

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
Одеський державний екологічний університет

**МЕТЕОРОЛОГІЯ, КЛІМАТОЛОГІЯ  
ТА ГІДРОЛОГІЯ**

МІЖВІДОМЧИЙ НАУКОВИЙ ЗБІРНИК УКРАЇНИ

Заснований у 1965 р.

**В И П У С К 51**

**Одеса  
ТЕС  
2010**

**А.В. Романова, В. Н. Хохлов**, д. геогр. н.  
Одесский государственный экологический университет

## **ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОЗОНА НАД ЕВРОПОЙ, ВЫЗВАННЫЕ СЕВЕРОАТЛАНТИЧЕСКИМ КОЛЕБАНИЕМ**

Исследуются пространственные изменения общего содержания озона над Европой вследствие смены развития синоптической ситуации, связанной с Североатлантическим колебанием (САК), с помощью перекрестного вейвлет-преобразования. Показывается, что вблизи центра действия, связанного с САК, изменения общего содержания озона максимальны и проявляются сразу же после изменения синоптической ситуации.

### 1. Введение

Когда рассматриваются динамические причины, определяющие изменения общего содержания озона (ОСО) над некоторым географическим районом, как правило, принимаются во внимание два основных процесса. Во-первых, ОСО меняется вследствие переноса озона из других районов. Например, Крейльсон и др. [1] указали на то, что режим течений, связанный с положительной фазой Североатлантического колебания (САК) вызывает перенос озона с восточной части Северной Америки через Северную Атлантику на Европу. Отметим, что этот динамический процесс имеет место главным образом в тропосфере. Во-вторых, ОСО в умеренных широтах изменяется при перемещении барических объектов, что, в свою очередь, связано с колебаниями высоты тропопаузы. Шуберт и Мунтяну [2] показали, что имеет место корреляционная связь между изменчивостью ОСО и высоты тропопаузы, а именно, в умеренных широтах большие концентрации озона наблюдаются при более высоком давлении на уровне тропопаузы. Аппенцеллер и др. [3] представили карты взаимной корреляции между средним давлением на уровне тропопаузы зимой и индексом САК. Оказалось, что во время положительной его фазы давление на уровне тропопаузы больше в высоких и меньше в умеренных широтах, что естественно для хорошо выраженных Исландского минимума и Азорского максимума. Соответственно, ОСО зимой над Швейцарией (п. Ароза) уменьшается, а над Исландией – увеличивается.

Хорошо известно, (см., например, [4]), что САК описывается колебанием давления на уровне моря между субтропическим антициклоном над Азорскими островами и околполярным циклоном над Исландией. Положительной фазе САК соответствуют сильные западные потоки и давление ниже нормы в высоких широтах Северной Атлантики и ниже нормы – над центральной Атлантикой и Западной Европой; обратная

картина имеет место при отрицательной фазе САК. Другими словами, в месяц или зиму с положительными значениями индекса САК Исландский минимум и Азорский максимум располагаются на своих обычных местах, что и приводит к вышеупомянутым изменениям ОСО над Европой. В частности, ОСО над Швейцарией увеличивается зимой с отрицательной фазой САК и наоборот.

Следует отметить, что крупномасштабная циркуляция является только одним из многих факторов, вызывающих изменения ОСО на внутри- и межгодовых временных масштабах; часто исследовались изменения, определяемые влиянием солнечной активности или экваториального квази-двухлетнего колебания зонального ветра (напр., [5, 6]). С другой стороны, только в небольшом количестве работ рассматривались флуктуации ОСО с периодами, сопоставимыми с синоптическим масштабом движений [7-9]. Этот дефицит работ обусловлен, к тому же, высоким уровнем зашумленности данных, что является обычным для временных рядов в умеренных широтах, в том числе ОСО и индекса САК. Тем не менее, задокументированы колебания индекса САК на квази-синоптических (4-8 суток) временных масштабах [10, 11], логично предположить, что могут иметь место некоторые изменения ОСО, вызванные процессами синоптического масштаба, связанными с САК. Поэтому целью настоящей работы является идентификация пространственных структур ОСО над Европой в ответ на изменения синоптической ситуации, связанной с САК.

## 2. Материалы и методы исследования

В настоящей работе рассматривались временные ряды ОСО холодного периода (с декабря по март) с 1996 по 2005 гг. Данные осреднены за сутки для пространственной сетки с ячейками в  $1^\circ \times 1,25^\circ$  (широта-долгота), ограниченными долготами  $15^\circ$  з.д. и  $45^\circ$  в.д. и широтами  $35^\circ$  с.ш. и  $60^\circ$  с.ш. Среднесуточные данные об ОСО анализировались совместно с суточным индексом САК, рассчитанным по методу, предложенному Барнстоном и Лайвзи [12]. Также в работе осуществлялся компонентный анализ поля геопотенциальных высот АТ-500 гПа за определенные месяцы, например, январь отдельного года, или за весь холодный период конкретного года в узлах сетки с шагом  $2,5^\circ$  по широте и долготе для области, показанной на рис. 1 справа.

На рис. 1 слева показаны временные изменения индекса САК и ОСО в пункте Ароза (Швейцария) для холодного периода 2002-03 гг. Прежде всего, между этими временными рядами не отмечается какая-нибудь видимая когерентность (коэффициент корреляции равен 0,09), что противоречит выводам, представленным во Введении. С нашей точки зрения, это может быть объяснено следующим образом. Во-первых, временные ряды среднесуточных данных очень зашумлены, как

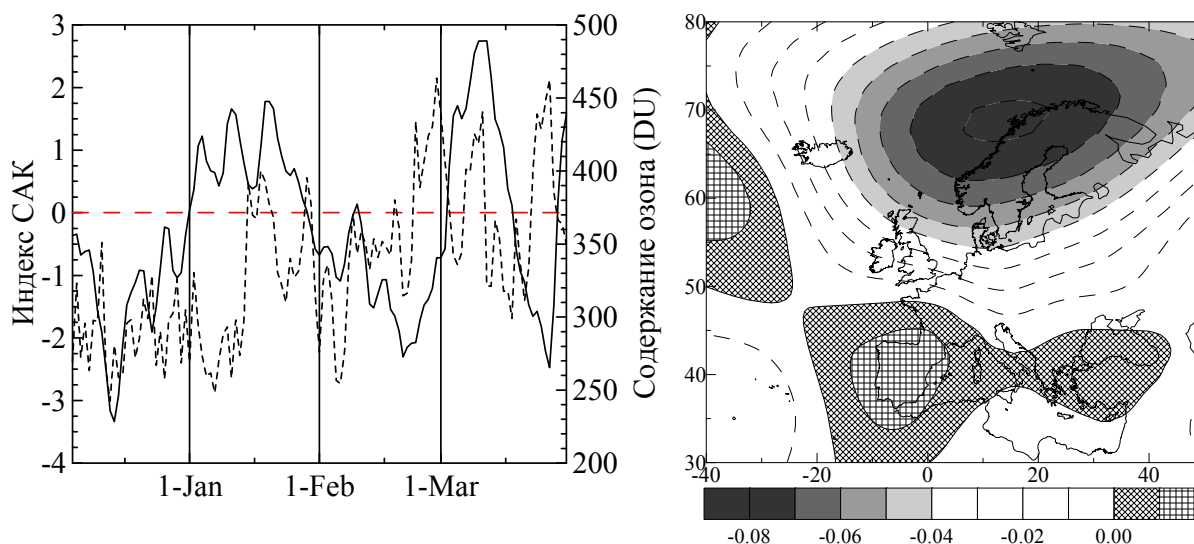


Рис. 1 – Индекс САК и общее содержание озона (пунктир) в Арозе (слева) и карта первого собственного вектора (справа) высоты АТ-500 гПа (24% изменчивости) холодного периода 2002-03 гг.

отмечалось выше, и не удивительно, что они не коррелируют между собой. Далее, отклик ОСО на изменения давления на уровне тропопаузы не немедленный, вследствие чего эти изменения, связанные с синоптическим масштабом времени, должны проявиться с некоторой задержкой. Наконец, аргументом в пользу отрицательной корреляции для среднемесячного ОСО в Арозе и индексов САК было «климатическое» положение центров диполя (т.е. такое, которое определяется по достаточно большому количеству лет), связанных с САК, но в течение холодного сезона антициклон над Азорскими островами и циклон вблизи Исландии часто смещаются со своих обычных «климатических» позиций. Например, отрицательная фаза САК в 2002-03 гг. (см. карту первого собственного вектора справа на рис. 1) привела к тому, что фактически над Арозой наблюдалось малоизменчивое барическое поле, связанное с САК, и поэтому САК не определяло никаких более-менее значимых изменений давления на уровне тропопаузы над Швейцарией.

Следовательно, обычные методы, такие как корреляционный анализ или анализ канонических корреляций, не могут дать удовлетворительных результатов. Требуемый метод должен, во-первых, тщательно отфильтровать высокочастотные флуктуации во временных рядах, но не нарушить их статистическую устойчивость, и, во-вторых, предоставить результаты, относящиеся к отдельным промежуткам времени внутри всего рассматриваемого периода. С нашей точки зрения, перекрестное вейвлет-преобразование полностью отвечает этим требованиям. Основные положения этой методики подробно описаны в [13, 14], а процедура заключается в следующем:

- 1) в каждой точки пространственной сетки (всего их, как не трудно

подсчитать, 1274) для ОСО выполнялось перекрестное вейвлет-преобразование;

2) для области в частотно-временном домене, где энергия перекрестного вейвлета выше 5% уровня значимости, на квази-синоптическом временном масштабе рассчитывалась средняя энергия перекрестного вейвлета для каждой точки сетки;

3) для этой же области локальная относительная фаза переводилась во временную задержку (эта очень просто сделать, так как известен период), и средняя временная задержка рассчитывалась для каждой точки сетки;

4) наконец, эти средние величины представлялись в виде карт.

### 3. Результаты исследования и их анализ

Прежде всего отметим, что почти для всех холодных сезонов с 1996 по 2005 гг. удалось найти периоды времени, когда имела место значимая энергия перекрестного вейвлета на масштабах времени, сопоставимыми с синоптическими. Естественно, что вейвлет-когерентность наблюдалась не на протяжении всего холодного сезона, а только в течение определенного, как правило, непродолжительного, времени. Например, в 2002-03 гг. она имела место три раза – в январе, феврале и марте – в течение около двух недель. Эта особенность характерна для всех точек сетки, так что может рассматриваться, до некоторой степени, как явление, описывающее влияние САК на изменчивость ОСО на синоптическом масштабе времени. Также интересен факт, что в январе 2003 г., во время положительной фазы (см. рис. 1), изменения индекса САК опережали на 4 суток изменения ОСО в Арозе, а во время отрицательной фазы в феврале 2003 г. эти два сигнала были синфазными. Поэтому можно предположить, что фильтрация высокочастотных колебаний, обеспеченная вейвлет-преобразованием, позволила извлечь из среднесуточных временных рядов характерные особенности, подобные полученным для среднемесячных временных рядов.

Наконец, желательно провести анализ пространственных изменений ОСО совместно с некой мерой, описывающей изменения синоптической ситуации. Здесь мы используем карты первого собственного вектора для высоты поверхности АТ-500 гПа, рассчитанного отдельно для января и февраля 2003 г., когда наблюдалась значимая энергия перекрестного вейвлета. Эти карты достаточно хорошо представляют чередование фаз САК. Например, положительная фаза САК имела место преимущественно в январе 2003 г. (см. рис. 1), и поле первого собственного вектора на рис. 2а, с определяется диполем с отрицательной аномалией около Исландии и положительной – над западной частью Средиземного моря, что хорошо согласуется с положением центров этого диполя в классической работе Барнстона и Лайвзи [12]; наоборот, когда в феврале

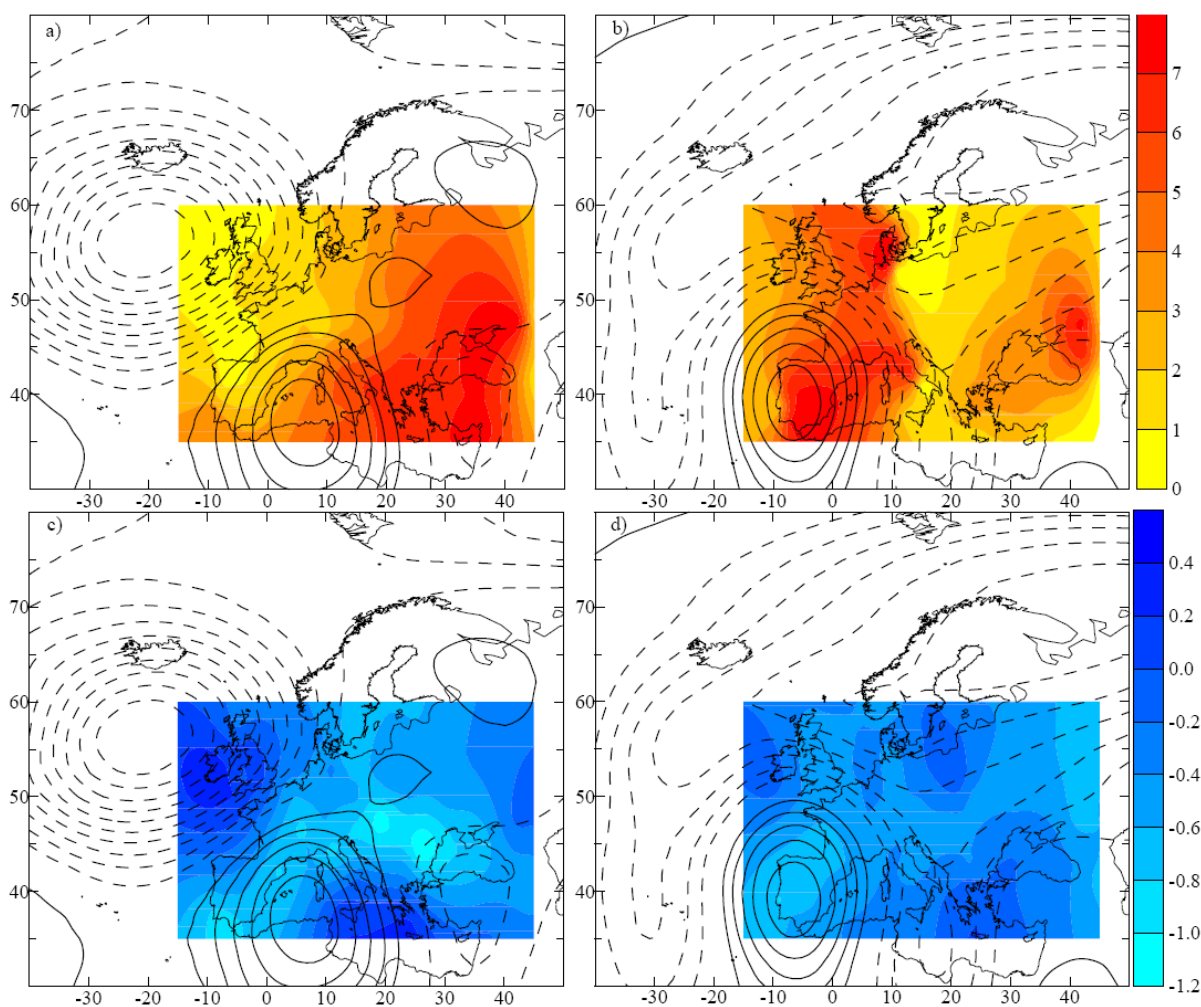


Рис. 2 – Пространственное распределение временных задержек (сутки) отклика общего содержания озона на изменения САК для периодов около 8 суток в январе (а) и феврале (b) 2003 г., а также энергии перекрестного вейвлета (с, d) для этих же периодов и месяцев. Временные задержки и энергии перекрестного вейвлета осреднялись для области в частотно-временном домене, где энергия перекрестного вейвлета выше 5% уровня значимости. Карта первого собственного вектора поля высот поверхности АТ-500 гПа (сплошные линии – положительные, пунктир – отрицательные) показана для января (а, с; описывает 37% дисперсии) и февраля (b, d; описывает 32% дисперсии) 2003 г.

наблюдалась отрицательная фаза, отрицательная аномалия сдвинулась в направлении Скандинавии (рис. 2b, d), а это, по сути, показывает отрицательную фазу САК.

Пространственное распределение средней временной задержки и энергий перекрестного вейвлета (рис. 2) подтверждает правильность нашего выбора. Действительно, особенности пространственного распределения локальных временных задержек изменений ОСО в ответ на изменения индекса САК в целом совпадают с изменением синоптической ситуации. В январе, вблизи главной аномалии поля давления в Северной Атлантике, ОСО изменяется почти когерентно с барическим полем (временная задержка меньше 2 суток); чем дальше эта аномалия, тем

больше становится временная задержка и составляет почти 8 суток над восточным Средиземноморьем и Черным морем. В феврале картина аналогичная и своеобразная ложбина распространяется с Балтийского моря на центральную часть Средиземного моря. Естественно, нельзя рассчитывать на полное совпадение, но нужно, однако, заметить, что изменчивость барического поля анализируется при помощи только первого собственного вектора. Пространственное распределение энергии перекрестного вейвлета подтверждает вышесказанное – максимумы этой энергии имеют место вблизи основной отрицательной аномалии поля первого собственного вектора, связанной с САК, а минимумы располагаются внутри аномалий обратного знака (рис. 2с, d). Подводя итоги, можно сказать о том, что результаты на рис. 2 в целом соответствуют полученным ранее Аппенцеллером и др. [3], за исключением того, что они описывают изменчивость на квази-синоптическом временном масштабе.

#### 4. Выводы

Перекрестное вейвлет-преобразование, примененное к временным рядам общего содержания озона над Европой и индекса САК, оказалось очень эффективным средством выявления когерентной изменчивости этих рядов на временных и пространственных масштабах, определяемых развитием синоптической ситуации. Следует отметить, что такая изменчивость является типичной для Североатлантического колебания.

Наиболее яркой особенностью является то, что локальные временные задержки изменчивости ОСО над Европой зависят, в определенной степени, от расстояния от центра действия атмосферы, связанного с САК, а энергия перекрестного вейвлета определяется знаком аномалии давления в основном центре действия в Северной Атлантике. По нашему мнению, представленные результаты могут рассматриваться как подтверждение важности Североатлантического колебания для процесса пространственно-временной изменчивости общего содержания озона над Европой на синоптическом временном масштабе.

#### **Список литературы**

1. Creilson J.K., Fishman J., Wozniak A.E. Intercontinental transport of tropospheric ozone: a study of its seasonal variability across the North Atlantic utilizing tropospheric ozone residuals and its relationship to the North Atlantic Oscillation // *Atmos. Chem. Phys.* – 2003. – Vol. 3. – P. 2053–2066.
2. Schubert S.D., Munteanu M.-J. An analysis of tropopause pressure and total ozone correlations // *Mon. Wea. Rev.* – 1988. – Vol. 116. – P. 569-582.
3. Appenzeller C., Weiss A.K., Staehelin J. North Atlantic Oscillation modulates total ozone winter trends // *Geophys. Res. Lett.* – 2000. – Vol. 27. – P. 1131–1134.
4. Wanner H., Brönnimann S., Casty C., Gyalistras D., Luterbacher J., Schmutz C.,

*Stephenson D., Xoplaki E.* North Atlantic Oscillation- concepts and studies // *Surv. Geophys.* – 2001. – Vol. 22. – P.321–382.

5. *Cordero E.C., Nathan T.R.* A new pathway for communicating the 11-year solar cycle signal to the QBO // *Geophys. Res. Lett.* – 2005. – Vol. 32. – L18805.

6. *Jiang X., Pawson S., Camp C.D., Nielsen J.E., Shia R.-L., Liao T., Limpasuvan V., Yung Y.L.* Interannual variability and trends of extratropical ozone. Part I: Northern Hemisphere // *J. Atmos. Sci.* – 2008. – Vol. 65. – P. 3013–3029.

7. *Дорохов В.М., Попова Т.Е., Гутайл Ф., Поммеро Ж.-П.* Исследование отрицательной аномалии общего содержания озона в области восточносибирского озонного максимума в зимне-весенний период 1995 г // *Метеорология и гидрология.* – 1996. – № 6. – С. 53–62.

8. *Sych R.A., Matafonov G.K., Belinskaya A.Ju., Ferreira N.J.* The periodic spatial-temporal characteristics variations of the total ozone content // *J. Atmos. Solar-Terrest. Phys.* – 2005. – Vol. 67. – P. 1779–1785.

9. *Ruzmaikin A., Santee M.L., Schwartz M.J., Froidevaux L., Pickett H.* The 27-day variations in stratospheric ozone and temperature: New MLS data // *Geophys. Res. Lett.* – 2007. – Vol. 34. – P. L02819.

10. *Feldstein S.B.* The timescale, power spectra, and climate noise properties of teleconnection patterns // *J. Climate*, 2000. – Vol. 13. – P. 4430–4440.

11. *Rivière G., Orlanski I* Characteristics of the Atlantic storm-track eddy activity and its relation with the North Atlantic Oscillation // *J. Atmos. Sci.* – 2007. – Vol. 64. – P. 241–266.

12. *Barnston A.G., Livezey R.E.* Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // *Mon. Wea. Rev.* – 1987. – Vol. 115. – P. 1083–1126.

13. *Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S.* Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series // *Nonlin. Processes Geophys.* – 2004. – Vol. 11. – P. 561–566.

14. *Хохлов В.Н., Романова А.В., Меньшова Ю.В.* Вейвлет-анализ связи синоптических процессов над Северной Атлантикой и Украиной // *Вісник ОДЕКУ.* – 2007. – Вип. 4. – С. 135-145.

**A.V. Romanova, V.N. Khokhlov**

## **SPATIOTEMPORAL VARIATIONS OF TOTAL OZONE OVER EUROPE INDUCED BY NORTH ATLANTIC OSCILLATION**

Spatial patterns over Europe in total ozone response to weather pattern changes associated with the North Atlantic Oscillation (NAO) is investigated using the cross wavelet transform. It is shown that near a centre of action associated with the NAO the changes of total ozone are maximal and become apparent immediately after the changes in the weather pattern.