

УДК 551.571.33

Проявление экваториальных процессов в изменчивости водяного пара на территории Европы

О.Г. Хуторова, В.Е. Хуторов, Г.М. Тептин*

Казанский федеральный университет
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18

Поступила в редакцию 25.01.2019 г.

Исследована изменчивость временных рядов приземного парциального давления водяного пара на территории Европы за многолетний период. Установлено, что вклад флуктуаций с временными масштабами от 2 до 5 лет составляет от 35 до 60% дисперсии межгодовых вариаций. Найдены пространственные зависимости локальной когерентности гармоник с масштабами 2–4 индекса Nino3.4 и парциального давления водяного пара. Обнаружено, что корреляция этих вариаций достигает 0,7–0,9. Показано, что значительную роль в механизме переноса энергии экваториальных процессов в средние широты играют планетарные волны, распространяющиеся с востока на запад. Их энергия начинает усиливаться зимой в год Эль-Ниньо, а максимум достигается спустя год.

Ключевые слова: приземное парциального давления водяного пара, Эль-Ниньо – Южное колебание, планетарные волны; surface water vapor partial pressure, El Niño – Southern Oscillation, planetary waves.

Водяной пар играет важную роль в термодинамике атмосферы и в физике атмосферного аэрозоля [1]. По оценкам [2], его доля в парниковом эффекте составляет до 50%, доля облачности, тоже связанной с атмосферным влагосодержанием, – 25%. Вариации водяного пара так же характеризуют изменчивость климата [3, 4], как тренды температуры и осадков [5].

В работе [6] показана когерентность вариаций интегрального влагосодержания и парциального давления водяного пара, выявлена их связь с макроциркуляционными процессами. Авторы предположили влияние на межгодовую изменчивость атмосферного влагосодержания экваториальной динамики, наиболее ярким проявлением которой считают Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК). Чередование теплых условий Эль-Ниньо и холодных условий Ла-Нинья представляет собой сильнейшее межгодовое колебание глобальной климатической системы. События Эль-Ниньо характеризуются поверхностным потеплением в тропической части Тихого океана и ослаблением экваториальных пассатов, которые происходят каждые несколько лет. Такие условия сопровождаются изменениями атмосферной и океанической циркуляций, влияющими на глобальный климат, морские и наземные экосистемы. В том числе Эль-Ниньо оказывает существенное воздействие на динамику атмосферы средних и высоких широт [7, 8].

В работе ставится задача выявить возможное проявление экваториальных процессов в изменчивости влагосодержания атмосферы на территории Европы.

В качестве характеристики ЭНЮК обычно используют индекс аномалий температуры поверхности океана Nino3.4. Ежемесячные значения индекса доступны с 1950 г. по настоящее время [9]. Индекс представляет собой аномалии средней температуры поверхности моря в области, ограниченной -5 и 5° ю.ш. и 170 и 120° з.д. Этот индекс имеет значительную изменчивость во временных масштабах Эль-Ниньо [8]. Событие Эль-Ниньо или Ла-Нинья считается наступившим, если 5-месячное скользящее среднее индекса Nino3.4 превышает $+0,4^\circ\text{C}$ для Эль-Ниньо или $-0,4^\circ\text{C}$ для Ла-Нинья в течение, по крайней мере, 6 мес подряд.

В [6] были построены длинные ряды приземного влагосодержания на территории Европы, которое определялось по метеопараметрам. Восьмисрочные измерения относительной влажности и температуры использовались для оценки парциального давления водяного пара e . Привлекались данные различных европейских метеослужб [10], для территории России – архив данных Росгидромета [11].

Считается, что большая часть энергии ЭНЮК находится в диапазоне 2–7 лет [7, 12]. С помощью полосовой фильтрации рядов парциального давления водяного пара был установлен вклад флуктуаций в данном диапазоне, он составляет от 35 до 60% дисперсии среднегодовых величин e в зависимости от пункта наблюдений, что сопоставимо с вкладом линейного тренда, который обычно применяют для анализа межгодовых вариаций [5].

Мы искали когерентные события одинаковых временных масштабов в рядах влагосодержания и индекса Nino3.4, анализируя их вейвлет-спектры. Вейвлет-спектр, полученный с помощью материнской функции Морле, выделяет квазипериодический сигнал нужного временного масштаба и локализует его

* Ольга Германовна Хуторова (olga.khutorova@kpfu.ru); Владислав Евгеньевич Хуторов (pri870@yandex.ru); Герман Михайлович Тептин (guermanteptin@kpfu.ru).

амплитуду и фазу во времени (метод развит в [13] для поиска когерентных вариаций в рядах атмосферных параметров и примесей). В полученных вейвлет-спектрах, привязанных к одному периоду времени, выбраны значимые с вероятностью не менее 90% возмущения, выявленные одновременно в рядах влагосодержания и индекса Nino3.4. Известно, что при наличии периодического процесса его фаза не меняется во времени [14]. Главный критерий отбора когерентных вариаций – распределение разности фазовых спектров для данного временного масштаба – имеет узкий максимум в течение времени превышения амплитудными спектрами 90% уровня значимости. Уровень значимости оценивался, согласно [15], по критерию хи-квадрат с использованием модели белого шума. Постоянство фазовых характеристик свидетельствует о когерентных процессах, причем вейвлет-преобразование локализует эти процессы во времени. Таким образом устанавливались временные масштабы вариаций, их амплитуды и временная привязка.

На рис. 1 приведен пример амплитудных вейвлет-спектров парциального давления водяного пара (Норвегия) и индекса Nino3.4 вместе с их взаимным фазовым спектром для колебаний, значимых с вероятностью 90%, с временными масштабами 2,5; 3 и 4 года.

Вейвлет-преобразование временных рядов показывает, что влагосодержание, так же как и индекс Nino3.4, содержит значимые квазипериодические вариации с временными масштабами 2–5 и 6–8 лет.

Видно, что вариации с масштабами 2–3 года более мощные, но они не существуют постоянно, а возникают и затухают, иногда одновременно проявляются несколько мод. Аналогичные синхронные вариации были обнаружены в рядах приповерхностной температуры на всей территории Европы. Когерентность вариаций метеопараметров на территории Европы с индексом Nino3.4 тоже нерегулярна, она возникает, продолжается в течение нескольких лет и затем пропадает.

Для оценки уровня линейной связи обнаруженных квазипериодических вариаций временных рядов влагосодержания в отдельные периоды мы исследовали локальную вейвлет-корреляцию [16] вариаций с масштабами 2–4 года индекса Nino3.4 и парциального давления водяного пара на европейской территории России. Плотная сеть станций, однородные по качеству и временному охвату данные о влажности позволили построить пространственные зависимости фазовых и корреляционных характеристик связи влагосодержания и индекса Nino3.4. К сожалению, доступные длинные ряды влагосодержания на территории Западной Европы имеют значительно меньшую пространственную плотность, что не позволило включить их в анализ.

Обнаружено, что в течение периодов значимости вариаций каждого масштаба корреляция этих вариаций значима с вероятностью 95% и равна 0,7–0,9. Взаимный фазовый спектр во всех событиях указывал на распространение этих вариаций с востока на запад. Характерный пример пространственной

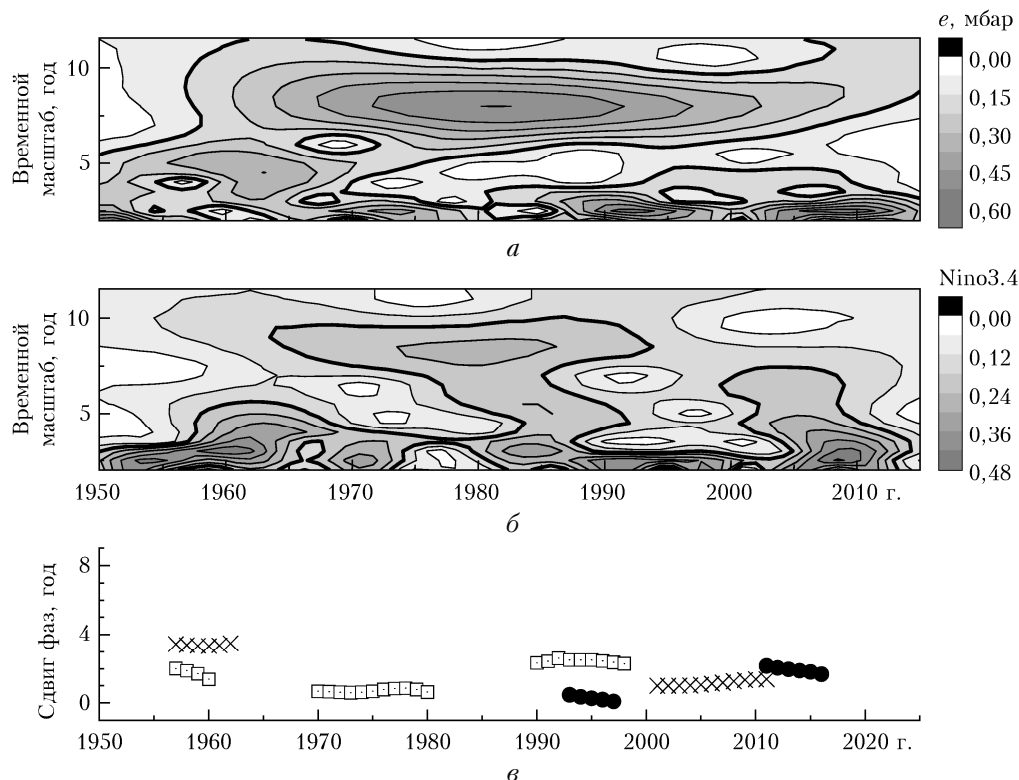


Рис. 1. Амплитудные вейвлет-спектры (уровень 90% значимости показан полужирной линией): *a* – парциального давления водяного пара (Норвегия); *б* – индекса Nino3.4; *в* – их взаимный фазовый спектр для значимых с 90% вероятностью колебаний с временными масштабами 2,5 (□); 3 (●) и 4 (×) года

зависимости локальной вейвлет-корреляции и взаимного фазового сдвига вариации с масштабом 3 года индекса Nino3.4 и парциального давления водяного пара в течение 2008–2016 гг. представлен на рис. 2.

В [17] сделан вывод о наличии воздействия ЭНЮК на Североатлантическое колебание во второй половине XX и начале XXI вв. Это воздействие характеризуется эффектом запаздывания примерно на 2 года. Обратного воздействия с подобной степенью надежности не выявлено. Следовательно, изменчивость атмосферной циркуляции будет определять и поле влагосодержания в Европе.

Обсудим механизм переноса энергии ЭНЮК в средние широты. В [18] предполагается передача энергии ЭНЮК в высокие широты через планетарные волны, в том числе с участием волн Кельвина. А в работе [7] утверждается, что энергия событий Эль-Ниньо передается в средние и высокие широты с помощью волн Россби. В [19] с использованием зимних (ноябрь–март) данных реанализа ERA-Interim для геопотенциала в тропосфере и стратосфере с 1979 по 2016 г. проведен анализ спектров волновых возмущений с зональными числами $1 \leq k \leq 10$. Обнаружено, что в тропосфере тропиков и субтропиков и в субтропической нижней стратосфере энергия распространяющихся на восток волн в годы Эль-Ниньо может быть в 1,5–2 раза больше, чем в годы Ла-Нинья.

Ранее было показано, что в средних широтах обнаруживаются волны, характеристики которых близки к волнам Кельвина, они распространяются на запад, и их периоды составляют 10–60 сут [20]. То есть в средних широтах можно выявить волны Кельвина, и мерой их интенсивности может служить дисперсия синоптических флуктуаций давле-

ния. Для того чтобы найти связь интенсивности волновой активности с ЭНЮК в диапазоне волн Кельвина, мы применили к рядам приземного давления полосовую фильтрацию, получили ряды дисперсии флуктуаций давления в полосе от 10 до 60 сут на территории Европы и сравнили средние значения флуктуаций в периоды Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

Обнаружено, что в периоды Эль-Ниньо, в отличие от периодов Ла-Нинья, зимой волновая активность флуктуаций приземного давления с периодами 10–60 сут возрастает в среднем на 12% относительно среднемноголетних значений зимнего уровня, а летом падает в среднем на 25%. Отметим, что зимой дисперсия синоптических флуктуаций давления в 2–4 раза превышает летнюю, поэтому летнее снижение волновой активности незначимо. Эффект продолжается и на следующий год – через год после Эль-Ниньо волновая активность с периодами 10–60 сут выше в среднем на 15% по сравнению с периодами Ла-Нинья.

Мы оценили интенсивность волновых процессов как аномалии дисперсии синоптических вариаций приземного давления относительно среднемноголетнего уровня за каждый месяц. Во всех рядах аномалий флуктуаций давления были обнаружены синхронные вариации с индексом Nino3.4 с теми же масштабами, что и в рядах приповерхностной температуры и приземного парциального давления водяного пара. Локальная вейвлет-корреляция аномалий флуктуаций давления с индексом Nino3.4 во время существования этих флуктуаций значима с вероятностью не ниже 95% и достигает 0,8–0,9. Пространственные карты взаимного фазового спектра указывают на распространение этих вариаций с востока на запад;

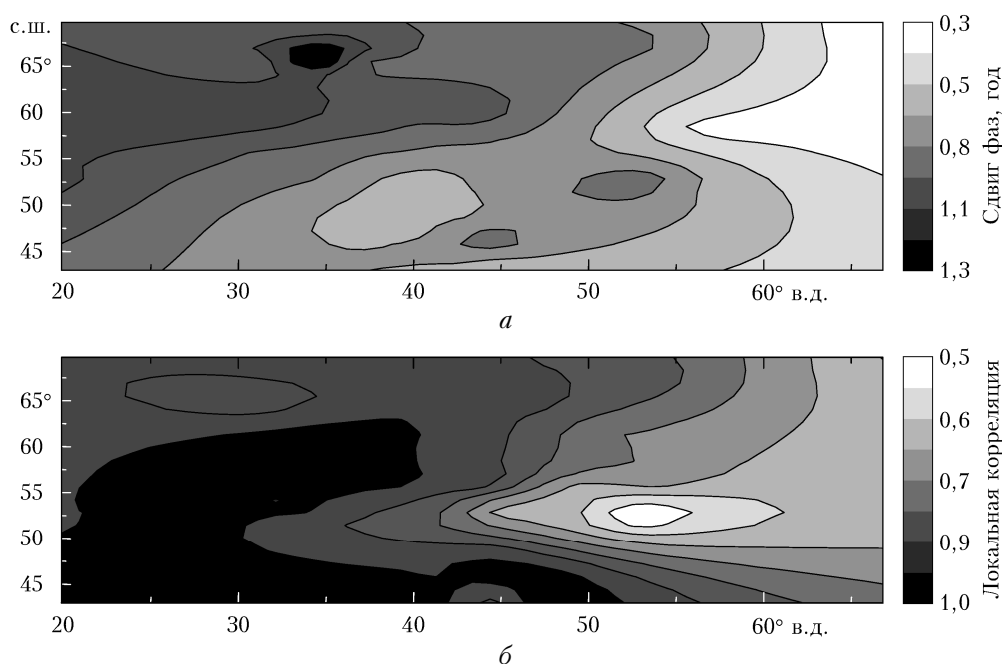


Рис. 2. Пространственная зависимость взаимного фазового сдвига (*a*) и локальной вейвлет-корреляции трехлетней периодичности индекса Nino3.4 и приземного парциального давления водяного пара (*б*) на европейской территории России в течение 2008–2016 гг.

максимум аномалий флуктуаций давления сдвинуто относительно максимума индекса Niño3.4 во всех случаях на величину около 1 года.

Можно сделать заключение о том, что Эль-Ниньо — Южное колебание дает значительный вклад в межгодовую изменчивость влагосодержания на территории Европы, причем важную роль в механизме переноса его энергии играют планетарные волны, распространяющиеся с востока на запад. Их энергия начинает усиливаться зимой в год Эль-Ниньо, а максимум достигается спустя год.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-05-00863).

1. Панченко М.В., Терпугова С.А., Козлов В.С., Польшкин В.В., Яушева Е.П. Годовой ход конденсационной активности субмикронного аэрозоля в приземном слое атмосферы Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 8. С. 678–683.
2. Schmidt G.A., Ruedy R.A., Miller R.L., Laci A.A. Attribution of the present day total greenhouse effect // J. Geophys. Res. 2010. V. 115, N D20106. P. 1–6.
3. Малинин В.Н., Гордеева С.М., Наумов Л.М. Влагосодержание атмосферы как климатообразующий фактор // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 3. С. 243–251.
4. Morland J., Collaud Coen M., Hocke K. Tropospheric water vapor above Switzerland over the last 12 years // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. P. 5975–5988.
5. Переведенцев Ю.П., Васильев А.А., Шанталинский К.М., Гурьянов В.В. Климатические изменения приземных полей атмосферного давления и температуры воздуха в умеренных широтах северного полушария // Метеорол. и гидрол. 2017. № 7. С. 81–93.
6. Хуторова О.Г., Хуторов В.Е., Тептин Г.М. Межгодовая изменчивость приземного и интегрального влагосодержания на территории Европы и атмосферная циркуляция // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 6. С. 432–437; Khutorova O.G., Khutorov V.E., Tepitin G.M. Interannual variability of surface and integrated water vapor and atmospheric circulation in Europe // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 5. P. 486–491.
7. Herceg-Bulić I., Mezzina B., Kucharski F., Ruggieri P., King M.P. Wintertime ENSO influence on late spring European climate: The stratospheric response and the role of North Atlantic SST // J. Climatol. 2017. V. 37 (S1) P. 87–108.
8. Timmermann A., An Soon-Il, Kug Jong-Seong, Jin Fei-Fei, Cai Wenju, Capotondi A., Cobb Kim M., Lengaigne M., McPhaden M.J., Stuecker M.F., Stein K., Wittenberg A.T., Yun Kyung-Sook, Bayr T., Chen Han-Ching, Chikamoto Y., Dewitte B., Dommenges D., Grothe P., Guilyardi E., Ham Yoo-Geun, Hayashi M., Ineson S., Kang Daehyun, Kim Sunyong, Kim WonMoo,

- Lee June-Yi, Li Tim, Luo Jing-Jia, McGregor S., Planton Y., Power S., Rashid H., Ren Hong-Li, Santoso A., Takahashi K., Todd A., Wang Guomin, Wang Guojian, Xie Ruihuang, Yang Woo-Hyun, Yeh Sang-Wook, Yoon Jinho, Zeller E., Zhang Xuebin. El Niño — Southern Oscillation complexity // Nature. 2018. V. 559. P. 535–545.
9. Historical El Niño / La Nina episodes (1950-present) [Electronic resource]. URL: http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml#history.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php (last access: 25.11.2018).
 10. European Climate Assessment & Dataset project [Electronic resource]. URL: <https://www.ecad.eu> (last access: 25.11.2018).
 11. Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. «Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549 [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных> (last access: 25.11.2018).
 12. Llamedo P., Hierro R., de la Torre A., Alexander P. ENSO-related moisture and temperature anomalies over South America derived from GPS radio occultation profiles // J. Climatol. 2017. V. 37. P. 268–275.
 13. Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Исследование мезомасштабных волновых процессов в приземном слое по синхронным измерениям атмосферных параметров и примесей // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2009. Т. 45, № 5. С. 588–596.
 14. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Т. 1, 2. М.: Мир, 1971. 312 с.
 15. Torrence G., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis // Bull. Am. Meteorol. Soc. 1998. V. 79, N 1. P. 61–78.
 16. Безверхний В.А. Развитие метода вейвлет-преобразования для анализа геофизических данных // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2001. Т. 37, № 5. С. 630–638.
 17. Мохов И.И., Смирнов Д.А. Исследование взаимного влияния процессов Эль-Ниньо — Южное колебание и Северо-Атлантического и Арктического колебаний нелинейными методами // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2006. Т. 42, № 5. С. 650–667.
 18. Jevrejeva S., Moore J.C., Grinsted A. Oceanic and atmospheric transport of multiyear El Niño — Southern Oscillation (ENSO) signatures to the polar regions // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. P. L24210. DOI: 10.1029/2004GL020871.
 19. Гурьянов В.В., Елисеев А.В., Мохов И.И., Переведенцев Ю.П. Волновая активность и ее изменения в тропосфере и стратосфере Северного полушария зимой в 1979–2016 гг. // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2018. Т. 54, № 2. С. 133–146.
 20. Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Волновые возмущения локальных и синоптических масштабов по синхронным измерениям атмосферных примесей // Докл. РАН. 2005. Т. 400, № 1. С. 110–112.

O.G. Khutorova, V.E. Khutorov, G.M. Tepitin. Manifestation of equatorial processes in the water vapor variability on the European territory.

The variability of time series of the integral moisture content of the atmosphere and the surface partial pressure of water vapor for the territory of Europe are studied over a long period. It is established that the contribution of fluctuations on time scales from 2 to 5 years is from 35 to 60% of the interannual variance. The spatial dependences of the local coherence of harmonics on the scales of 2–4 Niño3.4 index and the partial water pressure in Europe are found. It is found that the correlation of these variations is 0.7–0.9. It is shown that planetary waves propagating from east to west play a significant role in the energy transfer from equatorial processes to middle latitudes. Their energy begins to increase in winter in the year of El Niño and reaches the maximum in a year.