

УДК 551.588

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЕВРАЗИИ: РАЗДЕЛЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И АНТРОПОГЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

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

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

Разработан метод пространственной кластеризации континентальных метеорологических полей, основанный на различиях их многолетней ритмики. Метод позволяет разделить воздействия растительности и антропогенной деятельности на межгодовую динамику приземных температур воздуха и осадков. Для этого предложены информационно-статистические показатели, характеризующие региональное резонансное влияние на климат экосистем наземной растительности и человеческого общества как ритмически функционирующих систем. Расчет показателей ведется для 2000 метеостанций Евразии по 100000 годовых сумм осадков и 50000 среднегодовых температур за 150-летний период с середины 19-го по конец 20-го века. Выделенные пространственные кластеры метеорологических полей Евразии отвечают разным климатическим ритмам, формирующимся под влиянием растительности и специфической хозяйственной деятельности соответственно христианских, исламских и буддийских территориальных конгломератов.

Ключевые слова: климат, метеорологические поля, кластеризация, температура, осадки, растительность, антропогенная деятельность, Евразия

SPATIAL DECOMPOSITION OF METEOROLOGICAL FIELDS OF EURASIA: SEPARATION OF EFFECTS OF VEGETATION AND ANTHROPOGENIC ACTIVITY

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

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

A method of spatial clustering of continental meteorological fields based on their long-term rhythmic differences is developed. The method allows to separate the effects of vegetation and anthropogenic activity on interannual dynamics of surface air temperature and precipitation. For this purpose, the information-statistical indicators characterizing regional resonant effect on the climate of terrestrial vegetation ecosystems and human society as rhythmically functioning systems are proposed. To calculate the indicators for 2000 weather stations, 100000 data on annual precipitation and 50000 data on average annual temperatures over 150 year period from mid XIX up to end XX are used. The specified spatial clusters of meteorological fields of Eurasia comply with different climatic rhythms formed under the influence of vegetation and specific economic activity of Christian, Islamic and Buddhist territorial conglomerates.

Keywords: climate, meteorological fields, clustering, temperature, precipitation, vegetation, anthropogenic activity, Eurasia

Анализ и прогноз региональных проявлений глобальных климатических изменений представляют собой фундаментальную проблему современной климатологии. Ее важным аспектом являются вариации климата, вызванные внешними, в том числе антропогенными воздействиями на атмосферу периодического и квазипериодического характера.

На Земле имеются две крупнейшие иерархически организованные системы – растительность и человеческое общество, которые не только зависят от атмосферных процессов, но и воздействуют на них [7, 13]. Например, растительность влияет на влажность приземного слоя атмосферы и обеспечивает проникновение влаги океанов вглубь континентов в качестве «биологического насоса» [14]. Многолетние сукцессионные смены у экосистем наземной растительности ритмически изменяют отражательную способность растительного покрова, а значит, и альбедо подстилающей поверхности Земли. Это ведет к долгопе-

риодным изменениям теплового баланса атмосферы, равно как температуры приземного слоя воздуха и осадков [7, 9]. В свою очередь человек изменяет альбедо земной поверхности при распашке почв, а значит, и теплообмен этой поверхности с атмосферой. К регулярным вариациям этого альбедо ведут многолетние севообороты сельскохозяйственных полей, осуществляемые для поддержания плодородия почв. В результате развития промышленности возрастает выброс в атмосферу аэрозолей и парниковых газов, ведущих к постоянному сдвигу теплового баланса атмосферы с сопутствующими долгопериодными изменениями метеорологических характеристик.

В целом воздействия на атмосферу регулярно меняющихся условий подстилающей поверхности можно охарактеризовать с физической точки зрения как вынужденные колебания и параметрический резонанс динамических систем. Например, растительность, переносящая в качестве

«биологического насоса» океаническую влагу вглубь континентов [14], при каком-либо увеличении (уменьшении) осадков обеспечивает себе на следующий год лучшее (худшее) развитие через изменение количества образующихся в текущем году почек и семян. Это, очевидно, приводит к еще более (менее) эффективному переносу влаги на следующий год. Такая положительная обратная связь должна формировать последовательное нарастание (убывание) осадков на протяжении ряда лет и образование у растений «волн жизни», которые хорошо известны в экологии.

Попытки оценить единообразие/синхронизм динамики метеорологических полей на больших территориях были начаты еще в середине прошлого столетия [1–2] и продолжаются до настоящего времени. Выполненные нами исследования позволили обнаружить такой синхронизм [5, 7, 12]. При этом показана неадекватность традиционного описания многолетних изменений температур воздуха и осадков через ежегодное увеличение/уменьшение их месячных значений на постоянную величину нарастающим итогом. Изменения температур и осадков следует характеризовать в процентах от их среднемноголетних месячных значений. Тогда многолетняя динамика метеорологических характеристик оказывается единообразной во времени на больших пространствах и слабо зависящей как от орографической, так и климатической неоднородности территории.

Цель исследования. Настоящая работа направлена на решение проблемы разделения двух воздействий на климат, определяемых крупными экосистемами растительности и деятельностью человека.

Материалы и методы исследования

Исходные данные. Для пространственной кластеризации континентальных метеорологических полей целесообразно использовать первичные климатические наблюдения, а не данные реанализа, который искажает результаты наблюдений в процессе их интерполяции. Учитывая это, для проводимых оценок многолетней ритмики температур воздуха и осадков была взята база климатических данных FAOCLIM-2, созданная агрометеорологической группой FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) [11]. Охватываемый базой период наблюдений составлял порядка 150 лет, с середины 19-го по конец 20-го века.

Дополнительная проверка базы FAOCLIM-2 по температурам показала их достаточную достоверность – проверяемые значения совпали с имеющимися в российской климатической базе ВНИИГМИ – МЦД (Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных) [4]. Получено хорошее совпадение и с массивами климати-

ческих характеристик, предоставляемыми NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, National) [15]. Худшие результаты дала проверка по осадкам из-за накопления случайных ошибок в их годовых суммах.

В базе данных FAOCLIM-2 для каждой из 28106 метеостанций мира указаны ее координаты, высота над уровнем моря, страна и среднемесячные климатические данные за длительные периоды наблюдений. Данные доступны в формате Microsoft Access, что позволяет использовать их без дополнительных преобразований. Выбираемые для исследований метеостанции Евразии должны были удовлетворять перечисленным ниже условиям, что в итоге привело к неравномерности их распределения по площади континента и обусловленной этим пространственной погрешности выделяемых кластеров.

Были приняты следующие требования по выбору метеостанций Евразии из FAOCLIM-2, данные которых использовались в расчетах:

- длина ряда наблюдений должна составлять не менее 33 лет, отвечающих одной фазе вековых природных или антропогенных циклов климатических изменений [6–7, 13];

- в используемом ряде не должно присутствовать более одного пропуска годовых данных.

Полученные итоговые файлы составили порядка 100000 годовых осадков и около 50000 среднегодовых температур.

Метод исследования. Единообразие ритмики метеорологических полей должно оцениваться через показатели, которые бы адекватно отражали многолетний интегральный эффект вынуждающих мультирезонансных природно-антропогенных воздействий на атмосферные процессы. Такие показатели должны представлять собой определенные статистические характеристики многолетней региональной динамики климатических факторов. При статистических оценках в большинстве случаев прямо или косвенно используются средние значения переменных. В то же время средние значения температур и осадков нестабильны и меняются в зависимости от выбора периода осреднения. Для решения этой проблемы целесообразно взять собственно периоды последовательного возрастания или убывания значений метеорологического фактора, которые уже не связаны с указанными средними. При этом значения показателей не зависят от того, выражаем ли мы температуры и осадки соответственно в градусах и миллиметрах или используем проценты от их средних (см. выше).

В рамках системного информационно-иерархического анализа влияния растительности и человека на климат нами были предложены информационно-статистические показатели, характеризующие повторяемые особенности многолетней динамики климатических факторов [7, 9]. Эти показатели представляют собой конкретные статистические характеристики динамики переменных и с физической точки зрения отражают резонансное влияние динамических систем друг на друга. 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 [7]:

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

где l – максимальный номер у имеющихся в анализируемом ряде тенденций с номерами $k = 1, 2, 3, 4, \dots$; p_k – вероятность появления в ряде (доля) лет с тенденцией k , $\sum_{k=1}^l p_k = 1$. Очевидно, при усилении резонансного взаимодействия систем вклад тенденций с большими номерами будет увеличиваться, что приведет к росту показателя K_1 .

Для расчета второго показателя используются до 10 характерных периодов, выделяемых в рядах данных [7, 13]:

– с нулевой продолжительностью, которые отвечают году начала 33-летних фаз вековых климатических циклов;

– двухлетние, отвечающие последовательному нарастанию/убыванию годовых климатических характеристик и охватывающие два подряд идущих года с тенденциями 1 и 2 соответственно;

– трехлетние, охватывающие три подряд идущих года с тенденциями 1, 2, 3;

– при наличии лет с тенденциями 4, 5, ..., 10 для конкретных метеостанций следует также учитывать 4-, 5-, ..., 10-летние периоды. Длительные периоды, в частности, имеют место в арктической зоне и отражают ее устойчивое потепление с усилением таяния арктических льдов.

Расчет второго 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 выражение для нормированной информации Шеннона:

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

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), $\sum_{k=1}^2 p_k = 1$.

Как видно из (1) и (2), показатели K_1 и K_2 должны вести себя достаточно синхронно – увеличиваться при усилении резонансного взаимодействия систем и росте вклада тенденций с большими номерами или уменьшаться в противном случае. Их различие состоит в том, что если в K_1 учитываются все тенденции, то в K_2 – только тенденции с номерами больше или равными двум. Иначе говоря, K_2 характеризует среднюю продолжительность собственно последовательного нарастания или убывания метеорологической характеристики, которые начинаются только со второго года.

Для расчета информационно-статистических показателей K_1 и K_2 была разработана специальная программа в среде MATLAB. С ее помощью из базы данных FAOCLIM-2 по континенту Евразия выбирались метеостанции с длиной рядов наблюдений не менее 33-х лет, соответствующим образом исключались пропуски в наблюдениях, а затем для среднегодовых температур воздуха и годовых сумм осадков каждой метеостанции определялись искомые показатели K_1 и K_2 . Выделяемые 33-летние ряды непрерывных наблюдений обеспечивали необходимую точность проводимых оценок.

Расчетные значения K_1 и K_2 в среднем по всем выбранным метеостанциям Евразии составили у осадков

соответственно 0,625 и 0,305 при среднеквадратичных (стандартных) отклонениях 0,075 и 0,016. У температур воздуха K_1 и K_2 были равны соответственно 0,644 и 0,311 при отклонениях 0,080 и 0,018. Стандартные отклонения как для осадков, так и температур показывают, что показатель K_2 заметно менее чувствителен к ошибкам данных метеорологических наблюдений. Все полученные K_1 и K_2 оказались достаточно близкими к их теоретически требуемым величинам 0,618 и 0,297, отражающим непосредственное влияние растительности на климат с поддержанием ею нормального статистического распределения годовых осадков и среднегодовых значений температур воздуха [7, 13]. Несколько повышенные K_1 и K_2 для температур, очевидно, обусловлены идущими континентальными изменениями климата. Отметим, что для территории России в случае использования данных об осадках и температурах воздуха до 1983 г. было получено полное соответствие рассматриваемых характеристик их теоретическим значениям [7].

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 как временную, так и пространственную связность метеорологических факторов и тем самым адекватно учесть указанное выше единообразие/синхронизм динамики метеорологических полей на больших территориях.

Показатели K_3 и K_4 определялись как расстояние по широте и долготе в километрах от метеостанции до экватора и Гринвичского меридиана соответственно. Перевод длин дуг параллелей и меридианов из градусов в километры выполнялся на основе эллипсоида Красовского по соответствующим таблицам [10].

Поскольку кластерный анализ позволяет исследовать множество исходных данных произвольной природы [3], то при его выполнении можно использовать одновременно все 4 показателя, два из которых являются статистическими характеристиками многолетних рядов данных и два – расстояний. Каждая метеостанция с отвечающими ей 4 показателями представляет собой одну точку метеорологического поля температур или осадков. Выделение кластеров таких точек, собственно, и является пространственной кластеризацией в качестве одного из методов зонирования метеорологических полей.

Для выполнения кластеризации показатели нормировались. Для этого из каждого значения показателя в выборке по всему континенту вычиталось среднее, затем полученная разность делилась на среднеквадратичное отклонение. Такая нормировка вариаций показателей гарантировала их одинаковый вклад в формирование искомого кластера. Затем применялся известный метод k -средних (k – размерность пространства параметров, $k=4$). Метод обеспечивал разделение метеостанций по кластерам так, чтобы внутри последних изменчивость параметров была минимальна, а между ними – максимальна. При этом внутрикластерная изменчивость характеризовалась как евклидово расстояние от метеостанции до центра тяжести ее кластера, а межкластерная – как расстояние между такими центрами.

Сначала был получен ряд вариантов пространственной кластеризации с последовательно увеличивающимся числом кластеров, которое исходно задавалось нами для каждого варианта. Затем из найденных вариантов выбирался один наиболее адекватный. Для этого определялись средние по каждому кластеру значения показателей K_1

и K_2 (см. (1) и (2)). Эти значения, как указывалось выше, должны были меняться синхронно от кластера к кластеру и для осадков, и для температур. Наиболее адекватным вариантом принимался тот, который при выполнении данного условия имел наибольшее число кластеров.

Метеорологические поля исследуемой территории визуализировались с помощью ГИС-платформы ESRI ArcGIS Desktop 10.0 в конфигурации ArcEditor.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1–2 и в таблице представлены результаты пространственной кластеризации

ритмики метеорологических полей осадков и температур. В обоих случаях получено четыре кластера. Сравнение рисунков обнаруживает одинаковые картины зонирования у первого и второго поля. Поскольку многолетняя динамика температур и осадков достаточно независима, то совпадение картин позволяет сделать вывод об обоснованности предлагаемого метода пространственной кластеризации метеорологических полей и объективности результатов зонирования.

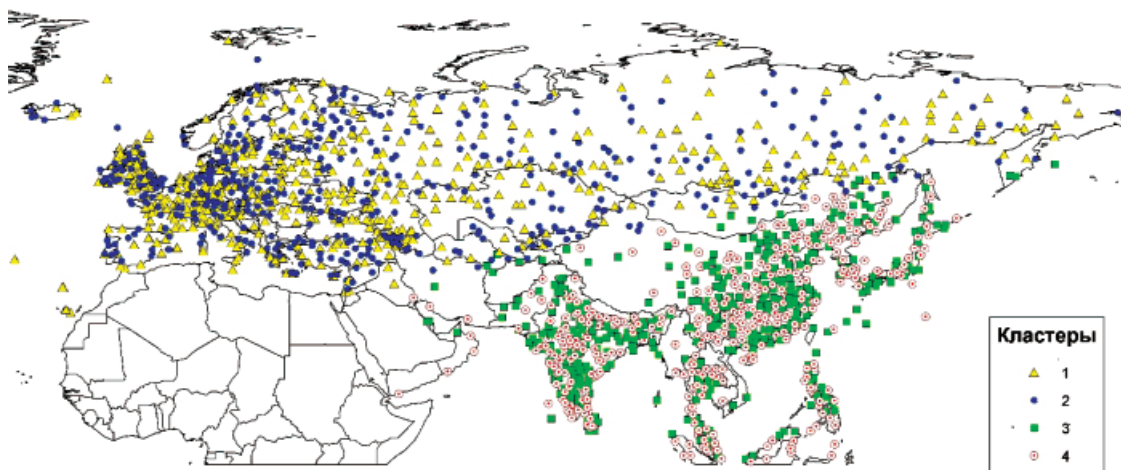


Рис. 1. Пространственная кластеризация ритмики годовых осадков для континента Евразия

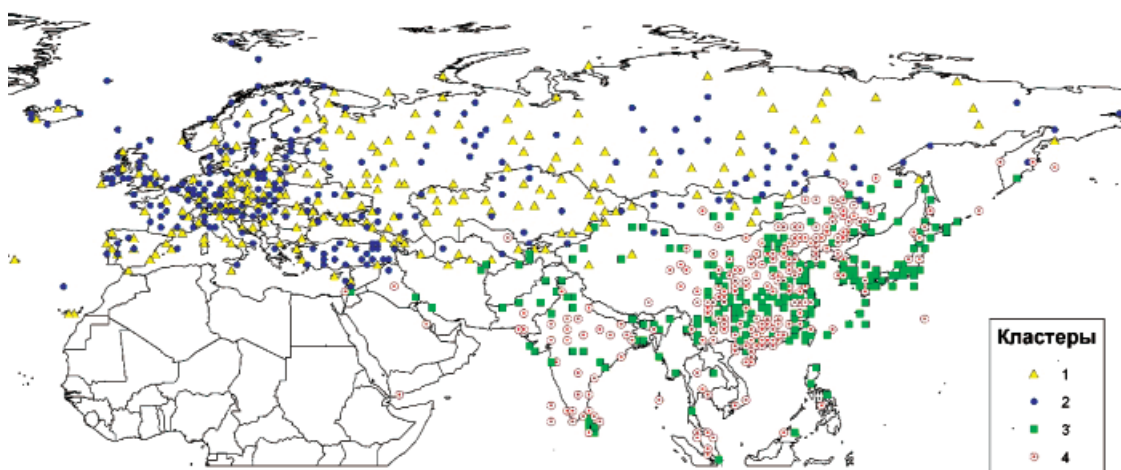


Рис. 2. Пространственная кластеризация ритмики среднегодовых температур для континента Евразия

Из сравнения рис. 1–2 с 3 видно, что при полученной минимальной детализации метеорологических полей расположение кластеров слабо связано с климатическими зонами, ландшафтами земной поверхности или крупными водотоками. В соответствии с теоретическими представлениями об иерархически организованной климатической

ритмике [7, 13], 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 хозяйственная деятельность человека. Поэтому причинами

появления кластеров должно быть воздействие на атмосферные процессы или естественных наземных экосистем, или антропогенных систем. К последним, очевидно, следует отнести три континентальных социально-хозяйственных конгломерата стран с отличающимся воздействием на окружающую среду: буддийский, христи-

ано-иудейский и исламский. Для буддийского характерно орошаемое земледелие (возделывание риса), для христиано-иудейского – богарное земледелие (возделывание зерновых) с пастбищным животноводством и для исламского – преимущественно отгонно-пастбищное животноводство с очаговым земледелием.

Средние значения показателей K_1 и K_2 отдельных кластеров по (1) и (2) для метеорологических полей осадков и температур Евразии

Метеорологическая характеристика	Показатель	Кластер			
		1	2	3	4
Осадки	K_1	0,576	0,684	0,577	0,675
	K_2	0,298	0,314	0,292	0,315
Температуры	K_1	0,568	0,687	0,610	0,715
	K_2	0,297	0,316	0,303	0,329

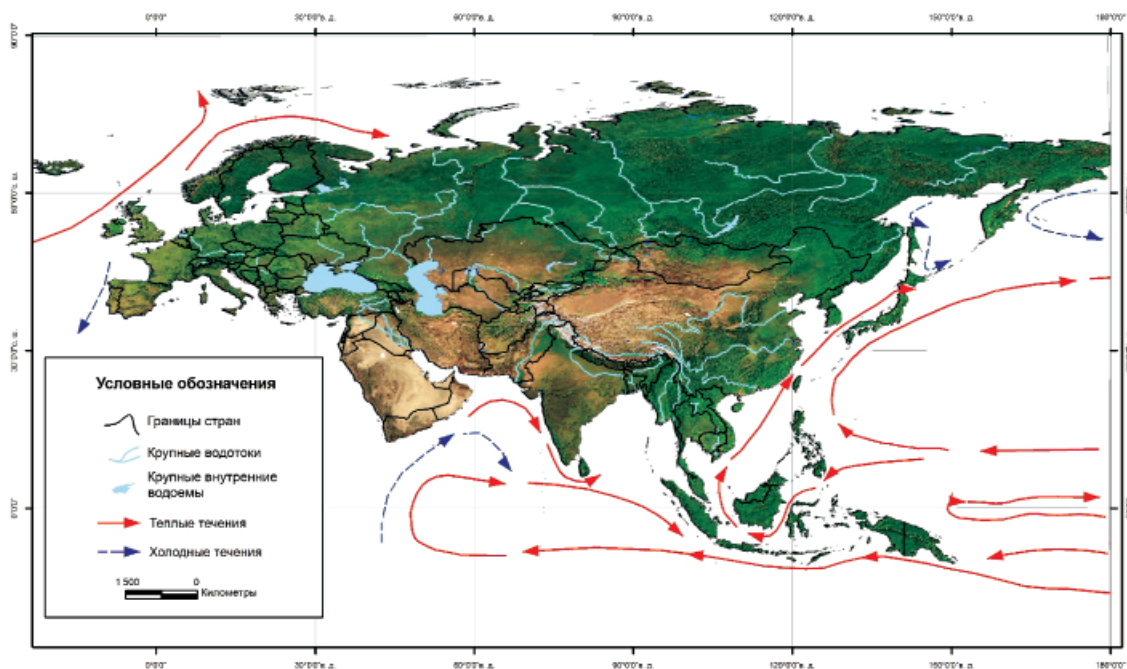


Рис. 3. Схема крупнейших водотоков континента Евразия

Первые два пространственных кластера осадков и температур (рис. 1–2) охватывают территорию христиано-иудейского и исламского социально-хозяйственных конгломератов. Показатель K_2 первого кластера согласно таблице ближе к теоретически требуемому значению 0,297 (см. Метод исследований). За его формирование, очевидно, отвечает естественная растительность, которая эволюционно приспособлена к более значительным изменениям климата по сравнению с современными и поддерживает единообразную эволюционно вырабо-

танную ритмику метеорологических факторов с вековой цикличностью. Отметим, что растительные сукцессии в крупных экосистемах/биомах континента различаются по срокам своего начала и окончания, в связи с чем формируемые ими вековые климатические циклы пространственно разделены и сдвинуты по времени относительно друг друга. В то же время это никак не влияет на значения K_1 и K_2 . Второй кластер с более высоким показателем K_2 должен быть сформирован уже социально-хозяйственной системой, приводящей к появлению длительных

трендов климатических факторов вследствие, например, устойчиво растущих промышленных выбросов парниковых газов. Последние влияют на тепловой баланс атмосферы и изменяют эволюционно поддерживаемое нормальное статистическое распределение годовых значений осадков и температур для многолетних периодов времени [7, 13].

Третий и четвертый кластеры приурочены к Юго-Восточной Азии, где расположен буддийский социально-хозяйственный конгломерат с высокой плотностью населения и интенсивным антропогенным воздействием на среду (рис. 1, 2). Следуя изложенной логике, третий кластер, имеющий близкий к теоретическому значению 0,297 показатель K_2 , опять следует рассматривать как обусловленный естественной растительностью. Он смыкается с первым кластером, и оба они охватывают всю территорию Евразии. Последний четвертый кластер определяется аналогично второму антропогенным влиянием. Они смыкаются между собой лишь в восточной части континента, где интенсивная хозяйственная деятельность Китая территориально соприкасается с российской.

Наконец отметим, что более подробное зонирование каждого из выделенных кластеров целесообразно выполнять иными средствами, отличными от кластерного анализа. Например, средствами ГИС-платформы ESRI ArcGIS [8]. Это позволит сопоставить региональную климатическую ритмику с ландшафтной структурой поверхности, включая крупные экосистемы наземной растительности или бассейны больших рек. Проведение таких оценок является задачей дальнейших исследований.

Выводы

Разработан аналитический метод пространственной кластеризации континентальных метеорологических полей, основанный на региональных различиях их многолетней динамики. Метод базируется на системном информационно-иерархическом анализе воздействия на климат крупных социально-хозяйственных конгломератов и наземной растительности как ритмически организованных иерархических систем. Предложены статистические показатели воздействия этих систем на межгодовую динамику приземных температур воздуха и осадков.

Пространственная кластеризация ритмики метеорологических полей впервые позволяет отделить влияние на климат растительности от воздействия антропогенного фактора, выделяя при этом территории с пре-

имущественным влиянием растительности или хозяйственной деятельности человека.

С помощью разработанного метода кластеризации выполнена количественная оценка регионального синхронизма многолетней ритмики температур воздуха и осадков и осуществлена декомпозиция их полей для континента Евразия.

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. Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеоданных. – Л.: Гидрометеоздат, 1976. – 360 с.
2. Дроздов О.А., Шепелевский А.А. Теория интерполяции в стохастическом поле метеорологических элементов и ее применение к вопросам метеорологических карт и рационализации сети // Труды НИУ ГУГМС. Сер. I. – 1946. – Вып. 13. – С. 65–115.
3. Дубров А.М., Мхитарян В.С., Трошин Л.И. Многомерные статистические методы. – М: Финансы и статистика, 2003. – 352 с.
4. Единый Государственный Фонд Данных / Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ – МЦД). – Россия, г. Обнинск, 2013. URL: <http://meteo.ru/egfd> (дата обращения: 15.09.2013).
5. Кирста Ю.Б. Пространственное обобщение климатических характеристик для горных территорий // Мир науки, культуры, образования. – 2011а. – № 3 (28). – С. 330–337.
6. Кирста Ю.Б. Прогноз климата и агроклиматического потенциала Сибирского федерального округа до 2020 года // Проблемы региональной экологии. – 2011б. – № 3. – С. 22–30.
7. 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.
8. Кирста Ю.Б., Курепина Н.Ю., Ловцкая О.В. Территориальная декомпозиция ритмики метеорологических полей Евразии // Известия Самарского научного центра РАН. – 2013. – Том 15, № 3 (2). – С. 643–647.
9. Кирста Ю.Б., Ловцкая О.В., Курепина Н.Ю. О резонансном воздействии экологических и антропогенных систем на региональную динамику метеорологических полей // Контроль окружающей среды и климата «КОСК-2012»: материалы VIII Всерос. симп. – Томск, 2012. – С. 115–116.
10. Серапинас Б.Б. Математическая картография: учебник для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 336 с.
11. FAOCLIM: Agroclimatic database and software – Rome, Italy: FAO, 2002. URL: <http://freegeographytools.com/2007/fao-world-climate-data> (дата обращения: 21.09.2012).
12. Kirsta Yu.B. System-analytical modelling – Part II: Wheat biotime run and yield formation. Agroclimatic potential, Le Chatelier principle, changes in agroclimatic potential and climate in Russia and the U.S. // Ecol. Modelling. – 2006. – Vol. 191. – P. 331–345.
13. Kirsta Yu.B., Kirsta V.Yu. Information-hierarchical organization of natural systems II: Futures of Man-Biosphere Interactions and Climate Control // World Futures. – 2010. – Vol. 66 (8). – P. 537–556.

14. 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.

15. National Climatic Data Center / National Oceanic and Atmospheric Administration. – United States Department of Commerce, 2013. URL: <http://www.ncdc.noaa.gov/ghcnm/v3.php> (дата обращения: 03.07.2013).

References

1. Gandin L.S., Kagan R.L. *Statisticheskie metody interpretacii meteodannyh* [Statistical methods of meteorological data interpretation]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1976, 360 p.

2. Drozdov O.A., Shepelevskij A.A. *Trudy NIU GUGMS, Ser. I*, 1946, Вып. 13, pp. 65–115.

3. Dubrov A.M., Mhitarjan V.S., Troshin L.I. *Mnogomernye statisticheskie metody* [Multidimensional statistical methods]. Moscow, Finansy i statistika, 2003, 352 p.

4. *Edinyj Gosudarstvennyj Fond Danyh* (Unified State Fund of Data), Available at: <http://meteo.ru/egfd> (accessed 15 September 2013).

5. Kirsta Ju.B. *Mir nauki, kul'tury, obrazovanija*, 2011a, no. 3 (28), pp. 330–337.

6. Kirsta Ju.B. *Problemy regional'noj jekologii*, 2011b, no. 3, pp. 22–30.

7. Kirsta Ju.B., Kirsta B.Ju. *Informacionno-fizicheskij zakon postroenija jevoljucionnyh sistem. Sistemno-analiticheskoe modelirovanie jekosistem* [«The Information-Physical Principle of Evolutionary Systems Formation. System-Analytical Modeling of Ecosystems»]. Barnaul, Altajskij gosudarstvennyj universitet, 2009, 270 p.

8. Kirsta Ju.B., Kurepina N.Ju., Lovckaja O.V. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN*, 2013, Tom 15, no. 3 (2), pp. 643–647.

9. Kirsta Ju.B., Lovckaja O.V., Kurepina N.Ju. *Materialy VIII Vserossijskogo simpoziuma "Kontrol' okruzhajushhej sredy i klimata «KOSK-2012»*. Tomsk, 2012, pp. 115–116.

10. Serapinas B.B. *Matematicheskaja kartografija: uchebnik dlja vuzov* [Mathematical cartography: textbook for high schools]. Moscow, Izdatel'skij centr «Akademija», 2005, 336 p.

11. FAOCLIM: Agroclimatic database and software, Available at: <http://freegeographytools.com/2007/fao-world-climate-data> (accessed 21 September 2012).

12. Kirsta Yu.B. *Ecol. Modelling*, 2006, Vol. 191, pp. 331–345.

13. Kirsta Yu.B., Kirsta V.Yu. *World Futures*, 2010, Vol. 66 (8), pp. 537–556.

14. Makarieva A.M., Gorshkov V.G. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2007, Vol. 11, pp. 1013–1033.

15. National Climatic Data Center, Available at: <http://www.ncdc.noaa.gov/ghcnm/v3.php> (accessed 3 July 2013).

Рецензенты:

Павлов В.Е., д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, ИВЭП СО РАН, г. Барнаул;

Суторихин И.А., д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, ИВЭП СО РАН, г. Барнаул.

Работа поступила в редакцию 26.03.2014.