = 1, 2, \dots, 927$. Рассчитывались разности среднегодовых температур с шагом в один год:

$$\Delta t_{s,y} = t_{s,y} - t_{s,y-1}, \quad y > 1955. \quad (1)$$

Эти разности приобретают смысл конечно-разностной производной температуры, если приписать им размерность °C/год. В соответствии с определением имеется отношение приращения

дискретной функции температуры к приращению дискретного аргумента, которое равно одному году. Разностные производные подавляют низкочастотные компоненты температуры и этим повышают вклад более быстрых процессов, балансирующих климатическую систему.

Разобьем ряд разностей (1) на два: положительные и отрицательные производные среднегодовой температуры, каждая из которых зависит от года и местоположения метеостанций:

$$\begin{aligned} \Delta t_{s,y} &= \Delta t_{s,y}^+ + \Delta t_{s,y}^-; \\ \Delta t_{s,y}^+ &= \Delta t_{s,y}, \text{ если } \Delta t_{s,y} > 0, \text{ иначе } 0; \\ \Delta t_{s,y}^- &= \Delta t_{s,y}, \text{ если } \Delta t_{s,y} < 0, \text{ иначе } 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Введем средние за период наблюдения положительные $ai_{s,y}$ и отрицательные $ao_{s,y}$ производные температуры. Они оцениваются путем применения скользящего временного окна

$$[y - \bar{\omega} \geq 1955, y] \quad (3)$$

шириной $\bar{\omega}$ следующим образом:

$$\begin{aligned} ai_{s,y} &= \frac{1}{\bar{\omega}} \sum_{j=y-\bar{\omega}}^y \Delta t_{s,j}^+; \\ ao_{s,y} &= \frac{1}{\bar{\omega}} \sum_{j=1-\bar{\omega}}^y \Delta t_{s,j}^-. \end{aligned} \quad (4)$$

Предполагаемая мера эмерджентных свойств реализуется в год y по переменной s как функционал

$$cma_y = \left| \text{corr}_s \{ ai_{s,y}; ao_{s,y} \} \right|. \quad (5)$$

Заметим, что мера (5) не зависит от нормирования на ширину $\bar{\omega}$, полезная информация содержится в суммах производных из (4), которые накапливаются за время наблюдения.

Выделим экстремумы процессов из (2), они характеризуют максимальные $mi_{s,y}$ и минимальные $mo_{s,y}$ производные среднегодовой температуры:

$$mi_{s,y} = \max_y (\Delta t_{s,y}) > 0; \quad mo_{s,y} = \min_y (\Delta t_{s,y}) < 0. \quad (6)$$

Экстремумы являются составной частью процессов и определяются на каждой метеостанции в скользящем окне (3) шириной $\bar{\omega}$; правый край окна соответствует году с индексом y . При таком определении экстремумов индекс y связан с индексом s ; это подразумевается, но специальные обозначения не вводятся.

Мера эмерджентных свойств климатической системы для экстремальных производных температуры определяется аналогичным (5) функционалом:

$$cme_y = \left| \text{corr}_s \{ mi_{s,y}; mo_{s,y} \} \right|. \quad (7)$$

В работе используются два размера окон. Окно с наибольшей шириной, которая равна 61 году и охватывает весь период наблюдений 1955–2016 гг.,

применено для оценки характеристик распределения производных среднегодовой температуры по континентам. Окно шириной 50 лет позволило получить при сдвиге 11 значений для исследуемых мер эмерджентных свойств (5), (7).

Распределение средних производных в период 1955–2016 гг.

Положим индекс y в (4) равным 2016 и обозначим средние значения положительных производных температур по всему интервалу наблюдений [1955, 2016] на станциях с номером s как ai_s , а отрицательных производных – как ao_s . В этом случае $\bar{\omega} = 61$ год. Распределение разностей и сумм этих величин на метеостанциях отображены на рис. 1, рассчитанные численные характеристики приведены в табл. 1 (цв. вкладка).

Средний диапазон изменения производных температур (2) на метеостанциях в интервале [1955, 2016] определяется разностью

$$ai_s - ao_s > 0, \quad (8)$$

отображенной на рис. 1, а. Эти величины глобально возрастают с широтой и усилением континентальности. В частности, они минимальны в районах, подверженных влиянию теплых течений – Гольфстрима, Куроисио и Аляскинского в его южной части. Иными словами, наибольший диапазон изменений производных температур реализуется на фоне низких среднегодовых температур на севере, и наоборот, наименьший диапазон реализуется в низких широтах на фоне высоких среднегодовых температур.

На рис. 1, б представлены суммы

$$ai_s + ao_s, \quad (9)$$

они показывают различия средних положительных и отрицательных производных температуры в интервале [1955, 2016] на метеостанции с номером s . Как следует из рис. 1, б, эти суммы положительны приблизительно на 90% метеостанций Северного полушария. Умеренные и высокие широты характеризуются преобладающими положительными значениями сумм (9) с максимумом на арктических станциях. Для значительного числа станций (410, табл. 1) характерны суммы (9) с небольшими положительными значениями, от 0 до 0,02 °С/год. Эти станции расположены главным образом в субтропических, тропических и субэкваториальных широтах, а также в зонах максимального влияния систем атлантического и тихоокеанского термоклиннов глобального океанского конвейера [17]: на восточном побережье Северной Америки, в прибрежной Европе, на Дальнем Востоке России и на восточноазиатских островах. Отрицательные и нулевые суммы $ai_s + ao_s$ наблюдаются на субарктических канадских станциях п-ова Лабрадор, станциях Дальнего Востока России и о-ва Сахалин, станциях среднегорья восточной Турции, средних гор Эфиопии и Пакистана.

Среднее значение суммы (9) $ai_s + ao_s$ в пересчете на 10 лет составило $\sim 0,29$ °С (табл. 2), что согласуется с известными оценками трендов глобальной температуры. Например, за период с конца 1970-х гг. по глобально осредненным данным температуры поверхности суши и океана вычислены значения линейного тренда: 0,12 °С/10 лет в [6], 0,16 °С/10 лет в [18], 0,22 °С/10 лет для умеренной зоны Северного полушария в [19].

Таблица 2

Характеристики распределений производных среднегодовых температур (9), (10) на метеостанциях с 1955 по 2016 г. в сравнении с нормальным законом. В скобках указан 95% доверительный интервал

| Характеристика распределения | $ai_s + ao_s$ | $mi_s + mo_s$ | Нормальное распределение |
|------------------------------|---------------|---------------|--------------------------|
| Объем выборки | 927 | 927 | — |
| Минимум, °С/год | -0,040 | -2,233 | $-\infty$ |
| Максимум, °С/год | 0,123 | 2,358 | $+\infty$ |
| Среднее, °С/год | 0,029 (1) | -0,029 (4) | 0 |
| СКО, °С/год | 0,020 | 0,564 | σ |
| Асимметрия | 0,854 | -0,014 | 0 |
| Экссесс | 2,072 | 1,073 | 0 |
| Диапазон $\pm \sigma$, % | 74,33 | 72,82 | 68,26 |
| Диапазон $\pm 2\sigma$, % | 94,39 | 94,82 | 95,44 |
| Диапазон $\pm 3\sigma$, % | 99,14 | 99,25 | 99,73 |

Установленные в работе характеристики выборочного распределения сумм производных среднегодовых температур (9) по континентам представлены в табл. 2. Можно убедиться, что распределение несимметрично со смещением, соответствующим потеплению. Значение асимметрии и эксцесса статистически значимы.

Представленные на рис. 1 и в табл. 1 новые оценки, как видно, не противоречат многочисленным наблюдениям [6, 17–21], а также существующим представлениям о географии климата, о современном глобальном потеплении и региональных особенностях его проявления и тем самым косвенно подтверждают корректность используемых данных и выполненных преобразований.

Распределение экстремумов производных температуры в период 1955–2016 гг.

В тех же условиях, что и при вычислении сумм (9), были рассчитаны суммы противоположных экстремумов производных среднегодовых температур

$$mi_s + mo_s \quad (10)$$

(индекс $y = 2016$ (6) опущен). Определены числовые характеристики выборочного распределения этой суммы. В табл. 2 приводится расчетная величина асимметрии, которая равна $-0,014$, и это значение статистически незначительно, чтобы считать распределение несимметричным. При этом среднее значение распределения $mi_s + mo_s$ равно $-0,029$ °С/год,

что по абсолютной величине на порядок меньше, чем среднее квадратичное отклонение $0,564\text{ }^\circ\text{C}/\text{год}$. Таким образом, распределение будет симметричным в пределе при увеличении объема выборки.

В диапазон $\pm\sigma$ распределения сумм экстремумов производных попадает на $\sim 5\%$ больше значений, нежели в случае нормального закона. В диапазонах $\pm 2\sigma$ и $\pm 3\sigma$ отличия от нормального закона на порядок меньше. Эксцесс распределения равен $1,073$, и эта величина статистически значима.

При таком выборочном распределении симметрично расположенные относительно нулевого среднего суммы максимальных и минимальных производных (10) на станции близки друг другу по абсолютной величине, а в окрестности среднего значения распределения (около нуля) близки по абсолютной величине сами противоположные и симметричные экстремумы производных среднегодовой температуры m_s и m_o . В силу значительного эксцесса таких близких экстремумов больше, чем это было бы при нормальном законе. Эти неизвестные ранее факты есть проявления механизма, поддерживающего климатическую систему в состоянии проточного равновесия.

Феноменология отдельных проявлений баланса энергий атмосферных процессов описана еще в работах Н. Dove [22]. Не исключено, что эмпирическое знание о смене необычно холодного времени года на необычно жаркое и наоборот является следствием этого баланса. Есть и другие примеры симметрии температурных характеристик. Например, авторы [23] выявили, что отклонения среднегодовой температуры от средней многолетней симметричны для двух типов лет: экстремально теплых и экстремально холодных. Кроме того, эти отклонения более значительны в регионах с низкими температурами, чем в регионах с высокими температурами.

Меры эмерджентных свойств в период 2006–2016 гг.

Приведенные на рис. 2 значения двух мер $ста_y$ (5) и $сте_y$ (7) для производных среднегодовых температур существенно отличаются друг от друга. С учетом доверительных интервалов мера $ста_y$ находится вблизи своего предельного значения (рис. 2, а); сила корреляционной связи, которую характеризует мера, очень высока по шкале Чеддока во всем интервале наблюдения. В этих условиях усиление входных потоков энергии опасно, оно повысит внутреннюю энергию климатической системы и, возможно, приблизит ее в фазовом пространстве к области бифуркаций, в результате вероятен переход системы в иное качественное состояние. Однако в исследуемый период диапазон значений меры не меняется (рис. 2, а) и система, по всей видимости, сохраняет проточное равновесие, хотя региональная неустойчивость климата усиливается [6], что характерно для системы, находящейся вблизи области бифуркаций.

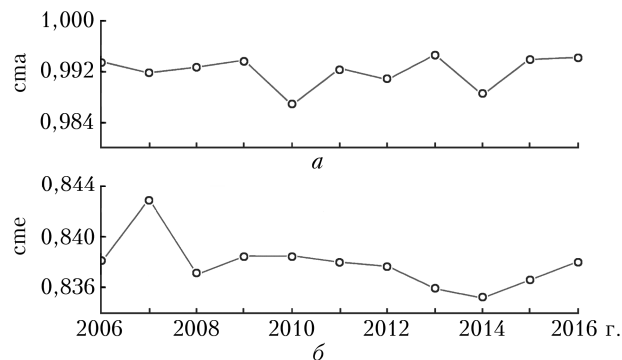


Рис. 2. Оценки мер эмерджентных свойств: а – $ста_y$ (5); б – $сте_y$ (7). Максимальный доверительный интервал для $ста_y$ составляет $3,5 \cdot 10^{-4}$, для $сте_y$ – $2,6 \cdot 10^{-3}$, размер выборки равен 927, доверительная вероятность – 0,99. Все значения рассчитываются с использованием скользящих окон (3) шириной $\bar{\omega} = 50$ лет с шагом в один год

На рис. 2 видно, что значения меры $ста_y$ больше, чем меры $сте_y$. Мера $ста_y$ характеризует процессы с большей энергией, нежели мера $сте_y$, по их определению (5), (7). Среди прочих есть интересное объяснение этого факта, оно следует из имманентной саморегуляции климатической системы: гипотетически чем больше входная энергия, тем сильнее она рассеивается. Иначе несбалансированные доли энергии могут быть настолько большими, что нарушат структуру самой системы еще на предыдущих этапах ее эволюции. Однако этот вопрос требует дополнительных исследований.

Заключение

Утверждение о существовании климатической системы требует определения ее эмерджентных свойств, на основе которых только и возможно эффективное изучение сложных систем. В первую очередь необходимо выявление механизмов, обеспечивающих устойчивость системы, для последующего концептуального предвидения.

Среднегодовые температуры, полученные по данным 927 метеостанций Северного полушария, изучались с 1955 по 2016 г. Даны определения, введены новые характеристики, впервые установлены некоторые закономерности, присущие климатической системе.

В качестве эмерджентного свойства климатической системы выбрана ее изменчивость. Для оценки изменчивости впервые введена мера эмерджентных свойств как функционал от корреляции положительных и отрицательных производных среднегодовой температуры на метеостанциях.

Получены оценки распределения сумм противоположных экстремумов производных среднегодовой температуры, оно симметрично относительно нулевого среднего и резче, чем нормальное.

В исследуемый период значения меры эмерджентных свойств находятся вблизи своих предельных значений, при этом еще сохраняется проточное равновесие, как это следует из данных наблюдений.

Вычисление меры эмерджентных свойств для среднегодовых температур один раз в год должно быть элементом мониторинга состояния целостной климатической системы.

Циклические движения есть характерное свойство внешнего воздействия, поэтому установленные закономерности будут сохраняться вместе с состоянием проточного равновесия.

Работа выполнена при финансовой поддержке РАН в рамках государственного задания Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН.

1. Пригожин И. Введение в термодинамику неравновесных процессов. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 127 с.
2. Бергаланфи Л. фон. Общая теория систем – критический обзор. Исследования по общей теории систем: Сб. переводов. М.: Прогресс, 1969. С. 23–82.
3. Шерстюков Б.Г. О возможном резонансном механизме колебаний климата // Тр. ВНИИГМИ-МЦД. 2018. Вып. 181. С. 52–70.
4. Шерстюков Б.Г. Резонансы в Солнечной системе и в колебаниях климата // Сложные системы. 2018. Вып. 28, № 3. С. 31–48.
5. Бялко А.В., Ваганова Н.И., Руманов Э.Н. О возможной климатической неустойчивости // Докл. РАН. 2010. Т. 431, № 5. С. 617–620.
6. Изменения климата, 2013 г.: Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / под ред. Т.Ф. Стоккер, Д. Цинь, Д.-К. Платтнер, М.Б. Тигнор, С.К. Аллен, Д. Бошунг, А. Науэлс, Ю. Ся, В. Бекс, П.М. Мидглей. Кембридж, Соединенное Королевство и Нью-Йорк, США: Изд-во Кембриджского ун-та, 2013. 22 с.
7. *Climate Variability and Extremes during the Past 100 Years* / (eds.) S. Brönnimann, T. Ewen, J. Luterbacher, H.F. Diaz, R.S. Stolarski and U. Neu. Dordrecht: Springer, 2008. 36 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-6766-2.
8. Simol C., Brunetti M., Mauget M., Nanni T. Evolution of extreme temperatures in a warming climate // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. P. L16701. DOI: 10.1029/2011GL048437.
9. Rahmstorf S., Coumou D. Increase of extreme events in a warming world // *PNAS, Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2011. V. 108, iss. 44. P. 17905–17909. DOI: 10.1073/pnas.1101766108.
10. Donat M.G., Alexander L.V., Yang H., Durre I., Vose R., Dunn R.J.H., Willett K.M., Aguilar E., Brunet M., Caesar J., Hewitson B., Jack C., Klein Tank A.M.G., Kruger A.C., Marengo J., Peterson T.C., Renom M., Oria Rojas C., Rusticucci M., Salinger J., Elrayah A.S., Sekele S.S., Srivastava A.K., Trewin B., Villarreal C., Vincent L.A., Zhai P., Zhang X., Kitching S. Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the

- beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. V. 118. P. 2098–2118. DOI: 10.1002/jgrd.50150.
11. Papalexiou S.M., AghaKouchak A., Trenberth K.E., Foufoula-Georgiou E. Global, regional, and megacity trends in the highest temperature of the year: Diagnostics and evidence for accelerating trends // *Earth's Future.* 2018. V. 6. P. 71–79. DOI: 10.1002/2017EF000709.
 12. Корольков Б.П. Термодинамические основы самоорганизации: монография. Иркутск: ИрГУПС, 2011. 120 с.
 13. Архив Университета Восточной Англии [Электронный ресурс]. URL: <http://metoffice.gov.uk>, <http://cru.uea.ac.uk> (дата обращения: 1.08.2020).
 14. Jones P.D., Lister D.H., Osborn T.J., Harpham C., Salmon M., Morice C.P. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010 // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117, iss. D5. P. D05127. DOI: 10.1029/2011JD017139.
 15. Harris I., Osborn T.J., Jones P., Lister D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset *Sci. Data* 7 109 [Electronic resource]. URL: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3> (last access: 1.08.2020).
 16. Osborn T.J., Jones P.D. The CRUTEM4 land-surface air temperature data set: Construction, previous versions, and dissemination via Google Earth // *Sci. Data.* 2014. V. 6. P. 61–68. DOI: 10.5194/essd-6-61-2014.
 17. Кошляков М.Н., Тараканов Р.Ю. Перенос воды через Субантарктический фронт и глобальный океанский конвейер // *Океанология.* 2011. Т. 51, № 5. С. 773–787.
 18. Vose R.S., Andt D., Banzon V.F., Easterling D.R., Gleason B., Huang B., Kearns E., Lawrimore J.H., Matthew J.M., Peterson T.C., Reynolds R.W., Smith T.M., Williams C.N. Jr., Wuertz D.B. NOAA's merged land–Ocean surface temperature analysis // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2012. V. 93. P. 1677–1685. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00241.1.
 19. Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М. Изменения приземной температуры воздуха Северного полушария за период 1850–2014 гг. // Уч. запис. Казанского ун-та. 2015. Т. 157, кн. 3. С. 8–19.
 20. Алексеев Г.В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // *ФПК.* 2015. Т. 1. С. 11–26.
 21. Walsh J.E. Intensified warming of the Arctic: Causes and impacts on middle latitudes // *Glob. Plan. Change.* 2014. V. 117. P. 52–63. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2014.03.003.
 22. Dove H.W. Die Verbreitung der Wärme auf der Oberfläche der Erde: Erläutert durch Isothermen, thermische Isanomalen und Temperaturcurven. Berlin: Verlag for Dietrich Reimer, 1852.
 23. Ye J.-Sh., Gong Y.H., Zhang F., Ren J., Bai X.-K., Zheng Y. Which temperature and precipitation extremes best explain the variation of warm versus cold years and wet versus dry years? // *J. Clim.* 2018. V. 31. P. 45–59. DOI: 10.1175/JCLI-D-17-0377.1.

V.A. Tartakovsky, N.N. Cheredko, V.G. Maksimov. Emergent properties of the climate system.

The average annual temperature derivatives are analyzed based on the data of 927 weather stations of the Northern Hemisphere for the period 1955–2016. Changes in the derivatives are considered as manifestations of the emergent property of a holistic climate system. A measure of these manifestations is introduced. The measure has a functional form, which includes averaging of positive and negative derivatives and calculation of the correlation coefficients between the weather stations. The extrema of the derivative temperatures are determined; it is found that the sample distribution of the sums of the opposite extrema of the derivatives is symmetric and has a greater kurtosis than the normal distribution. In the period under study, the values of the measure are already close to their limiting values. At that, the climate system equilibrium state is preserved, while regional fluctuations of individual climate elements have increased. Therefore, an annual assessment of changes in the multichannel monitoring system measure of emergent properties is required.

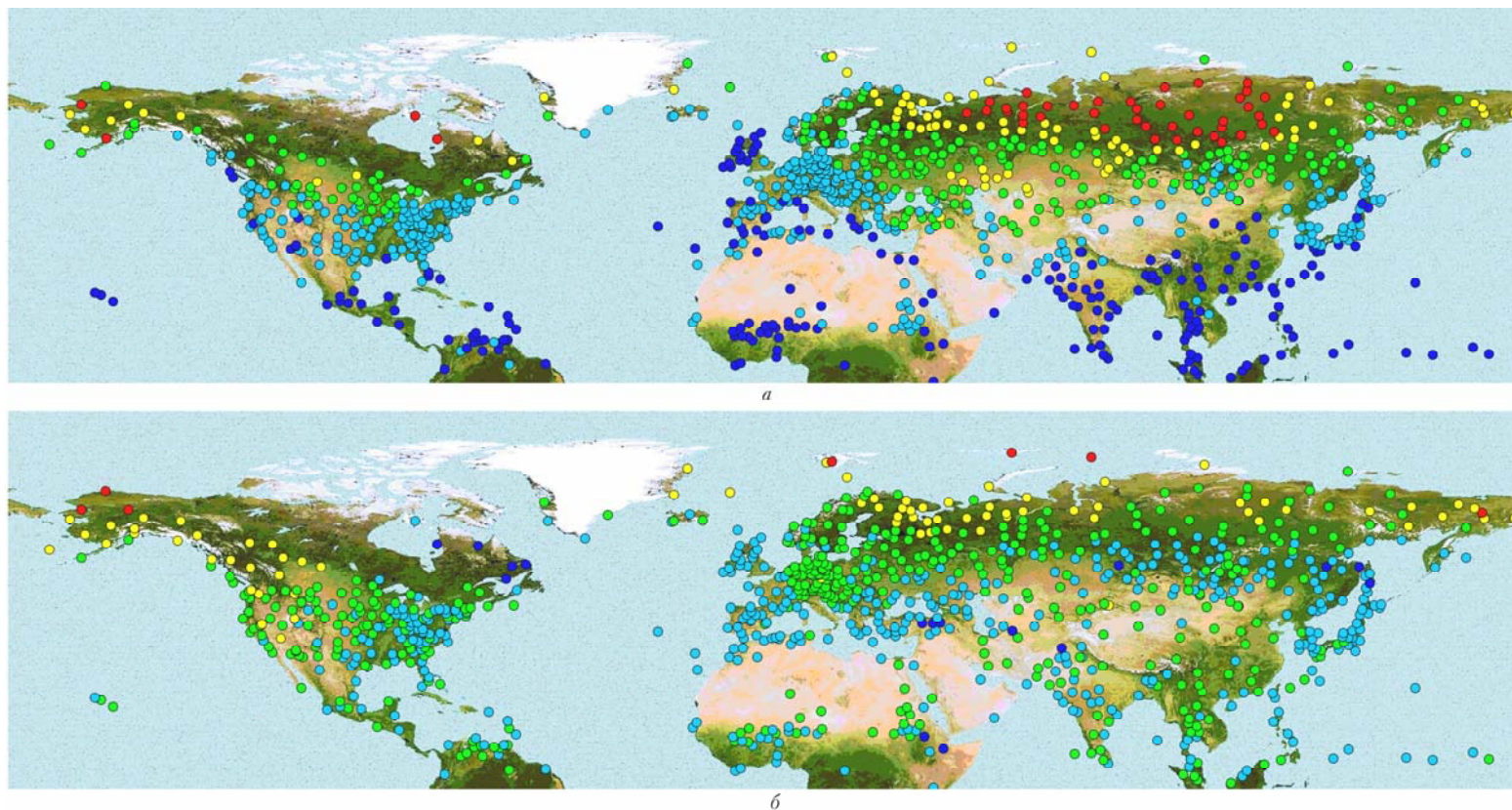


Рис. 1. Распределение производных среднегодовых температур на метеостанциях в °С/год, интервал наблюдений 1955–2016 гг.: *a* – $a_i - a_o$ (8); *b* – $a_i + a_o$ (9). В табл. 1 представлены значения характеристик распределения

Таблица 1

Цветовая шкала, количество метеостанций в цветовом интервале шкалы и значения производных на рис. 1 в центре интервала

| Рисунок | Цветовые интервалы | Blue | Cyan | Green | Yellow | Red |
|----------|-------------------------------------|--------|-------|-------|--------|-------|
| <i>a</i> | Значения в центре интервала, °С/год | 0,329 | 0,647 | 0,966 | 1,284 | 1,603 |
| | Количество станций в интервале | 212 | 370 | 219 | 82 | 44 |
| <i>b</i> | Значения в центре интервала, °С/год | -0,023 | 0,009 | 0,042 | 0,074 | 0,107 |
| | Количество станций в интервале | 16 | 410 | 417 | 77 | 7 |