

УДК 551.588

**ДЕКОМПОЗИЦИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ СЕВЕРНОГО  
ПОЛУШАРИЯ ЗЕМЛИ:  
2. ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН НАИБОЛЬШЕЙ ДЕСТАБИЛИЗАЦИИ КЛИМАТА**

**Кирста Ю.Б., Курепина Н.Ю., Ловцкая О.В.**

*ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН», Барнаул,  
Россия, e-mail: kirsta@iwep.ru*

С помощью метода пространственной кластеризации континентальных метеорологических полей для континентов Евразия, Африка и Северная Америка выделены два типа пространственных кластеров – с относительно устойчивым и дестабилизированным климатом. Первый тип формируется при стабилизирующем влиянии естественной растительности, а второй – при наличии интенсивной хозяйственной деятельности человека.

**Ключевые слова:** метеорологические поля, региональный климат, температура, осадки, кластеризация, резонанс, растительность, антропогенная деятельность, Северное полушарие

**DECOMPOSITION OF METEOROLOGICAL FIELDS IN THE NORTHERN  
HEMISPHERE: 2. DETERMINATION OF ZONES OF MAXIMUM CLIMATE  
DESTABILIZATION**

**Kirsta Y.B., Kurepina N.Y., Lovtskaya O.V.**

*Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Barnaul, e-mail: kirsta@iwep.ru*

Using the method of spatial clustering of continental meteorological fields for Eurasia, Africa and North America, two types of spatial clusters (with relatively stable and destabilized climate) were defined. The first type is formed at the stabilizing influence of natural vegetation, whereas the second – as a result of intensive economical activities.

**Keywords:** meteorological fields, region's climate, temperature, precipitation, clustering, resonance, vegetation, human activities, the Northern Hemisphere

Большинство исследователей, работающих в области климатологии, не рассматривают атмосферу как контролирующую растительностью систему потоков вещества и энергии. В то же время, именно биотическая регуляция климата обеспечивает стабильность приземных температур воздуха и круговорота воды на Земле, причем в отсутствие такой регуляции атмосфера будет иметь только два устойчивых состояния с температурами порядка  $+400^{\circ}\text{C}$  и  $-80^{\circ}\text{C}$  [5]. Разработанный нами метод пространственной кластеризации континентальных метеорологических полей основан на системно-иерархическом анализе эволюционно выработанной системы человек-растительность-атмосфера и представлен в первой части данного исследования [2]. Выполняемый с помощью данного метода анализ межгодовой динамики приземных температур воздуха и осадков позволяет выделить территории с наибольшими отклонениями от эволюционно выработанных статистических закономерностей этих факторов. Отклонения оцениваются с помощью информационно-статистических показателей, отражающих региональное резонансное влияние на климат растительности и человеческого общества как ритмически функционирующих систем.

**Материалы и методы исследования**

Для декомпозиции континентальных метеорологических полей по их региональной ритмике нами используются первичные климатические наблюдения за температурами воздуха и осадками, представленные в созданной агрометеорологической группой FAO базе климатических данных FAOCLIM-2 [8]. Используемые данные охватили около 6000 метеостанций Северного полушария Земли. Расчет поля осадков выполнялся по 1847 метеостанциям для Евразии, 1378 – Африки и 2622 – Северной Америки; а поля температур воздуха по 969 метеостанциям Евразии, 99 – Африки и 1768 – Северной Америки. При этом метеорологические поля Африки не разделялись по полушариям и рассматривались для континента в целом. В совокупности использовалось порядка 300000 первичных данных о годовых суммах осадков и 150000 – о среднегодовых температурах воздуха. Методика подготовки и обработки метеорологических данных подробно охарактеризована в первой части работы [2].

Метод исследований изложен в [2]. В его рамках предложены информационно-статистические показатели, характеризующие повторяемые особенности многолетней динамики климатических факторов. Имея многолетние ряды годовых климатических данных, мы выделяем отдельные серии относительного изменения характеристик с последовательно возрастающими или убывающими значениями. При этом каждому году в таких сериях присваивается собственный порядковый номер 1, 2, 3, 4, ..., который назван тенденцией.

Первый показатель рассчитывается как нормированная информация Шеннона [1]:

$$K_1 = - \frac{\left( \sum_{k=1}^l p_k \times \ln p_k \right)}{\ln l}, \quad (1)$$

где  $l$  – максимальный номер у имеющихся в анализируемом ряде тенденций  $k = 1, 2, 3, 4, \dots$ ;  $p_k$  – вероятность появления в ряде (доля) лет с тенденцией  $k$ ,  $\sum_{k=1}^l p_k = 1$ .

Расчет показателя  $K_2$  ведется по двум элементам: (а) средней продолжительности периодов нарастания/убывания климатической характеристики и (б) 33-летней продолжительности фаз векового цикла. Здесь также используется нормированная информация Шеннона:

$$K_2 = - \frac{\left( \sum_{k=1}^2 p_k \times \ln p_k \right)}{\ln 2}, \quad (2)$$

где  $k$  – номер элемента,  $k=1, 2$ ;  $p_k$  – долевой вклад элемента  $k$  в сумме элементов, то есть в сумме двух указанных продолжительностей (а) и (б),  $\sum_{k=1}^2 p_k = 1$ .

Для выделения территорий с наибольшими отклонениями от эволюционно выработанного нормального статистического распределения температур и осадков нами использовались абсолютные отклонения показателей  $K_1$  и  $K_2$  от теоретически требуемых значений 0,618 и 0,297:

$$DK_1 = |K_1 - 0,618|, DK_2 = |K_2 - 0,297|. \quad (3)$$

При пространственной кластеризации метеорологических полей одновременно с  $K_1$  и  $K_2$  использовались еще два показателя  $K_3$ ,  $K_4$ , характеризующие расположение метеостанций на континенте. Их привлечение позволило отразить пространственно-временную связность метеорологических факторов и адекватно учесть региональное единообразие/синхронизм динамики метеорологических полей.

Метеорологические поля исследуемой территории визуализировались с помощью ГИС-платформы ESRI ArcGIS Desktop 10.1 в конфигурации ArcEditor.

## Результаты исследования и их обсуждение

Средние значения показателей  $K_1$  и  $K_2$  и их среднеквадратичные (стандартные) отклонения для каждого из трех исследуемых континентов Северного полушария Земли приведены в табл. 1. Мы видим, что все показатели оказались сдвинутыми в большие значения относительно теоретически требуемых величин 0,618 и 0,297, отвечающих поддерживаемому растительностью нормальному статистическому распределению годовых осадков и среднегодовых значений температур воздуха [1, 6]. Это означает многолетнее антропогенное изменение на всех континентах естественной динамики метеорологических полей с увеличением числа больших тенденций. Иначе говоря, увеличивается длительность, а значит, и амплитуда многолетних колебаний метеорологических факторов, что, в свою очередь, ведет к повышению вероятности экстремальных климатических явлений.

Для показателей  $K_1$  и  $K_2$  3% погрешность расчетов [2] составляет  $0,618 \times 0,03 = 0,019$  и  $0,297 \times 0,03 = 0,009$  соответственно. Приведенные в табл. 1 средние стандартные отклонения для осадков и температур воздуха эту погрешность заметно превышают, то есть мы имеем значительное количество метеостанций с  $K_1$  и  $K_2$ , значимо отличающихся от их теоретических значений 0,618 и 0,297. Это позволяет выполнить пространственную кластеризацию полей и выделить зоны наибольшей дестабилизации климата. Очевидно, нам целесообразнее использовать более стабильный показатель  $K_2$ , стандартные отклонения которого составляют меньшую долю от его значений по сравнению с  $K_1$ .

Таблица 1

Средние значения показателей  $K_1$  и  $K_2$  по (1) и (2) для метеорологических полей осадков и температур Евразии, Африки и Северной Америки\*

Метеорологическая характеристика	Показатель	Евразия	Африка	Северная Америка
Осадки	K1	0,625 (0,075)	0,640 (0,080)	0,619 (0,075)
	K2	0,305 (0,016)	0,307 (0,020)	0,304 (0,015)
Температуры воздуха	K1	0,644 (0,080)	0,661 (0,077)	0,628 (0,076)
	K2	0,311 (0,018)	0,308 (0,016)	0,306 (0,014)

\* Значения  $K_1$  и  $K_2$  приводятся с указанием в скобках стандартного отклонения.

На рис. 1-5 и в табл. 2 представлены результаты пространственной кластеризации метеорологических полей осадков и температур воздуха. Во всех случаях, как указано выше, задавалось четыре кластера. Из рисунков в целом видно, что при получен-

ной детализации метеорологических полей, определяемой количеством используемых метеостанций и числом выделяемых кластеров, расположение последних слабо связано с климатическими зонами, ландшафтом земной поверхности или крупными водотоками.

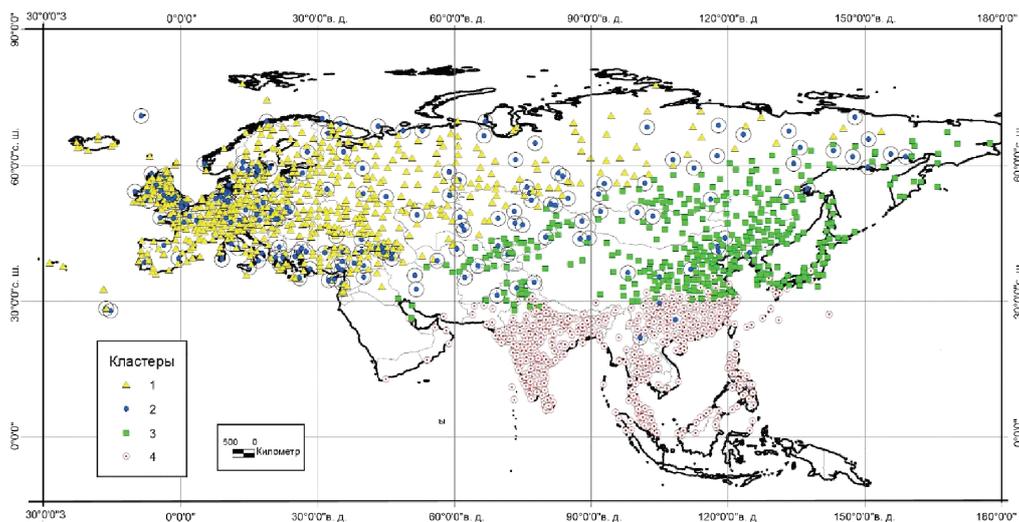


Рис. 1. Кластеризация осадков Евразии

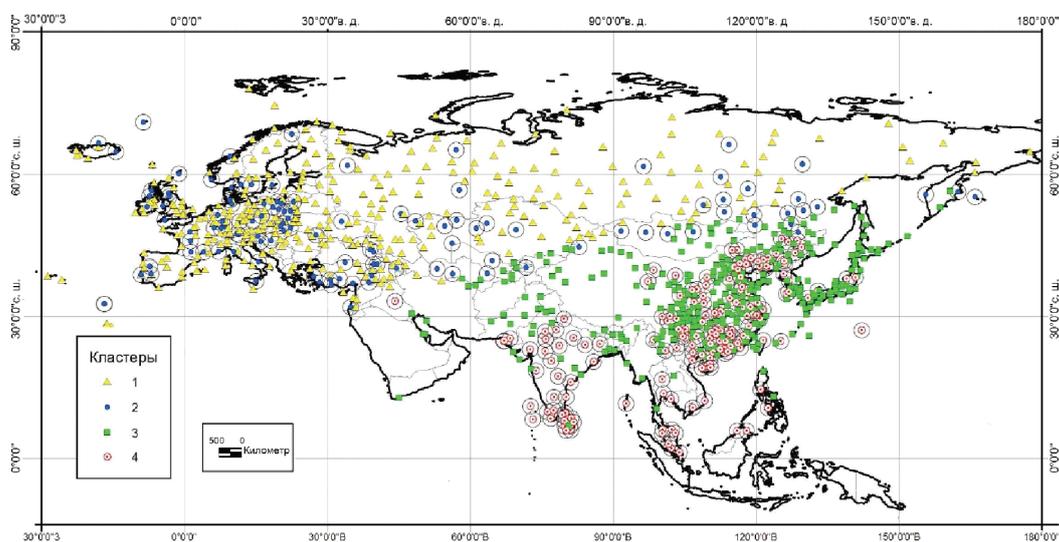


Рис. 2. Кластеризация температур Евразии

а

б

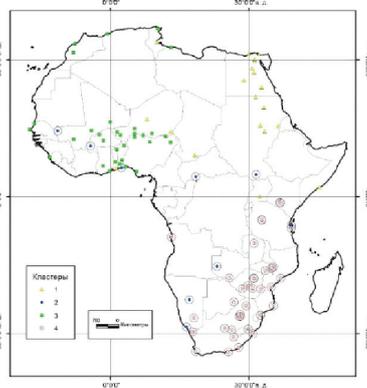
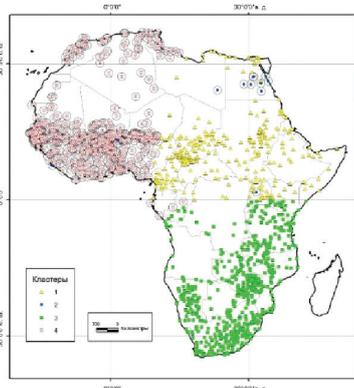


Рис. 3. Кластеризация осадков (а) и температур (б) Африки

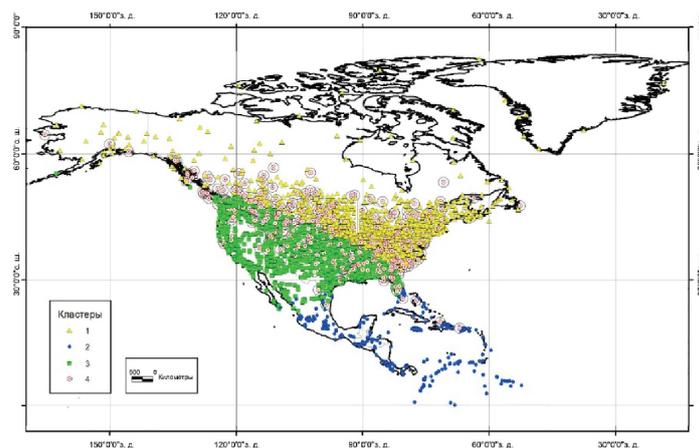


Рис. 4. Кластеризация осадков Северной Америки

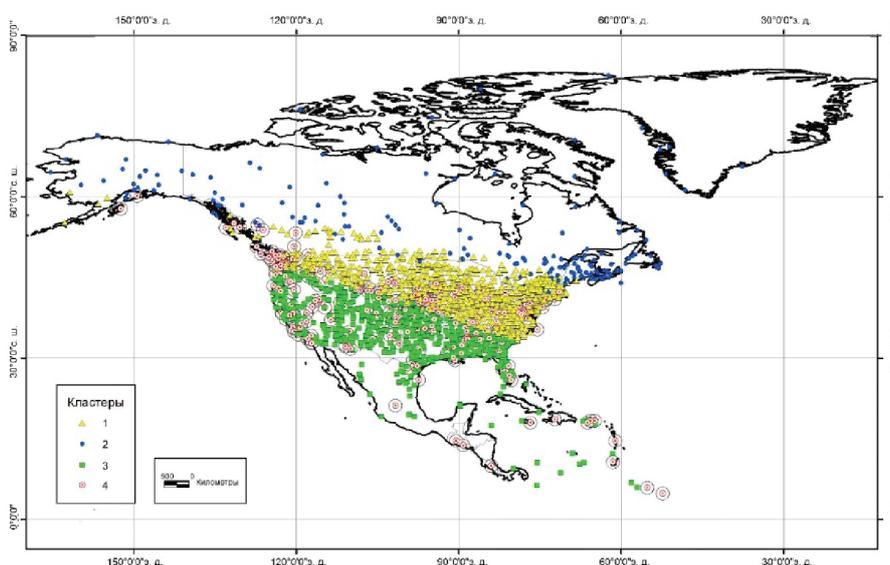


Рис. 5. Кластеризация температур Северной Америки

Таблица 2

Средние значения показателей  $K_1$  и  $K_2$  по (1) и (2) для выделенных кластеров метеорологических полей Северного полушария Земли

Континент	Метеорологическая характеристика	Показатель	Пространственный кластер			
			1	2	3	4
Евразия	Осадки	$K_1$	0,622	0,616	0,674	0,625
		$K_2$	0,304	0,304	0,318	0,301
	Температуры воздуха	$K_1$	0,613	0,697	0,636	0,693
		$K_2$	0,304	0,331	0,306	<b>0,320</b>
Африка	Осадки	$K_1$	0,812	0,636	0,638	0,643
		$K_2$	0,420	0,306	0,304	0,307
	Температуры воздуха	$K_1$	0,629	0,661	0,727	0,683
		$K_2$	0,304	0,307	0,333	0,302
Северная Америка	Осадки	$K_1$	0,610	0,651	0,610	0,636
		$K_2$	0,301	0,304	0,302	0,314
	Температуры воздуха	$K_1$	0,649	0,615	0,629	0,652
		$K_2$	0,324	0,301	0,304	0,305

Для того чтобы отделить кластеры дестабилизированного климата от остальных, был оценен уровень достоверного превышения показателем  $K_2$  теоретического значения 0,297. С учетом 3% погрешности расчета  $K_2$  этот уровень составил:

$$0,297 + 0,297 \times 0,03 = 0,306.$$

На рис. 1-5 все метеостанции, относящиеся к кластерам со значениями  $K_2 > 0,306$  обведены дополнительной окружностью большего размера, а в табл. 2 эти значения показаны жирным шрифтом. Данные пространственные кластеры и будут отвечать зонам дестабилизации климата.

В соответствии с теоретическими представлениями об иерархически организованной климатической ритмике [1, 6], межгодовая динамика осадков и температур формируется на иерархическом уровне с 99-летним циклом функционирования, известным также как вековой климатический цикл. В образовании такого уровня может участвовать как естественная растительность, так и человек. Поэтому выделенные кластеры обусловлены воздействием на климатические процессы или естественных наземных экосистем, или антропогенных систем. Поскольку естественная растительность эволюционно приспособлена к более значительным изменениям климата по сравнению с современными, то она должна сохранять на своей территории нормальное распределение годовых значений температур и осадков, характеризующееся показателями  $K_1 = 0,618$  и  $K_2 = 0,297$ . Отсюда следует, что именно деятельность человека приводит к дестабилизации климата на континентах.

Последний вывод подтверждается расположением кластеров дестабилизированного климата (рис. 1-5). На всех трех континентах, Евразия, Африка и Северная Америка, данные кластеры осадков и температур приурочены к территориям с развитыми сельским хозяйством и/или промышленностью [3]. Например, в Евразии (рис. 1-2) они находятся в пределах границ Западной Европы и бывшего СССР, обеспечивших на протяжении XX века интенсивное развитие своего сельского хозяйства, промышленности и добычи полезных ископаемых. Еще один кластер для температур находится в Юго-Восточной Азии, характеризующейся в XX веке быстрым ростом численности населения. Следует указать, что температурное поле самой западной островной части Европы и южных островных частей Юго-Восточной Азии (рис. 2) и Центральной Америки (рис. 5) в значительной степени зависит от теплообмена между океаном и атмосферой. Для него ха-

рактерны многолетние колебания температуры воздуха из-за большой теплоемкости вовлеченных в теплообмен водных масс, в том числе теплых океанических течений [4]. Это приводит к увеличению вклада больших тенденций и росту показателей  $K_1$  и  $K_2$ , что и отражено на рисунках как дестабилизация континентального температурного поля.

Отличительной особенностью зон дестабилизированного климата (за исключением случая Африки, рассматриваемого ниже) является их пространственное совмещение с кластерами, имеющими статистическое распределение метеорологических характеристик, близкое к нормальному. Это объясняется тем, что в данных зонах присутствует естественная растительность, поддерживающая такое распределение.

Полученное совмещение нормального и нарушенного распределений метеорологических характеристик на одной территории (рис. 1-5) означает, что одновременно с нарушением многолетней динамики климатических процессов будет дестабилизирован еще и внутригодовой ход метеорологических процессов. Например, если две соседние метеостанции принадлежат разным кластерам, то на одной из них очередной год может оказаться более засушливым, а на другой – наоборот более влажным по сравнению с предыдущим годом. Подобная разбалансировка внутригодового хода метеорологических процессов на одной территории, очевидно, приводит к дополнительному увеличению числа экстремальных климатических событий, что и наблюдается в соответствующих регионах в последние десятилетия.

Для Африки роль растительности как естественного «биологического насоса», перекачивающего океаническую влагу вглубь континента [7], менее значительна по сравнению с Евразией и Северной Америкой. Наряду с особенностями глобальной атмосферной циркуляцией это привело к появлению на континенте обширных пустынных территорий. Неэффективность указанного «биологического насоса» обусловило также слабую пространственно-временную связность поля осадков и, тем самым, раздельное расположение выделенных пространственных кластеров (рис. 3а). Аналогичная ситуация, видимо, имеет место и для поля температур воздуха, надлежащая декомпозиция которого затруднена из-за небольшого числа метеостанций (рис. 3б).

Отметим, что для Северной Америки между 30° и 50° с.ш. (рис. 4-5) мы получили выраженную, одинаковую для температур и осадков границу у пространственных кластеров относительно ненарушенного

климата. Эта граница, видимо, связана со средним положением полярного климатологического фронта за рассматриваемый 150-летний период.

### Выводы

Проанализирована многолетняя ритмика температур воздуха и осадков на континентах Северного полушария Земли. С помощью метода пространственной кластеризации выделены территории наибольшей дестабилизации климата, характеризующиеся наибольшими отклонениями от эволюционно выработанных статистических закономерностей указанной ритмики. Дестабилизация климата может сопровождаться разбалансировкой внутригодового хода метеорологических процессов с увеличением числа экстремальных климатических событий.

Декомпозиция метеорологических полей на зоны с относительно устойчивым и дестабилизированным климатом отражает преимущественное влияние в этих зонах естественной растительности или интенсивной промышленной и сельскохозяйственной деятельностью человека соответственно.

---

*Работа выполнена в рамках междисциплинарного интеграционного проекта № 70 фундаментальных исследований СО РАН на 2012-2014 гг. и Государственного задания по проекту VIII.76.1.4.*

### Список литературы

1. Кирста Ю.Б., Кирста Б.Ю. Информационно-физический закон построения эволюционных систем. Системно-аналитическое моделирование экосистем. – Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2009. – 270 с.
2. Кирста Ю.Б., Курепина Н.Ю., Ловцкая О.В. Декомпозиция метеорологических полей Северного полушария Земли: 1. Метод пространственной кластеризации континентальных метеорологических полей // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014.
3. Учебный атлас мира: атлас. 3-е изд.– М.: ГУГН, 1980. – 180 с.
4. Шерстюков Б.Г., Салугашвили Р.С. Роль океана в колебаниях климата атмосферы // Использование средств и ресурсов Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане для информационного обеспечения морской деятельности в Российской Федерации: материалы конф. ЕСИМО-2012. 24-28 сент. 2012 г. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. – С. 322-332.
5. Gorshkov V. G., Gorshkov V. V., Makarieva A. M. Biotic Regulation of the Environment: Key Issue of Global Change. – Berlin: Springer, 2000. – 367 pp. – (Springer-Praxis Series in Environmental Sciences).
6. Kirsta Y.B., Kirsta V.Y. Information-hierarchical organization of natural systems II: Futures of Man-Biosphere Interactions and Climate Control // World Futures. – 2010. – Vol. 66 (8). – P. 537–556.
7. Makarieva A.M., Gorshkov V.G. Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land // Hydrol. Earth Syst. Sci. – 2007. – Vol. 11. – P. 1013–1033.
8. FAOCLIM: Agroclimatic database and software – Rome, Italy: FAO, 2002. URL: <http://freegeographytools.com/2007/fao-world-climate-data> (дата обращения: 21.09.2012).