

УДК 551.588

ДЕКОМПОЗИЦИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ ЗЕМЛИ: 1. МЕТОД ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

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

Разработан метод пространственной кластеризации континентальных метеорологических полей, основанный на различиях их многолетней ритмики. Выполняемый с его помощью 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 двух факторов: растительности и человеческого общества как ритмически функционирующих систем.

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

DECOMPOSITION OF METEOROLOGICAL FIELDS IN THE NORTHERN HEMISPHERE: 1. METHOD OF SPATIAL CLUSTERING OF CONTINENTAL METEOROLOGICAL FIELDS

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*

The method of spatial clustering of continental meteorological fields was developed based on differences in their longstanding rhythmicity. The analysis of the interannual dynamics of surface air temperature and precipitation allows us to define the areas with the largest deviations from the evolutionarily developed statistical regularities of these factors. Deviations are estimated using statistical information indices reflecting regional resonance influence of two factors on climate, i.e. vegetation and human society as rhythmically functioning systems.

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

Анализ и прогноз региональных проявлений глобальных климатических изменений представляют собой фундаментальную проблему современной климатологии. Ее важным аспектом является изучение вариаций климата, вызванных вынуждающими внешними, в том числе антропогенными, факторами периодического и квазипериодического характера.

На Земле имеются две крупнейшие иерархически организованные системы – растительность и человеческое общество, зависящие от атмосферных процессов и одновременно воздействующие на них [4, 8]. Например, показано, что именно биотическая регуляция климата обеспечивает стабильность приземных температур воздуха и круговорота воды на Земле, тогда как в отсутствии такой регуляции атмосфера будет иметь только два устойчивых состояния с температурами порядка +400 °C и –80 °C [6]. Многолетние сукцессионные смены наземной растительности изменяют отражательную способность растительного покрова и, следовательно, альбедо под-

стилающей поверхности Земли. Это ведет к региональным многолетним колебаниям теплового баланса приземного слоя атмосферы, а значит температуры воздуха и осадков [4]. В частности, известно, что в высоких и средних широтах с потеплением климата растет и количество осадков.

Человек при распашке почв и многолетних севооборотах полевых культур также изменяет альбедо земной поверхности и ее теплообмен с атмосферой. В результате развития промышленности растет выброс аэрозолей и парниковых газов, обуславливающих постоянный сдвиг теплового баланса атмосферы и динамики ее процессов.

Воздействия на атмосферные процессы 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 [9], при каком-либо региональном увеличении (или уменьшении) осадков

обеспечивает себе на следующий год лучшее (худшее) развитие через изменение количества образующихся в текущем году почек и семян. Очевидно, это приводит к еще более (менее) эффективному переносу влаги на следующий год. Такая положительная обратная связь должна формировать последовательное нарастание (убывание) осадков на больших территориях в течение ряда лет с сопутствующим образованием у растений положительных (отрицательных) «волн жизни». Подобные волны у популяций организмов давно известны экологам. К появлению отрицательных «волн жизни» могут привести обширные пожары или интенсивная вырубка лесов.

Региональные «волны жизни» имеют место и у человеческого общества. Отрицательные волны с резким падением численности населения, например, в результате крупномасштабных войн, приводят к долговременному ослаблению хозяйственной деятельности, влияющей через сельскохозяйственное и крупное промышленное производство на региональную динамику климатических процессов. Эти волны повторяются как демографические «ямы» через период смены поколений.

Попытки оценить региональное единообразие/синхронизм динамики метеорологических полей были начаты еще в середине прошлого столетия [1] и продолжаются до настоящего времени. Выполненные нами исследования позволили обнаружить такой синхронизм [2, 4, 7]. При этом показана неадекватность традиционного описания многолетних изменений температур воздуха и осадков путем ежегодного увеличения или уменьшения их месячных значений на определенную величину. Изменения температур и осадков следует характеризовать в процентах от их среднемноголетних месячных значений за реперные месяцы года. В этом случае многолетняя динамика метеорологических характеристик оказывается единообразной во времени на больших пространствах и слабо зависящей от орографической и климатической неоднородностей территории.

Материалы и методы исследования

Для декомпозиции континентальных метеорологических полей по их региональной ритмике 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) [10].

Охватываемый базой период наблюдений составлял порядка 150 лет, с середины XIX по конец XX века.

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). Получено хорошее совпадение и с массивами климатических характеристик, предоставляемыми NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, National). Худшие результаты дала проверка по осадкам из-за накопления случайных ошибок в их годовых суммах.

В базе данных FAOCLIM-2 для каждой из перечисленных 28100 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 позволило использовать их без дополнительных преобразований. Выбираемые для исследований метеостанции должны были удовлетворять определенным требованиям, что в итоге привело к неравномерности их распределения по площади континентов и обусловленной этим пространственной погрешности выделяемых кластеров.

Были приняты следующие требования по выбору метеостанций из базы FAOCLIM-2 для использования их в расчетах:

- длина ряда метеорологических наблюдений должна составлять не менее 33 лет, отвечающих одной фазе вековых природных или антропогенных циклов климатических изменений [3-4, 8];
- в используемом ряде не должно присутствовать более одного пропуска годовых данных.

Региональное единообразие ритмики метеорологических полей температур воздуха и осадков 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 региональной динамики климатических факторов. При статистических оценках метеорологических величин 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 периода осреднения. Для решения этой проблемы целесообразно взять периоды последовательного возрастания или убывания ежегодных значений климатического фактора, которые уже не связаны с указанными средними. При этом значения показателей не зависят от того, выражаем ли мы температуры в градусах и осадки в 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 [4, 8]. Эти показатели представляют собой определенные статистические характеристики динамики переменных и с физической точки зрения отражают мультирезонансное влияние на атмосферные процессы различных динамических систем биосферы. Имея многолетние ряды годовых климатических данных, мы выделяем отдельные се-

рии 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 [4]:

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

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 , $\sum_{k=1}^l p_k = 1$. Очевидно, при усилении резонансного взаимодействия систем вклад больших тенденций будет увеличиваться, что приведет к росту показателя K_1 .

Для расчета второго показателя используются до 10 характерных периодов, выделяемых в рядах данных [4, 8]:

- 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.

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:

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

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

Как видно из уравнений (1) и (2) показатели K_1 и K_2 должны вести себя достаточно синхронно – увеличиваться при усилении резонансного взаимодействия систем и росте вклада больших тенденций или уменьшаться в противном случае. Большие тенденции появляются также в результате воздействия на региональный климат многолетних изменений солнечной активности, устойчиво растущего выброса аэрозолей и парниковых газов, а также других постепенно меняющихся факторов среды. Различие K_1 и K_2 состоит в том, что если в K_1 учитываются все тенденции, то в K_2 – только тенденции большие или равные двум. Иначе говоря, K_2 определяется средней продолжительностью последовательного нарастания или убывания метеорологической характеристики, отсчет которых начинается, очевидно, со второго года.

Результаты исследования и их обсуждение

В процессе эволюции биосферы наземная растительность и климат взаимно регулировали друг друга [6]. Проведенный системный информационно-иерархический анализ их взаимодействия показал, что для многолетних периодов времени растительные экосистемы поддерживают близкое к нормальному статистическое распределение годовых сумм осадков и среднегодовых температур воздуха со значениями $K_1 = 0,618$ и $K_2 = 0,297$ [4, 8]. Отметим, что именно с нормальным распределением климатических факторов связан известный принцип Ле Шателье для экосистем, в основе которого лежит нормированная информация Шеннона [7]. С другой стороны, при отсутствии прямой биотической регуляции, например, у формируемого осадками годового стока рек, мы наблюдаем уже иные статистические распределения [5]. Антропогенные изменения растительности на больших площадях приводят к нарушению сбалансированного с климатом функционирования экосистем и изменению нормального распределения температур и осадков, в том числе через указанный выше резонанс развития растительности с атмосферными процессами.

Таким образом, большее (или меньшее) отличие рассчитываемых значений K_1 от 0,618 и K_2 от 0,297 будет означать большее (меньшее) нарушение нормального статистического распределения осадков и температур, то есть степень дестабилизации климата и сопутствующее изменение числа экстремальных климатических явлений.

Оценим погрешность расчета показателей K_1 и K_2 . Согласно результатам системного анализа сукцессионные смены наземной растительности, как и человеческая деятельность, могут формировать региональные вековые циклы изменения климатических факторов с тремя характерными 33-летними фазами [4, 8]. При этом показатели K_1 и K_2 , характеризующие информационные аспекты функционирования иерархических систем, следует определять для каждой из этих фаз. Поскольку годы начала и конца фаз у региональных вековых циклов определены лишь для территории России [3], то расчет K_1 и K_2 для всех метеостанций следует выполнять для максимально длительных периодов не менее 33 лет. В соответствии с принципами информационно-иерархической организации биосферных систем с вложенными циклами функционирования подсистем (относящихся к более низкому иерархическому уровню)

динамика процессов в пределах вложенных циклов является неразличимой [4, 8]. Иначе говоря, наилучшая точность оценки каких-либо количественных характеристик системы будет определяться соотношением длительностей вложенного и характеризуемого циклов. В нашем случае это 1 и 33 года. Отсюда можно оценить погрешность расчетов K_1 и K_2 , которая составит $1/33 \times 100\% = 3\%$. Эта погрешность, например, связана с тем, что K_1 и K_2 рассчитываются по условным годовым суммам осадков и среднегодовым температурам, которые отвечают условно принятым срокам начала и конца года (январь–декабрь), тогда как природно обусловленные сроки региональных годовых циклов биосферы нами игнорируются.

Можно также полагать, что ошибки данных метеорологических наблюдений, в том числе используемой базы FAOCLIM-2, имеют случайный характер и подчиняются нормальному статистическому распределению. Поэтому они не изменяют характер нормального распределения используемых годовых сумм осадков и среднегодовых температур, а значит не изменяют отвечающие ему значения $K_1 = 0,618$, $K_2 = 0,297$ (см. выше) и не ухудшат полученную погрешность расчетов 3%. При наличии же каких-либо искажений нормального распределения метеорологических факторов ошибки могут их лишь незначительно уменьшить. Таким образом, слабая зависимость показателей K_1 и K_2 от случайных ошибок данных является их важным свойством, обеспечивающим адекватное выполнение декомпозиции метеорологических полей.

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 для каждого континента выбирались метеостанции с длиной рядов наблюдений не менее 33-х лет, соответствующим образом исключались пропуски в наблюдениях, а затем для годовых сумм осадков и среднегодовых температур воздуха определялись показатели K_1 и K_2 по каждой метеостанции.

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 пространственную зависимость метеорологических факторов и адекватно учесть региональное единообразие/синхронизм динамики метеорологических полей.

Показатели K_3 и K_4 определялись как расстояние по широте и долготе в киломе-

трах 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.

Поскольку кластерный анализ позволяет исследовать множество исходных данных произвольной природы, то при его выполнении можно использовать одновременно все четыре показателя, два из которых являются статистическими характеристиками многолетних рядов данных, и два – расстояния. Каждая метеостанция с отвечающими ей четырьмя показателями представляет собой одну точку метеорологического поля температур или осадков. Выделение кластеров таких точек собственно и названо пространственной кластеризацией, обеспечивающей зонирование метеорологических полей.

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:

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

Затем показатели DK_1 , DK_2 , K_3 и K_4 нормировались. Из каждого значения показателя вычиталась среднее по всей выборке исследуемого континента, а полученная разность делилась на среднеквадратичное отклонение. Такая нормировка показателей гарантировала их одинаковый вклад в формирование искомым кластеров. Пространственная кластеризация осуществлялась методом 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.

Были проверены различные варианты пространственной кластеризации с последовательно увеличивающимся числом исходно задаваемых кластеров. Нами был выбран вариант с четырьмя кластерами, для которых сохранялась межкластерная синхронность поведения K_1 и K_2 (см. выше).

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

Рассмотрим возможность осуществления климатических прогнозов. Выше указывалось, что для температур воздуха и осадков, если они характеризуются в процентах от соответствующих среднемесячных значений, имеет место региональный синхронизм [2, 4, 7]. Выделяемые пространственные кластеры как раз и отвечают зонам такого синхронизма. Поэтому выражая значения температур и осадков в процентах и выполняя их прогноз отдельно по каждому кластеру, мы получаем более адекватные оценки региональных изменений климата по сравнению, например, с математическими моделями глобальных изменений климата. Отметим, что при климатических прогнозах необходимо одновременно учитывать региональный вековой климатический цикл, 33-летние фазы которого определяют периоды расчета климатических трендов и допустимые сроки прогнозов [3-4, 8].

При наличии достаточного числа метеостанций с многолетними климатическими наблюдениями процедура пространственной кластеризации, очевидно, может выполняться не только для континентов, но и для отдельных климатических зон и территорий крупных государств. Кроме того, возможно более подробное зонирование выделенных пространственных кластеров с помощью средств, отличных от кластерного анализа, например, средствами ГИС-платформы ESRI ArcGIS. Это может потребоваться при сопоставлении региональной климатической ритмики с ландшафтной структурой земной поверхности или территориальными особенностями хозяйственной деятельности человека. Например, подробное зонирование будет полезным при анализе степени дестабилизации климата в зависимости от уровня промышленного производства в характеризуемом регионе.

Выводы

Разработан аналитический метод пространственной кластеризации континентальных метеорологических полей, основанный на региональных различиях их многолетней динамики. Метод базируется на резонансном воздействии на климат наземной растительности и человеческого общества ритмически организованных иерархических систем. Предложены ин-

формационно-статистические показатели воздействия этих систем на межгодовую динамику приземных температур воздуха и осадков.

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. Такая декомпозиция может выполняться от континента в целом до территорий крупных государств.

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. 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. – 1946. – Сер. I, вып. 13. – С. 65-115.
2. Кирста Ю.Б. Пространственное обобщение климатических характеристик для горных территорий // Мир науки, культуры, образования. – 2011а. – № 3 (28). – С. 330-337.
3. Кирста Ю.Б. Прогноз климата и агроклиматического потенциала Сибирского федерального округа до 2020 года // Проблемы региональной экологии. – 2011б. – № 3. – С. 22-30.
4. 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.
5. Леви И.И. Инженерная гидрология. – М.: Высшая школа, 1960. – 238 с.
6. 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).
7. 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. – 2006б. – Vol. 191. – P. 331–345.
8. 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.
9. 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.
10. FAOCLIM: Agroclimatic database and software – Rome, Italy: FAO, 2002. URL: <http://freegeographytools.com/2007/fao-world-climate-data> (дата обращения: 21.09.2012).