

ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ СВЯЗИ СИНОПТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НАД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКОЙ И УКРАИНОЙ

Описывается методика, позволяющая выявлять связь между синоптическими процессами над Северной Атлантикой и Украиной. Такой подход основывается на совместном использовании компонентного анализа и непрерывного вейвлет-преобразования. Показано, что в определенные периоды времени синоптические процессы над Северной Атлантикой и Украиной развиваются когерентно.

Ключевые слова: *вейвлет, компонентный анализ, Североатлантическое колебание.*

Введение

Как известно [1], доминирующим фактором, определяющим изменчивость климата в Евроатлантическом секторе, является Североатлантическое колебание (САК), которое ответственно за более чем треть всей изменчивости приземного давления, а также от 20 до 60% изменчивости температуры и осадков холодного периода над Скандинавией, Гренландией, Европой и Средиземноморьем. Североатлантическое колебание проявляется в виде смещения воздушных масс между Исландским минимумом и Азорским максимумом, что приводит к изменениям интенсивности этих центров действия атмосферы. Давление ниже нормального над Исландией и выше нормального над Азорскими островами (так называемая положительная фаза САК) приводит к большим барическим градиентам, а обратное соотношение (отрицательная фаза САК) – к их уменьшению. Когда в течение холодного периода года превалирует положительная фаза САК, скорости ветра у поверхности земли выше, а циклоны, перемещающиеся с запада на восток через Северную Атлантику – глубже. В результате этого наблюдается более влажная и теплая зима над Северной Европой и восточным побережьем США, а над Гренландией и Средиземноморьем – более холодная и сухая [2].

Изначально, феномен САК и связанные с ним атмосферные процессы исследовались на климатических масштабах времени [1-4], когда в качестве исходных данных брались средние за месяц, сезон или год величины. Лишь в последние годы появились работы (см., например, статью Бенедикта и др. [5] и приведенные в ней ссылки на литературу), в которых Североатлантическое колебание рассматривается с синоптической точки зрения на основе исходных данных с дискретностью сутки и меньше. Такой подход позволил выявить, в частности, что САК присуща внутренняя изменчивость с периодом около 5-10 суток, т.е. очень близкая к времени существования отдельных синоптических процессов.

Анализ пространственной структуры САК показывает, что оно в прямом виде не вызывает сколько-нибудь существенных колебаний давлений над Украиной; скорее на эти колебания воздействует структура, известная под названием "Восточная Атлантика – Западная Россия", характеризующаяся в холодный период года диполем аномалий давления над Британскими островами и Каспийским морем [1]. Так как использованный для выявления обеих этих структур компонентный анализ обеспечивает ортогональность компонентов разложения, можно сделать вывод, что изменчивость давления в диполе Исландия-Азоры не связана с изменчивостью давления над Украиной. Правда, следует сделать замечание, что этот вывод основывается на анализе результатов, полученных, скорее, с климатической точки зрения в силу особенностей исходных данных. С другой стороны, принято считать, что синоптическая ситуация над Украиной (а из-

менчивость поля давления может рассматриваться как одна из ее характеристик) тесно связана с процессами над Северной Атлантикой.

В этой связи, выглядит привлекательной разработка методики, которая бы позволила количественно описать связь между процессами, протекающими над Северной Атлантикой (САК, в частности) и Украиной, с синоптической точки зрения. Поэтому целью настоящего исследования является формулировка такой методики и ее апробация.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных данных в настоящей работе используются среднесуточные поля приземного давления реанализа NCEP/NCAR за период с 14 ноября 2004 года по 15 марта 2005 года в области, ограниченной 30° и 80° с.ш. и 40° з.д. и 50° в.д.; шаг сетки составляет $2,5^\circ$. Так как эти данные используются для изучения процессов синоптического масштаба, их репрезентативность может считаться вполне достаточной. Отметим также, что холодный период года выбран вследствие того, что Североатлантическое колебание наиболее ярко проявляется именно с ноября по март. В последующем, с целью отдельного изучения процессов, вся сеточная область была разбита на две подобласти: первая размещалась над Северной Атлантикой (30 - 80° с.ш., 40° з.д.- 20° в.д.), а вторая – над Европой (40 - 70° с.ш., 0° - 50° в.д.).

При выявлении пространственной изменчивости метеорологических полей (а также и для многих других целей) часто используется компонентный анализ. В частности, с его помощью были выявлено Североатлантическое колебание и другие структуры телеконнекции [1]. Суть этого анализа сводится к следующему.

Пусть имеются данные в виде $\mathbf{x}(t) = [x_1, \dots, x_l]$, где каждый вектор \mathbf{x}_i ($i = 1, \dots, l$) имеет N отсчетов, обозначенных индексом t . Как правило, t – это просто время, а вектор \mathbf{x}_i – это временной ряд, содержащий N наблюдений. С помощью компонентного анализа, известного также как анализ эмпирических ортогональных функций (ЭОФ), ищутся вектора \mathbf{u} и связанный с ним \mathbf{a} ,

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{x}(t), \quad (1)$$

такие, что

$$\langle \|\mathbf{x}(t) - \mathbf{a} \mathbf{u}(t)\|^2 \rangle \quad (2)$$

минимизируется ($\langle \rangle$ обозначает осреднение по времени). Здесь вектор \mathbf{u} , называемый главным компонентом, является временным рядом, тогда как вектор \mathbf{a} , называемый первым собственным вектором, является первым собственным вектором матрицы ковариации данных и часто описывает неизменную в пространстве структуру колебания. По существу, заданные данные аппроксимируются прямой линией (ориентированной в направлении \mathbf{a}), которая вычисляет максимальную сумму дисперсии в данных; иллюстративно, на графике рассеивания данных прямая линия, найденная по этому методу, проходит через «середину» данных. Второй режим может быть аналогичным образом извлечен из разницы $\mathbf{x} - \mathbf{a} \mathbf{u}$, и так далее для более высоких режимов.

Для того чтобы проиллюстрировать компонентный анализ, применим его к описанным выше временным рядам. На рис. 1 представлены поля первого и второго собственных векторов, которые в сумме описывают $\approx 60\%$ дисперсии (46% – первый и 13% – второй). До некоторой степени, изолинии значений этих векторов могут рассматриваться как своеобразные "изобары". Тогда, поле первого вектора описывает дипольную структуру с основными центрами над Исландией и Азорскими островами, т.е. Североатлантическое колебание, а на Средиземноморье и Украину распространяется "барический гребень" с отрогом. По знаку величин собственного вектора нельзя сделать вывод о том, что наблюдается в данном географическом районе, циклон или антициклон, так как поле отображает, скорее, колебательный процесс, однако по величине

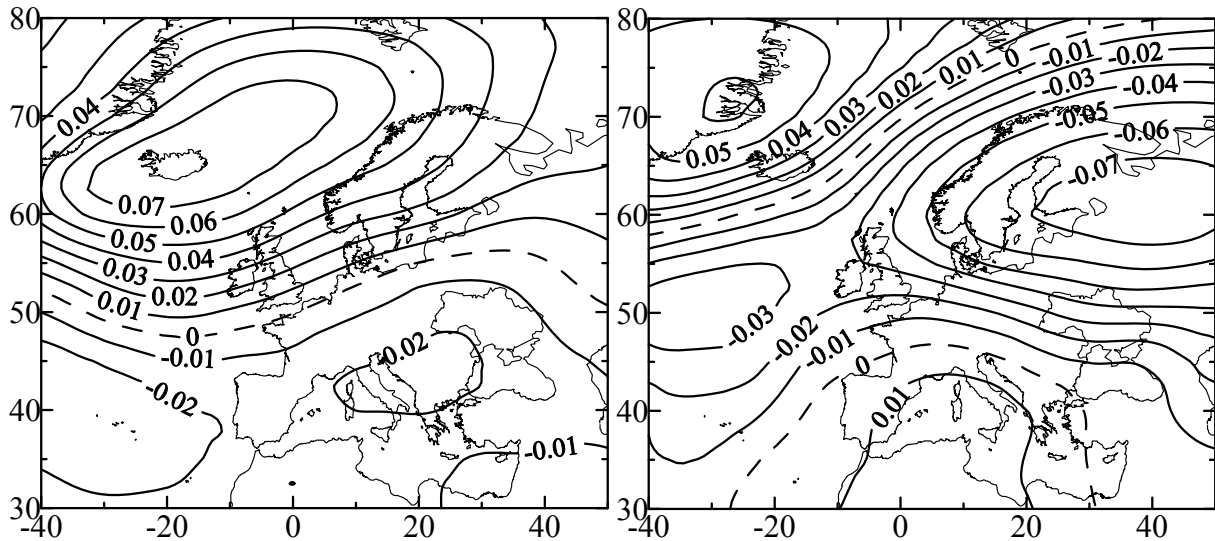


Рисунок 1 – Поля первого (слева) и второго (справа) собственных векторов разложения поля давления для периода 14/11/04-15/03/05.

собственного вектора можно судить об интенсивности этого колебательного процесса. В нашем случае, наибольшая изменчивость поля давления, т.е., по сути, чередование циклона и антициклона, наблюдается над Исландией. Над Украиной же изменчивость давления намного меньше. Другими словами, синоптическую ситуацию над Украиной, связанную с Североатлантическим колебанием, определяют неярко выраженные либо барический гребень с отрогом, либо неглубокий циклон над Балканами, причем барические градиенты над самой Украиной, скорее всего, очень маленькие. Поле второго собственного вектора можно считать характерным для структуры, носящей название "Скандинавия", с диполем, основные центры которого располагаются над Скандинавией и западом Средиземного моря [1]. Изменчивость поля давления над Украиной в этом случае больше, чем для первого собственного вектора, однако в силу ортогональности собственных векторов никакого отношения к Североатлантическому колебанию уже не имеет.

Таким образом, качественно подтверждается сделанное во Введении предположение: влияние Североатлантического колебания на синоптические процессы над Украиной можно считать несущественным.

Полученная на рис. 1 картина связана с тем, что САК является неотъемлемой частью циркуляционного режима Северной Атлантики. Поэтому единственная возможность получить рисунок, подобный рис. 1, на котором бы оно отсутствовало, сводится к исключению из анализа данных над этим географическим районом и разложение поля давления над Европой и Северной Атлантикой отдельно друг от друга. Однако такие структуры, как "Скандинавия" или "Восточная Атлантика – Западная Россия" в полях собственных векторов все еще будут проявляться. Тем не менее, такой подход позволит получить картину, которая не будет соответствовать ни одной из указанных структур, что позволит проводить последующий анализ только с ней.

Как видно из рис. 1, поля собственных векторов показывают некие пространственные особенности поля, наблюдавшиеся в течение конкретного периода времени, т.е. не предоставляют никаких сведений о том, что происходило с этими особенностями внутри этого периода. Хотя подобную информацию можно получить, проанализировав компоненты разложения. Однако с нашей точки зрения, предпочтительнее использовать с этой целью вейвлет-преобразование.

Как известно [6], вейвлет-преобразование является эффективным средством для

анализа нестационарных временных рядов (см., например, [7]). Опишем здесь коротко процедуру непрерывного вейвлет-преобразования, которая в подробностях приведена в работе Торренса и Компо [8]. Предположим, что имеется временной ряд x_n , наблюдаемый (измеренный, рассчитанный) с интервалом δt и $n = 0 \dots N-1$, где N – количество значений в этом временном ряду. Предположим также, что имеется вейвлет-функция $\psi_0(\eta)$, зависящая от безразмерного "временного" параметра η . Для того, чтобы эта функция рассматривалась как вейвлет, необходимо чтобы она имела среднее значение равное нулю и была локализована по времени и частоте [9]. Примером такой функции является вейвлет Морле, который используется в настоящей работе

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2}, \quad (3)$$

где ω_0 – безразмерная частота, которая здесь равняется 6 для удовлетворения условия допустимости.

Термин вейвлет-функция обычно используется как к ортогональному, так и неортогональному множеству функций. В настоящей работе будет рассматриваться непрерывное вейвлет-преобразование, в котором может использоваться неортогональная вейвлет-функция.

Непрерывное вейвлет-преобразование дискретной последовательности x_n определяется как свертка x_n масштабированной и смещенной версией $\psi_0(\eta)$

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} \psi^* \frac{(n' - n)\delta t}{s}, \quad (4)$$

где надстрочный символ "*" указывает комплексное сопряжение. В выражении (4) подстрочный символ "0" у ψ был опущен для указания того, что ψ была нормализована. Изменяя масштаб вейвлета s и сдвиг вдоль локализованного временного индекса n , можно определить как амплитуду по отношению к масштабу, так и как эта амплитуда изменяется со временем. Хотя вейвлет-преобразование может быть осуществлено с помощью выражения (4), значительно быстрее расчеты производятся в пространстве Фурье.

Чтобы аппроксимировать непрерывное вейвлет-преобразование, свертка (4) должна быть сделана N раз для каждого масштаба. Теорема о свертке позволяет сделать N сверток одновременно в пространстве Фурье при помощи дискретного преобразования Фурье

$$\hat{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-2\pi i k n / N}, \quad (5)$$

где $k = 0 \dots N-1$ – индекс частоты.

Так как преобразование Фурье функции $\psi(t/s)$ задается посредством $\hat{\psi}(s\omega)$, то вейвлет-преобразование определяется как обратное преобразование Фурье

$$W_n(s) = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{x}_k \hat{\psi}^*(s\omega_k) e^{i k \omega_k \delta t}, \quad (6)$$

где угловая частота равняется

$$\omega_k = \begin{cases} \frac{2\pi k}{N\delta t} & k \leq \frac{N}{2}, \\ -\frac{2\pi k}{N\delta t} & k > \frac{N}{2}. \end{cases}, \quad (7)$$

Используя выражение (6) и стандартную процедуру преобразования Фурье, можно одновременно выполнить непрерывное вейвлет-преобразование (для заданных s) на всех n .

Чтобы обеспечить сравнимость вейвлет-преобразований (6) между собой, вейвлет-функция нормализуется на каждом масштабе s

$$\hat{\psi}(s\omega_k) = \sqrt{\frac{2\pi s}{\delta t}} \psi_0(s\omega_k). \quad (8)$$

Так как вейвлет-функция является в общем комплексной, вейвлет-преобразование $W_n(s)$ также является комплексным. Тогда преобразование может быть разделено на действительную $\Re\{W_n(s)\}$ и мнимую $\Im\{W_n(s)\}$ части или амплитуду $|W_n(s)|$ и фазу $\tan^{-1}[\Im\{W_n(s)\}/\Re\{W_n(s)\}]$. Наконец, можно определить энергетический вейвлет-спектр как $|W_n(s)|^2$.

После того, как выбрана вейвлет-функция, необходимо выбрать набор масштабов s для использования в вейвлет-преобразовании (6). Чтобы отобразить более полную картину, для неортогонального вейвлет-анализа можно использовать произвольный набор масштабов

$$s_j = s_0 2^{j\delta j}, \quad (9)$$

где s_0 – наименьший разрешимый масштаб;

J – наибольший масштаб, $J = \delta j^{-1} \log_2(N\delta t/s_0)$.

Масштаб s_0 должен быть выбран таким, чтобы эквивалентный период Фурье равнялся приблизительно $2\delta t$. Выбор достаточно малого δj зависит от ширины спектрального пространства вейвлет-функции. Для вейвлета Морле $\delta j \approx 0,5$ является наибольшим значением, при котором все еще возможна адекватная дискретизация по масштабу, тогда как для других вейвлет-функций могут использоваться бóльшие значения. Естественно, что меньшие значения δj дают более высокое разрешение.

Так как мы имеем дело с временным рядом конечной длины, в начале и конце энергетического вейвлет-спектра имеют место ошибки вследствие того, что в (4) предполагается цикличность данных. Решением этой проблемы является добавление нулей в конец временного ряда до выполнения и удаление их после выполнения вейвлет-преобразования. В настоящей работе количество добавленных нулей является таким, чтобы длина временного ряда N после добавления была диадичной, что ограничивает краевые эффекты и ускоряет преобразование Фурье.

Добавление нулей, естественно, вводит неопределенности вблизи границ. Поэтому вводится понятие воронки депрессии, которая является зоной вейвлет-спектра, где краевые эффекты становятся существенными, определяется как время экспоненциальной свертки для автокорреляции вейвлет-спектра на каждом масштабе. Для вейвлета Морле это время равняется $\sqrt{2}s$.

Следующим этапом анализа временного ряда с помощью непрерывного вейвлет-преобразования является определение соответствующего фонового спектра для определения уровня значимости результатов, после чего предполагается, что различные реализации процесса будут случайно распределены около этого фона и реальный спектр может быть сравнен с этим случайным распределением. Для большинства геофизических явлений подходящим фоновым спектром является или белый шум (с равномерным спектром Фурье) или красный шум (увеличение энергии с уменьшением частоты).

Простая модель красного шума – это одномерный авторегрессионный процесс с запаздыванием AR(1)

$$x_n = \alpha x_{n-1} + z_n, \quad (10)$$

где z_n – Гауссов белый шум.

Дискретный энергетический спектр Фурье для (10) после нормализации, задается посредством

$$P_k = \frac{1 - \alpha^2}{1 + \alpha^2 - 2\alpha \cos(2\pi k/N)}, \quad (11)$$

где $k = 0 \dots N/2$ – индекс частоты.

Следовательно, выбрав соответствующий параметр α , можно использовать (11) как модель спектра красного шума, а установив $\alpha = 0$ – белого шума.

Нулевая гипотеза для энергетического вейвлет-спектра задается следующим образом. Предполагается, что временной ряд имеет средний энергетический спектр, возможно заданный посредством (11). Если пик энергетического вейвлет-спектра значительно выше этого фонового спектра, то этот пик может рассматриваться как особенность процесса с некоторой степенью уверенности.

Нормализованный энергетический спектр Фурье задается через $N|\hat{x}_k|^2/2\sigma^2$, где σ^2 – дисперсия временного ряда. Если x_n – случайная переменная, подчиняющаяся нормальному распределению, то и вещественная, и мнимая часть \hat{x}_k распределены нормально. Так как квадрат нормально распределенной величины подчиняется распределению хи-квадрат с одной степенью свободы, то $|\hat{x}_k|^2$ подчиняется распределению хи-квадрат с двумя степенями свободы, обозначаемому как χ_2^2 . Тогда, чтобы определить 95% уровень значимости, нужно умножить фоновый спектр (11) на 95-ю перцентиль величины для χ_2^2 . Наконец, предполагая средний фоновый спектр, (красный шум (11)), распределение для энергетического спектра Фурье есть

$$\frac{N|\hat{x}_k|^2}{2\sigma^2} \Rightarrow \frac{1}{2}P_k\chi_2^2 \quad (12)$$

для каждого индекса частоты k , а " \Rightarrow " обозначает "распределен как". Соответствующее распределение для локального энергетического вейвлет-спектра есть

$$\frac{|W_n(s)|^2}{2\sigma^2} \Rightarrow \frac{1}{2}P_k\chi_2^2 \quad (13)$$

для каждого времени n и масштаба s . Значение P_k в (13) – средний спектр на частоте Фурье k , соответствующей масштабу вейвлета s . За исключением соотношения между k и s , выражение (13) не зависит от вейвлет-функции. После нахождения подходящего фонового спектра и выбора конкретной значимости для χ_2^2 , например 95%, можно рассчитать (13) на каждом масштабе.

В случае, когда рассматриваются два сигнала x_n и y_n с целью выявления в них некоторых совместных особенностей, можно применить перекрестное вейвлет-преобразование, которое определяется $W^{XY} = W^X W^{Y*}$ (символ "*" обозначает комплексное сопряжение) и показывает зоны с высокой общей энергией. Тогда перекрестная вейвлет-энергия определяется $|W^{XY}|$, а комплексный аргумент $\arg(W^{XY})$ может интерпретироваться как локальная относительная фаза между x_n и y_n в пространстве времени-частот.

Другой полезной мерой является когерентность перекрестного вейвлет-преобразования в пространстве времени-частот. Согласно Торренсу и Уэбстеру [10], вейвлет-когерентность двух временных рядов определяется, как

$$R_n^2(s) = \frac{|S[s^{-1}W_n^{XY}(s)]|^2}{S[s^{-1}|W_n^X(s)|^2] \cdot S[s^{-1}|W_n^Y(s)|^2]}, \quad (14)$$

где S – оператор сглаживания.

Отметим, что это определение очень похоже на традиционный коэффициент корреляции, т.е. вейвлет-когерентность может рассматриваться как локальный коэффициент корреляции в пространстве времени-частот. Оператор сглаживания записывается в виде

$$S(W) = S_{scale}(S_{time}(W_n(s))), \quad (15)$$

где S_{scale} – сглаживание вдоль оси масштабов вейвлета;

S_{time} – сглаживание во времени.

Для вейвлета Морле операторы сглаживания имеют вид:

$$S_{time}(W)|_s = \left(W_n(s) * c_1 \frac{-t^2}{2s^2} \right)_s, \quad (16)$$

$$S_{scale}(W)|_n = (W_n(s) * c_2 \Pi(0.6))_n,$$

где c_1 и c_2 – константы нормализации;

Π – прямоугольная функция.

Множитель 0.6 является эмпирически определенной длиной масштабной декорреляции для вейвлета Морле. На практике обе свертки делаются отдельно и, поэтому, коэффициенты нормализации определяются численно.

Статистический уровень значимости для вейвлет-когерентности оценивается при помощи метода Монте-Карло, а именно, генерируется большое количество пар искусственных временных рядов с теми же коэффициентами авторегрессионного процесса (в нашем случае, AR1), что и для используемых временных рядов, и для каждой пары рассчитывается вейвлет-когерентность, а затем оценивается уровень значимости для каждого масштаба.

В работе Гринстеда и др. [3] показано, что коэффициенты авторегрессионного процесса не оказывают существенного влияния уровень значимости, тогда как в большей степени сказываются характеристики операторов сглаживания. Оценка уровня значимости требует, по крайней мере, реализации 1000 пар искусственных временных рядов, а количество масштабов на октаву должно быть настолько большим, чтобы охватить прямоугольную форму оператора сглаживания по масштабу. Гринстед и др. [3] показали, что достаточным является 10 масштабов на октаву.

Таким образом, непрерывное вейвлет-разложение имеет дело с одним или одновременно двумя временными рядами. Поэтому возникает вопрос, временные ряды каких характеристик подвергать такому анализу? В настоящем исследовании предлагается в качестве таких рядов использовать некоторые характеристики в точках с географическими координатами экстремумов в поле собственных векторов, полученных после компонентного анализа. Первой такой точкой может быть расположение экстремума в районе Исландии, то есть в области Исландского минимума, а вторая определяется расположением экстремума в поле собственного вектора над Украиной. Наиболее простой выбор характеристики – это лапласиан давления, который непосредственно связан с характером циркуляции: для циклонов и барических ложбин он положителен, а для антициклонов и барических гребней – отрицателен. Такой подход позволяет опосредованно учесть изменение синоптической ситуации в районе расположения экстремума в течение рассматриваемого периода.

Анализ результатов

Согласно описанной выше методики, на первом этапе необходимо отдельно разложить с помощью компонентного анализа поля давления над Северной Атлантикой и Украиной. На рис. 2 показаны первые два собственных вектора разложения. В случае Северной Атлантики они описывают 52% и 14% дисперсии поля соответственно, а в случае Европы – 49% и 20%. Как можно видеть, верхняя часть рис. 2 практически полностью совпадает с рис. 1: здесь также присутствуют Североатлантическое колебание и структура "Скандинавия", однако они как бы "обрезаны" с востока. Исключение же из анализа Северной Атлантики над Европой привело к тому, что САК полностью исчезло (нижняя часть рис. 2) и доминирующей является структура "Скандинавия". Поле второго собственного вектора, в свою очередь, характеризуется циклон/антициклоном, с центром несколько северо-западнее Украины.

Таким образом, анализ полей собственных векторов разложения позволяет

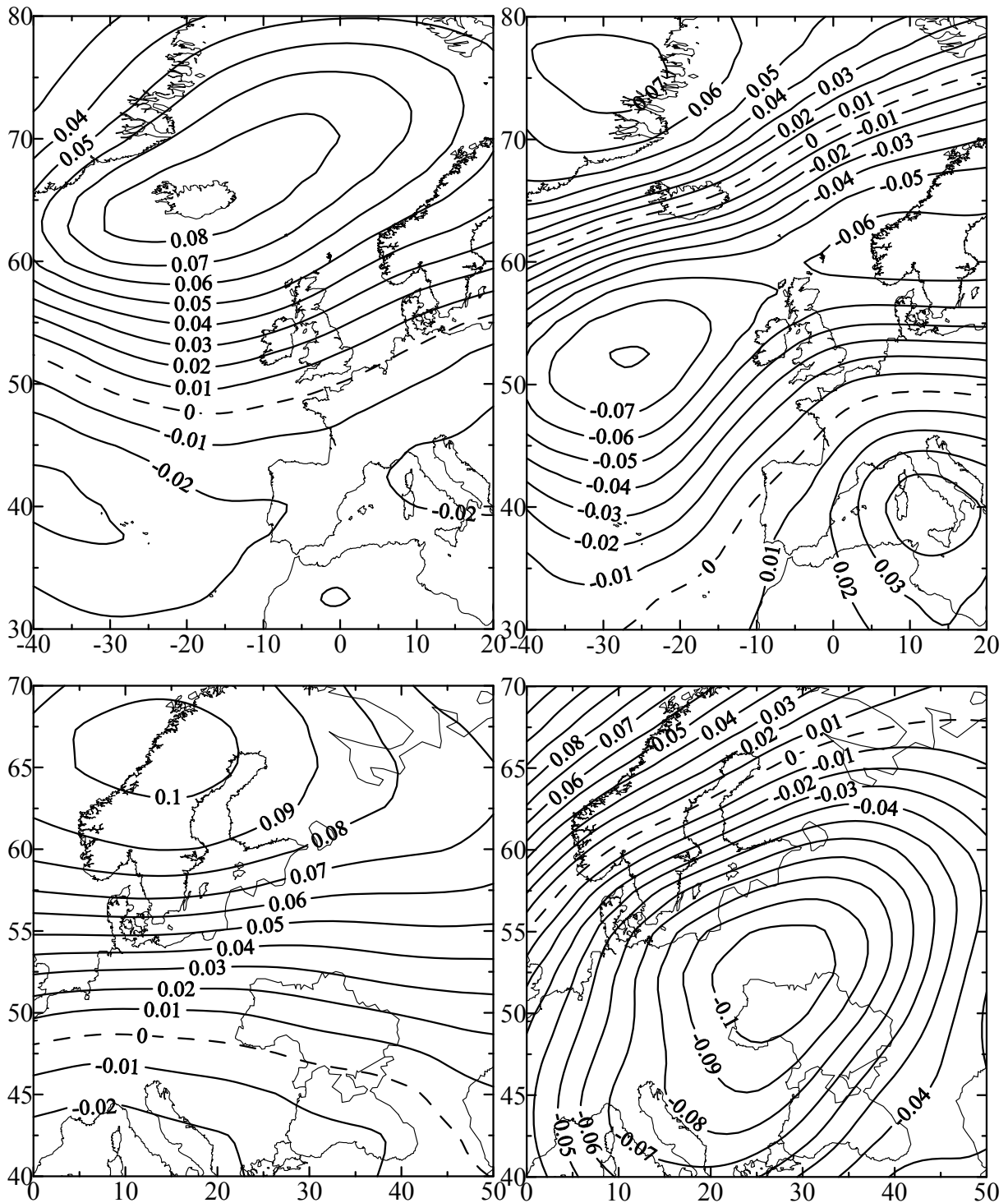
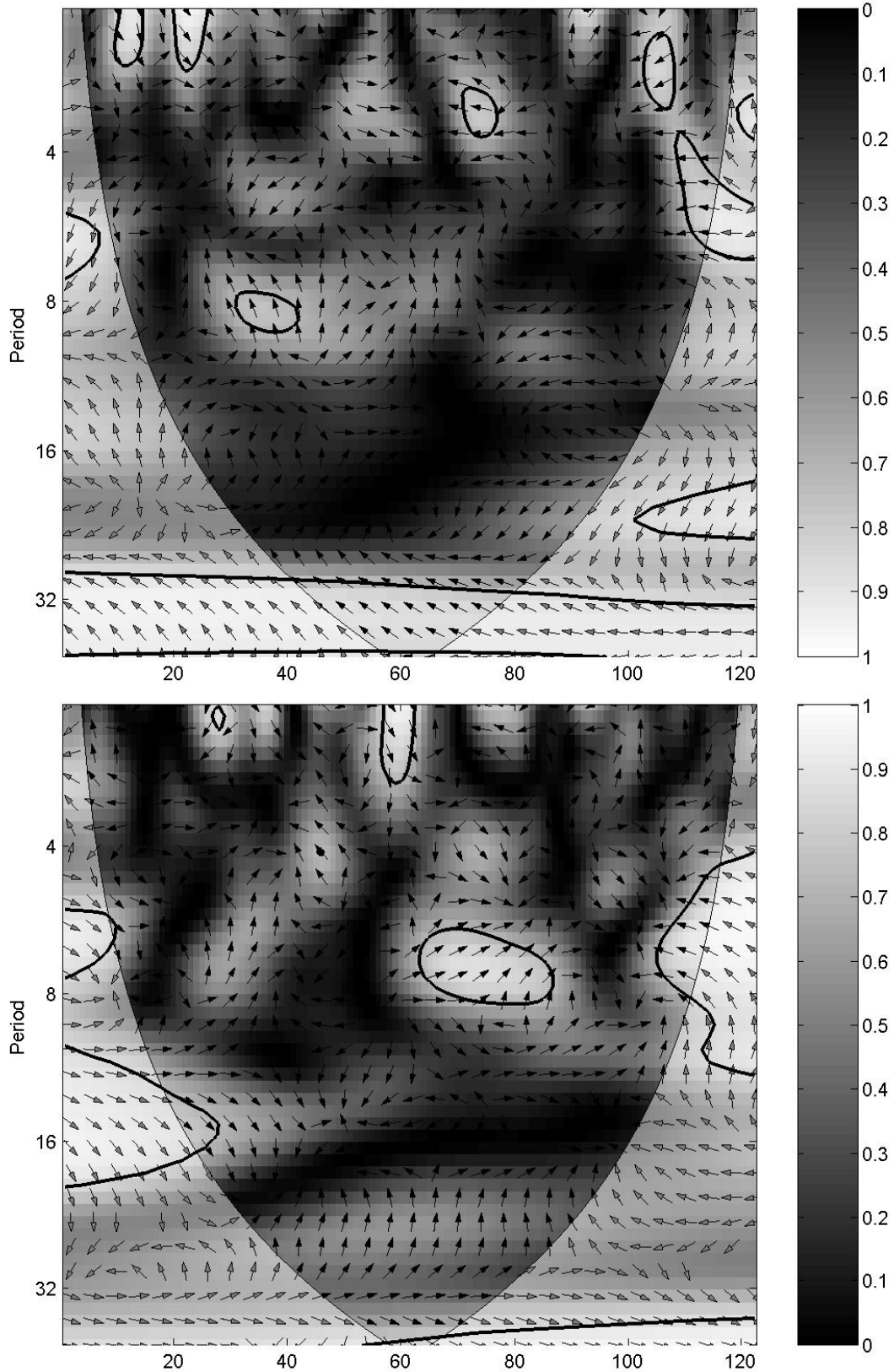


Рисунок 2 – Поля первого (слева) и второго (справа) собственных векторов разложения поля давления для разных географических районов за период 14/11/04-15/03/05.

выбрать географические точки, в которых наблюдаются экстремумы этих векторов. В Северной Атлантике эти точки имеют координаты 20° з.д., 65° с.ш. и $37,5^{\circ}$ з.д., 40° с.ш., а над Европой $27,5^{\circ}$ в.д. и $52,5^{\circ}$ с.ш. В этих точках рассчитывались лапласианы давления для каждого суток указанного периода и к полученным временным рядам применялся вейвлет-анализ отдельно для двух пар: Исландский минимум – Украина и Азорский максимум – Украина; результаты этого анализа представлены на рис. 3.



Относительная фаза показана стрелками (стрелки вправо – два ряда в фазе, влево – в противофазе, вверх – первый опережает второй). Воронка депрессии показана с обеих сторон рисунка. Ось x – порядковый номер суток, начиная с 14 ноября 2004 г.

Рисунок 3 – Вейвлет-когерентность между временными рядами лапласианов давления в Исландском минимуме и Украине (вверху) и в Азорском максимуме и Украине (внизу). Уровень значимости 5% показан жирными линиями.

Как говорилось ранее, сосредоточим внимание только на тех процессах, период которых составляет приблизительно 4-8 суток, что соответствует синоптическому масштабу.

Для пары Исландский минимум – Украина (верхняя часть рис. 3) в частотно-временном пространстве можно найти три зоны со значимой вейвлет-когерентностью между изменениями лапласианов давления на синоптическом масштабе. Во-первых, с 14 по 25 декабря 2004 г. значимая вейвлет-когерентность наблюдалась для периода около 8 суток, причем сначала изменения отмечались в районе Исландского минимума, а спустя приблизительно 4 суток аналогичные изменения прослеживались и над Украиной. Во-вторых, с 23 по 29 января 2005 г. также отмечалась значимая вейвлет-когерентность, однако изменения лапласианов с периодом чуть менее 4 суток были в противофазе. Наконец, в марте 2005 г. вейвлет-когерентность была значима в диапазоне периодов от 4 до 8 суток, однако часть этой зоны подвержена влиянию воронки депрессии, в связи с чем этот результат нельзя считать полностью достоверным. Также, в марте 2005 г. приблизительно в том же диапазоне периодов отмечалась зона значимой вейвлет-когерентности для пары Азорский максимум – Украина. Так как в обоих случаях наблюдалась противофаза между сигналами, то можно предположить, что процессы в районе Исландии и Азорских островов в марте 2005 г. были подобными друг другу. С другой стороны, с 15 января по 7 февраля 2005 г. для пары Азорский максимум – Украина регистрируется зона значимой вейвлет-когерентности для периода около 8 суток, причем отмечается квазисинфазность сигналов, т.е. синоптический процесс над Азорскими островами изменялся синхронно с процессом над Украиной.

Выводы

Описанный в настоящей работе подход оказался вполне действенным средством для выявления взаимосвязи между синоптическими процессами над территориями, расположенными на значительном удалении друг от друга. Здесь важно отметить тот факт, что он позволяет определить взаимосвязь именно между процессами синоптического масштаба, т.е. продолжительностью 4-8 суток, а в контексте влияния Североатлантического колебания на процессы над Украиной это является важным результатом, так как в большинстве предыдущих научных исследований основной упор делался на месячных индексах САК. Более того, анализ суточных индексы САК не предоставляет необходимую информацию о синоптической ситуации [5]. Проведенный здесь анализ показал, что далеко не все, что происходит в атмосфере Северной Атлантики оказывает сколько-нибудь существенное влияние на Украину, что вследствие большой удаленности этих географических регионов выглядит вполне естественным. Однако существуют периоды времени, когда влияние Северной Атлантики можно считать значимым.

Тем не менее, остается открытыми вопросы о том, какими именно были синоптические процессы над Северной Атлантикой и Украиной, когда их связь была значимой, а также что приводит к тому, что эта связь становится значимой. С нашей точки зрения, ответ на первый вопрос получить легко, для чего достаточно проанализировать синоптическую ситуацию в Атлантико-Европейском секторе, однако вероятность того, что может существовать аналогичная синоптическая ситуация, но связь между процессами окажется незначимой, достаточно велика. Другими словами, наличие связи между процессами над Северной Атлантикой и Украиной обеспечивает не определенная синоптическая ситуация, а, что вероятнее, более глобальный процесс. Именно в этом ключе могут быть направлены последующие исследования по этому вопросу, причем подходы к решению могут быть очень разнообразны: от исследования полей потенциальной завихренности до расчета обобщенных показателей, среди которых могут быть и характеристики локальной энергетики атмосферы.

Список литературы

1. Barnston A.G., Livezey R.E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // *Mon. Wea. Rev.*, 1987. – V. 115. – P. 1083–1126.
2. Hurrell J.W. Influence of variations in extratropical wintertime teleconnections on northern hemisphere temperature // *Geophys. Res. Lett.*, 1996. – V. 23. – P. 665–668.
3. Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series // *Nonlin. Processes Geophys.*, 2004. – V. 11. – P. 561–566.
4. Loboda N.S., Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Lovett L. Using non-decimated wavelet decomposition to analyse time variations of North Atlantic Oscillation, eddy kinetic energy, and Ukrainian precipitation // *J. Hydrol.*, 2006. – V. 322. – P. 14–24.
5. Benedict J.J., Lee S., Feldstein S.B. Synoptic view of the North Atlantic Oscillation // *J. Atmos. Sci.*, 2004. – V. 61. – P. 121–144.
6. Добешу И. Десять лекций по вейвлетам: Пер. с англ. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.
7. Хохлов В.Н., Романова А.В. Повторяемость блокирующих ситуаций над Европой в начале 21-го века // *Метеорологія, кліматологія та гідрологія*, 2005. – Вип. 49. – С. 82–88.
8. Torrence C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1998. – V. 79. – P. 61–78.
9. Farge M. Wavelet transforms and their application to turbulence // *Annual Rev. Fluid Mech.*, 1992. – V. 24. – P. 395–457.
10. Torrence C., Webster P. Interdecadal changes in the ENSO-monsoon system // *J. Climate*, 1999. – V. 12. – P. 2679–2690.

Вейвлет-аналіз зв'язку синоптичних процесів над Північною Атлантикою та Україною.

Хохлов В.М., Романова Г.В., Меньшова Ю.В.

Описується методика, що дозволяє виявити зв'язок між синоптичними процесами над Північною Атлантикою та Україною. Такий підхід ґрунтується на спільному використанні компонентного аналізу та безперервного вейвлет-перетворення. Показано, що у певні періоди часу синоптичні процеси над Північною Атлантикою та Україною розвиваються когерентно.

Ключові слова: Вейвлет, компонентний аналіз, Північноатлантичне коливання.

Wavelet analysis of linkage between synoptic processes of North Atlantic and Ukraine.

Khokhlov V.N., Romanova A.V., Menshova Yu.V.

Methodology that allows revealing a linkage between synoptic processes of North Atlantic and Ukraine is described. Such an approach is based on the joint use of principal component analysis and continuous wavelet transform. It is shown that synoptic processes of North Atlantic and Ukraine are coherent during some time interval.

Key words: wavelet, principal component analysis, North Atlantic Oscillation