

## Анализ особенностей связи общего содержания озона и водяного пара над европейской частью России с Североатлантическим колебанием летом 2010 г.

С.А. Ситнов, И.И. Мохов, В.А. Безверхний\*

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3*

Поступила в редакцию 30.12.2015 г.

С использованием спутниковых данных проведен анализ связи с Североатлантическим колебанием (САК) ежедневных аномалий общего содержания озона (ОСО) и общего влагосодержания (ОВ) в атмосфере над европейским регионом аномальным летом 2010 г. Анализ выявил над севером европейской территории России (ЕТР) обширные, близкие по расположению области отрицательной корреляции ОСО с САК и положительной корреляции ОВ с САК с экстремальными (максимальными) значениями до  $-0,55$  и  $0,68$  соответственно. Результаты корреляционного и кросс-вейвлетного анализа свидетельствуют, что повышенная корреляция с САК аномалий ОСО и ОВ над ЕТР летом 2010 г. была связана с когерентными изменениями атмосферных параметров в период разрушения блокирующего антициклона.

*Ключевые слова:* общее содержание озона, общее влагосодержание, атмосферное блокирование, европейская территория России, аномальное лето 2010 г., Североатлантическое колебание; total column ozone, precipitable water vapor, atmospheric block, European Russia, Russian heat wave in summer 2010, North Atlantic oscillation.

### Введение

Североатлантическое колебание (САК) характеризует особенности крупномасштабной атмосферной циркуляции в Евро-Атлантическом регионе (ЕАР) [1–3]. Отмечена связь с САК содержания озона и водяного пара в атмосфере ЕАР [4–11]. Корреляция общего содержания озона (ОСО) с САК в ЕАР характеризуется неоднородной пространственной структурой с положительной корреляцией в высоких широтах и отрицательной в средних широтах, в частности, над Европой [8]. Проявление САК в погодно-климатическом режиме и изменениях газового состава атмосферы более заметно в межгодовой изменчивости зимой и ослабевает летом. Тем не менее и в летний период САК остается ключевой модой климатической изменчивости в ЕАР [12–16]. Особенности проявления САК в синоптической динамике, в том числе динамике волн синоптического масштаба в летний период и динамике ОСО анализировались в [17, 18]. В отрицательной фазе САК отмечена повышенная частота зимних атмосферных блокирований в ЕАР [19]. При аномально продолжительном летнем блокировании на европейской территории России (ЕТР) в 2010 г. [20, 21]

выявлены особенности связи аномалий ОСО и общего влагосодержания (ОВ) с региональной атмосферной динамикой [22, 23]. В настоящей статье анализируется связь с САК аномалий ОСО и ОВ над ЕТР летом 2010 г.

### Использованные данные и методы анализа

При анализе использовались ежедневные данные ОСО и ОВ с пространственным разрешением  $1^\circ \times 1^\circ$ , полученные по измерениям спутниковых спектро-радиометров MODIS (Aqua/Terra, V5.1) в среднем ИК-диапазоне [24] (<http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov>), а также ежедневные, с пространственным разрешением  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ , данные меридионального ветра на уровне 500 гПа  $v_{500}$  и давления на уровне тропопазузы  $P_{\text{троп}}$  NCEP/NCAR-реанализа [25] (<http://www.esrl.noaa.gov>).

Проводился анализ аномалий  $\Delta$  – отклонений ежедневных значений атмосферных параметров в 2010 г. от соответствующих многолетних значений для периода 2000–2015 гг. с месячным осреднением. САК характеризовался индексом, основанным на разложении полей геопотенциала на уровне 500 гПа ( $H_{500}$ ) по эмпирическим ортогональным функциям [12] (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>). Анализировались также данные измерений высоты тропопазузы  $H_{\text{троп}}$  спектрометром AIRS (Aqua, V6) [26] (<http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov>).

\* Сергей Африканович Ситнов (sitnov@ifaran.ru); Игорь Иванович Мохов (mohov@ifaran.ru); Вячеслав Алексеевич Безверхний (vabezv@mail.ru)

Для анализа связи ОСО и ОВ с САК использовался корреляционный и кросс-вейвлетный анализ [27] с вейвлет-функцией типа Морле  $w_0(t)$ . Особенностью использованного метода вейвлет-преобразования (ВП) является применение в качестве весовой функции дискретной сфероидальной волновой функции нулевого порядка  $u_0(t)$ :  $w_0(t) = \cos(\beta t) \cdot u_0(t)$  (вместо гауссиана). Подбор параметра  $\beta$  позволяет существенно уменьшить интервал искажений на краях ВП. Используемый метод дает возможность получить для пары сигналов оценки локального сдвига фазы колебаний и соответствующей локальной корреляции (когерентности) как функции времени и частоты (периода).

## Анализ результатов

Анализ связи локальных ежедневных аномалий ОСО и ОВ с индексом САК летом 2010 г. над северо-восточной частью Европы выявил обширные, близкие по расположению области отрицательной корреляции ОСО с САК и положительной корреляции ОВ с САК с экстремальными (максимальными) значениями локальных корреляций  $-0,55$  и  $0,68$  соответственно (рис. 1, а, б, цв. вкладка). Области высокой корреляции ОСО и ОВ с САК близки к областям отрицательных аномалий ОСО и положительных аномалий ОВ, отмечавшихся над ЕТР в период летнего атмосферного блокирования 2010 г. [22]. Физические механизмы формирования этих аномалий связаны с адвекцией на север ЕТР обогащенного водяным паром, но обедненного озонном субтропического воздуха вдоль западной и северной периферии блокирующего антициклона (рис. 1, з), а также с динамикой тропопаузы (рис. 1, в) [23].

Для анализа причин тесной связи ОСО и ОВ над ЕТР летом 2010 г. с САК, в частности для оценки роли атмосферного блокирования, отмечавшегося большую часть летнего периода, проведен корреляционный анализ вариаций индекса САК с региональными аномалиями ОСО, ОВ и  $P_{\text{троп}}$  над ЕТР ( $60-70^\circ$  с.ш.,  $30-60^\circ$  в.д.) и  $v_{500}$  над центральной частью Европы ( $45-75^\circ$  с.ш.,  $15-30^\circ$  в.д.). Вариации  $v_{500}$  и  $P_{\text{троп}}$  характеризуют физические механизмы изменений ОСО и ОВ над ЕТР при омега-блокировании 2010 г. — меридиональную адвекцию тропического воздуха на север ЕТР в тыловой части блокирующего антициклона и изменения высоты тропопаузы (см. рис. 1, в, з). Стоит отметить, что внутрисезонные изменения  $P_{\text{троп}}$  тесно связаны с вертикальными движениями воздуха в верхней тропосфере — нижней стратосфере.

На рис. 2 приведены ежедневные аномалии атмосферных параметров и индексы САК в апреле–сентябре 2010 г. В летний период выделялись три эпизода атмосферного блокирования: с 22 июня по 28 июня, с 4 июля по 30 июля и с 31 июля по 16 августа [28]. В таблице представлены корреляционные матрицы анализируемых атмосферных параметров для летнего сезона 2010 г. в целом и для периода атмосферного блокирования 4 июля —

16 августа 2010 г. Согласно таблице связь аномалий ОСО и ОВ над ЕТР с индексом САК достаточно заметно проявлялась для летнего сезона 2010 г. в целом, однако была существенно ослаблена в период летнего блокирования, особенно для ОСО. Ослабление корреляции ОСО и ОВ над ЕТР с САК можно связать с ослаблением корреляции  $v_{500}$  с САК при блокировании (см. таблицу). В период блокирования существенно ослабляется также характерная для летнего сезона 2010 г. в целом тесная связь аномалий ОСО с аномалиями ОВ, а также аномалий ОСО и ОВ с аномалиями  $P_{\text{троп}}$ .

**Корреляционные матрицы индекса САК, аномалий ОСО, ОВ и  $P_{\text{троп}}$  над ЕТР ( $60-70^\circ$  с.ш.,  $30-60^\circ$  в.д.), а также  $v_{500}$  над Центральной Европой ( $45-75^\circ$  с.ш.,  $15-30^\circ$  в.д.) для летнего периода 2010 г. в целом (выше главной диагонали) и периода непрерывного блокирования 4 июля — 16 августа 2010 г. (ниже главной диагонали)**

Атмосферный параметр	САК	ОСО	ОВ	$P_{\text{троп}}$	$v_{500}$
САК	1	-0,55	<b>0,68</b>	<b>-0,63</b>	0,53
ОСО	-0,06	1	<b>-0,87</b>	<b>0,90</b>	<b>-0,61</b>
ОВ	0,42	<b>-0,68</b>	1	<b>-0,86</b>	<b>0,64</b>
$P_{\text{троп}}$	-0,21	<b>0,61</b>	<b>-0,69</b>	1	<b>-0,61</b>
$v_{500}$	0,14	<b>-0,66</b>	<b>0,69</b>	-0,50	1

Примечание. Коэффициенты корреляции, превышающие 0,6, выделены жирным шрифтом, статистически незначимые (на уровне 0,05) коэффициенты корреляции тонированы.

При этом согласно таблице в оба периода остается высокой отрицательная корреляция ОСО с  $v_{500}$  и положительная корреляция ОВ с  $v_{500}$ , что свидетельствует о неизменно важной роли меридиональной адвекции в формировании содержания озона и водяного пара в атмосфере над ЕТР. Характерно, что в оба периода отмечена более тесная связь, чем с САК, аномалий ОСО, ОВ и  $P_{\text{троп}}$  между собой. Это свидетельствует о том, что ежедневные аномалии ОСО и ОВ над ЕТР летом 2010 г. были в большей степени связаны с региональными особенностями атмосферной динамики, чем с более крупномасштабными особенностями, характеризующими САК.

Согласно рис. 2 с началом летнего блокирования отмечалось общее усиление  $v_{500}$  над центральной частью Европы (рис. 2, з), которому сопутствовало уменьшение ОСО и увеличение ОВ и  $P_{\text{троп}}$  над ЕТР (ср. рис. 2, з и а–в). Согласованные временные изменения  $v_{500}$  над центральной частью Европы и ОСО, ОВ и  $P_{\text{троп}}$  над ЕТР подтверждают, что развитие отрицательной аномалии ОСО и положительной аномалии ОВ в области блокирования над ЕТР летом 2010 г. связано с меридиональной адвекцией обедненного озонном, но обогащенного водяным паром субтропического воздуха на север ЕТР в тыловой части антициклона и сопутствующим увеличением высоты тропопаузы [22, 23].

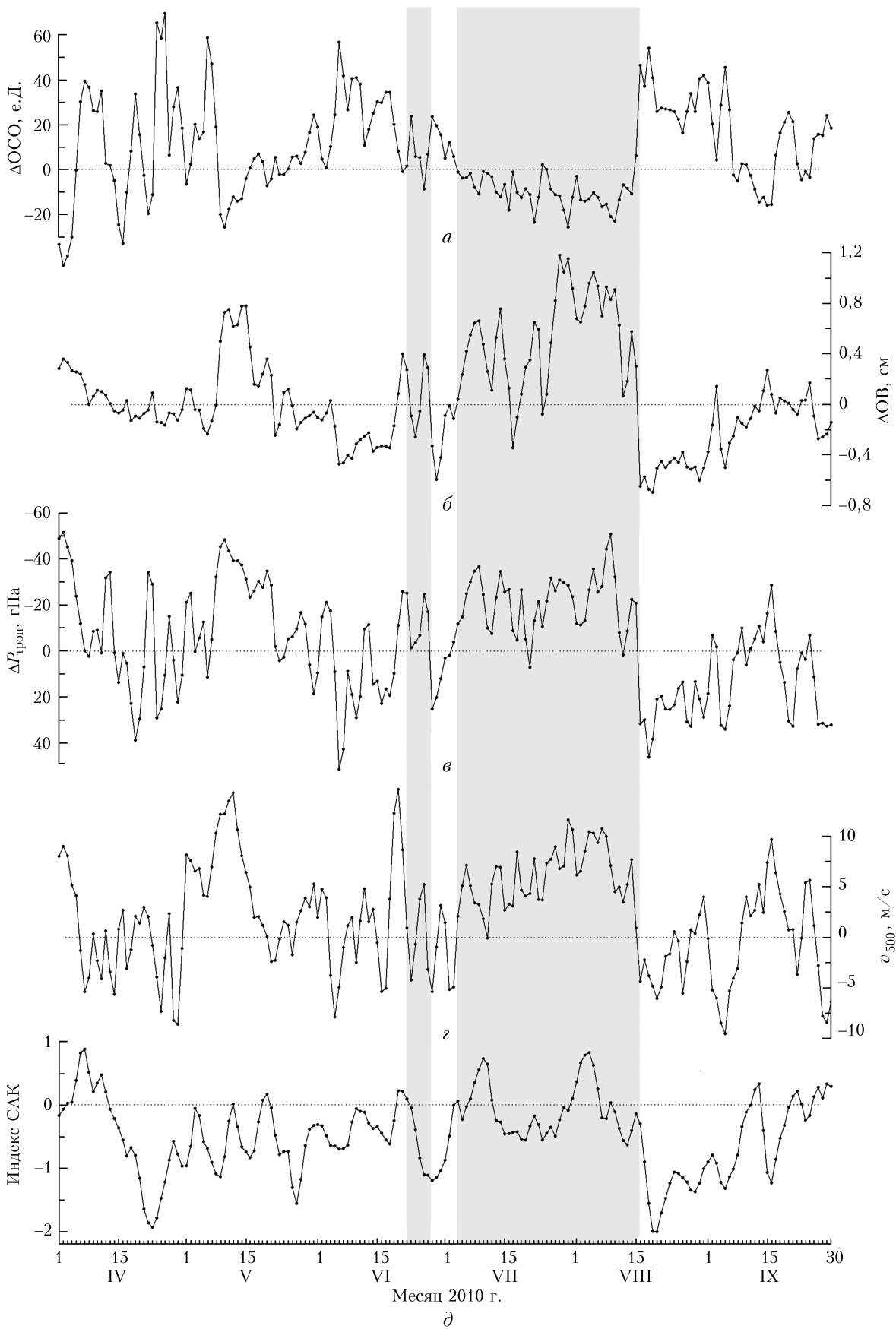


Рис. 2. Ежедневные аномалии ОСО (а), ОВ (б) и  $P_{\text{троп}}$  (в) над ЕТР (60–70° с.ш., 30–60° в.д.),  $v_{500}$  над Центральной Европой (45–75° с.ш., 15–30° в.д.) (г) и индекс САК (д) в апреле–сентябре 2010 г. Тонированием показаны эпизоды летнего атмосферного блокирования

К середине первой декады августа блокирующий антициклон достиг кульминации своего развития: 7 августа 2010 г. средняя высота  $H_{500}$  над регионом (50–60° с.ш., 30–60° в.д.) превышала на 215 геопотенциальных метров (гп. м) соответствующее многолетнее значение (5700 гп. м). Во второй декаде августа вариации атмосферных параметров характеризовались резкими изменениями, синхронными с окончанием атмосферного блокирования. Согласованные изменения атмосферных параметров отмечались и в третьей декаде августа. Резкий переход в режимах региональных атмосферных параметров связан с разрушением блокирующего антициклона сразу после достижения им стадии максимального развития. Высокую корреляцию ОСО и ОВ над ЕТР с САК в летний период 2010 г. (см. рис. 1, а, б) можно связать с когерентными изменениями атмосферных параметров (включая САК) в августе. Атмосферное блокирование прекратилось в середине августа, и корреляционный анализ ОСО и ОВ с САК не охватывал всего периода когерентных изменений ОСО, ОВ и САК, что должно было отражаться в ослаблении соответствующих связей.

Индекс САК в первых двух декадах августа 2010 г. также характеризовался резким уменьшением (см. рис. 2, д). Несмотря на согласованность изменений в августе 2010 г. аномалий ОСО и ОВ над ЕТР и индекса САК, представленные результаты необязательно свидетельствуют о влиянии САК на содержание ВП и озона над ЕТР летом 2010 г. Более того, изменения крупномасштабной атмосферной циркуляции при разрушении обширного высокого блокирующего антициклона могли проявляться в изменениях индекса САК.

На рис. 3, а, в (цв. вкладка) показаны локальные сдвиги фаз колебаний ОСО с САК и ОВ с САК, а на рис. 3, б, г — локальная корреляция (когерентность) соответствующих колебаний как функции времени и частоты (периода). Теплыми тонами на рис. 3, а, в показаны частотно-временные области отставания вариаций ОСО и ОВ от вариаций САК (в днях), холодными тонами — области опережения, при этом практически на всех временных масштабах минимальный локальный сдвиг фаз вариаций ОСО, ОВ и САК отмечался в первых двух декадах августа. Особенности режимов когерентности с САК вариаций ОСО и ОВ характеризуются заметным подобием (ср. рис. 3, б и г). Максимальная когерентность отмечается между вариациями с временными масштабами 20–90 дней в конце периода атмосферного блокирования и сохраняется высокой достаточно продолжительное время после окончания блокирования. В частности, высокая когерентность вариаций с периодами 45–90 дней отмечалась до конца сентября. Результаты вейвлет-анализа подтверждают, что основной вклад в корреляцию с САК аномалий ОВ и ОСО над ЕТР летом 2010 г. внесли согласованные изменения атмосферных параметров в период разрушения блокирующего антициклона и в последующий двухнедельный период.

## Заключение

Анализ связи с САК ежедневных, с пространственным разрешением ( $1^\circ \times 1^\circ$ ), вариаций ОСО и ОВ над Европой летом 2010 г. выявил над севером ЕТР обширные области отрицательной корреляции ОСО с САК и положительной корреляции ОВ с САК с экстремальными (максимальными) величинами корреляций  $-0,55$  и  $0,68$  соответственно. Повышенная корреляция с САК вариаций ОСО и ОВ над ЕТР летом 2010 г. обусловлена когерентными изменениями анализировавшихся атмосферных параметров (включая индекс САК) в августе 2010 г. Связь с САК аномалий ОСО и ОВ над севером ЕТР существенно ослабевает в период легкого атмосферного блокирования над ЕТР. Ослабление корреляции с САК особенностей ОСО и ОВ при блокировании частично объясняется ослаблением связи с САК меридионального ветра в тыловой части блокирующего антициклона и сопутствующими изменениями высоты тропопаузы. Существенное ослабление корреляции можно связать также с тем, что корреляционный анализ для периода летнего блокирования не охватывал всего периода когерентных изменений атмосферных параметров, включая стадию разрушения атмосферного блокирования и последующий двухнедельный период.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 15-05-07853, 14-05-00639) и программ РАН. В статье использованы результаты, полученные в рамках проекта РНФ (грант № 14-17-00806).

1. Wallace J.M., Gutzler D.S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter // Mon. Weather. Rev. 1981. V. 109, N 4. P. 784–812.
2. Мохов И.И., Елисеев А.В., Хандорф Д., Петухов В.К., Детлофф К., Вайсхаймер Ф., Хворостянов Д.В. Североатлантическое колебание: диагноз и моделирование десятилетней изменчивости и ее долгопериодной эволюции // Изв. РАН. Физ. атмосферы и океана. 2000. Т. 36, № 5. С. 605–616.
3. Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Триада ЛТД, 2013. 144 с.
4. Hurrell J.W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation and relationships to regional temperature and precipitation // Science. 1995. V. 269, N 5224. P. 676–679.
5. Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М. О связях общего содержания озона в средних широтах Северного полушария с североатлантическим колебанием // Метеорол. и гидрол. 1996. № 7. С. 72–77.
6. Appenzeller C., Weiss A.K., Staehelin J. North Atlantic Oscillation modulates total ozone winter trends // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27, N 8. P. 1131–1134.
7. Кароль И.Л., Сыроваткина О.А., Соломатникова А.А., Шаламянский А.М. Анализ межгодовых изменений общего содержания озона над территорией России в 1973–2002 гг. по данным измерений наземных станций // Метеорол. и гидрол. 2006. № 4. С. 19–28.
8. Frossard L., Rieder H.E., Ribatet M., Staehelin J., Maeder J.A., Di Rocco S., Davison A.C., Peter T. On the relationship between total ozone and atmospheric dynamics and chemistry at mid-latitudes — Part 1: Statistical models and spatial fingerprints of atmospheric

- dynamics and chemistry // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, N 1. P. 147–164.
9. *Petropavlovskikh I., Evans R., McConville G., Manney G.L., Rieder H.E.* The influence of the North Atlantic Oscillation and El Niño–Southern Oscillation on mean and extreme values of column ozone over the United States // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15, N 3. P. 1585–1598.
  10. *Ruprecht E., Schröder S.S., Ubl S.* On the relation between NAO and water vapour transport toward Europe // *Meteorologische Zeitschrift.* 2002. V. 11, N 6. P. 395–401.
  11. *Малинин В.Н., Гордеева С.М.* Североатлантическое колебание и увлажнение европейской территории России // *Общество. Среда. Развитие.* 2014. № 2. С. 191–198.
  12. *Barnston A.G., Livezey R.E.* Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // *Mon. Weather. Rev.* 1987. V. 115. P. 1083–1126.
  13. *Folland C.K., Knight J., Linderholm H.W., Fereday D., Ineson S., Hurrell J.W.* The summer North Atlantic Oscillation: Past, present, and future // *J. Clim.* 2009. V. 22, N 5. P. 1082–1103.
  14. *Chronis T., Raitos D.E., Kassis D., Sarantopoulos A.* The summer North Atlantic Oscillation influence on the Eastern Mediterranean // *J. Clim.* 2011. V. 24, N 21. P. 5584–5596.
  15. *Wang G., Dolman A.J., Alessandri A.* A summer climate regime over Europe modulated by the North Atlantic Oscillation // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2011. V. 15, N 1. P. 57–64.
  16. *Ossy A., Sola Y., Bech J., Lorente J.* Evidence for the influence of the North Atlantic Oscillation on the total ozone column at northern low latitudes and midlatitudes during winter and summer seasons // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. D24122. DOI: 10.1029/2011JD016539.
  17. *Feldstein S.B.* The dynamics of the North Atlantic Oscillation during the summer season // *Quant. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2007. V. 133, N 627. P. 1509–1518.
  18. *Khokhlov V.N., Romanova A.V.* NAO-induced spatial variations of total ozone column over Europe at near-synoptic scale // *Atmos. Environ.* 2011. V. 45, N 20. P. 3360–3365.
  19. *Shabbar A., Huang J., Higuchi K.* The relationship between the wintertime North Atlantic Oscillation and blocking episodes in the North Atlantic // *Int. J. Climatol.* 2001. V. 21, N 3. P. 355–369.
  20. *Мохов И.И.* Особенности формирования летней жары 2010 г. на европейской территории России в контексте общих измерений климата и его аномалий // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2011. Т. 47, № 6. С. 709–716.
  21. *Шакина Н.П., Иванова А.Р., Бирман Б.А., Скриптунова Е. Н.* Блокирование: условия лета 2010 г. в контексте современных знаний // *Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года.* М.: Триада ЛТД, 2011. С. 6–21.
  22. *Ситнов С.А., Мохов И.И.* Формирование озоновой «мини-дыры» в условиях продолжительного блокирующего антициклона в атмосфере над европейской территорией России летом 2010 г. // *Докл. АН.* 2015. Т. 460, № 1. С. 74–78.
  23. *Ситнов С.А., Мохов И.И.* Особенности поля общего содержания озона при атмосферном блокировании над европейской территорией России летом 2010 г. (по спутниковым данным) // *Метеорол. и гидрол.* 2016. № 1. С. 41–52.
  24. *King M.D., Menzel W.P., Kaufman Y.J., Tanré D., Gao B.-C., Platnick S., Ackerman S.A., Remer L.A., Pincus R., Hubanks P.A.* Cloud and aerosol properties, precipitable water, and profiles of temperature and water vapor from MODIS // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2003. V. 41, N 2. P. 442–458.
  25. *Kistler R., Collins W., Saha S., White G., Woolen J., Kalnay E., Chelliah M., Ebisuzaki W., Kanamitsu M., Kousky V., van den Dool H., Jenne R., Fiorino M.* The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2001. V. 82, N 2. P. 247–267.
  26. *Aumann H.H., Chahine M.T., Gautier C., Goldberg M.D., Kalnay E., McMillin L.M., Revercomb H., Rosenkranz P.W., Smith W.L., Staelin D.H., Strow L.L., Susskind J.* AIRS/AMSU/HSB on the aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2003. V. 41, N 2. P. 253–264.
  27. *Безверкхий В.А.* Развитие метода вейвлет-преобразования для анализа геофизических данных // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2001. Т. 37, № 5. С. 630–638.
  28. *Lupo A.R., Mokhov I.I., Akperov M.G., Chernokulsky A.V., Athar H.* A dynamic analysis of the role of the planetary- and synoptic-scale in the summer of 2010 blocking episodes over the European part of Russia // *Adv. Meteorol.* 2012. V. 2012. 584257. 11 p.

**S.A. Sitnov, I.I. Mokhov, V.A. Bezverkhny. Analysis of the connections between total column ozone and precipitable water vapor over European Russia with the North Atlantic Oscillation in the summer of 2010.**

Using satellite data, connections between the North Atlantic Oscillation (NAO) and the daily anomalies in total column ozone (TCO) and those in precipitable water vapor (PWV) over Europe during the summer of 2010 heatwave were analyzed. The analysis revealed over the northern European Russia (ER) spacious and closely located regions of negative correlation between TCO and NAO and positive correlation between PWV and NAO, with the extreme (maximum) local correlation coefficients up to  $-0.55$  and  $0.68$ , respectively. The results of correlation analysis and cross-wavelet analysis showed that the increased correlations between TCO, PWV, and NAO in the summer of 2010 were mainly due to coherent variations of atmospheric parameters in the period of the destruction of blocking anticyclone.

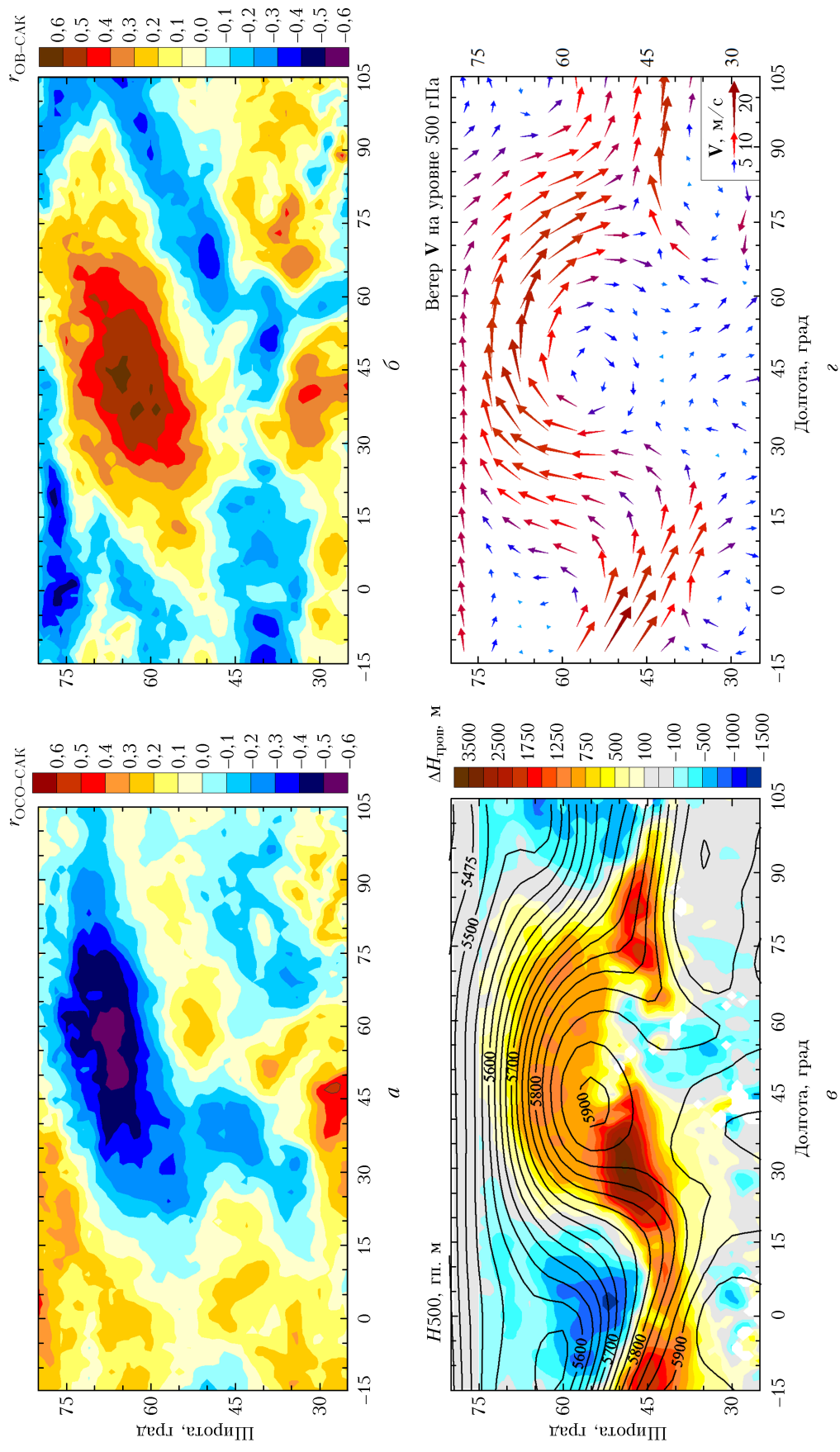


Рис. 1. Пространственные распределения: коэффициентов корреляции  $r$  ежедневных индексов САК с ежедневными локальными ( $1^\circ \times 1^\circ$ ) аномалиями ОСО (а) и ОБ (б) летом 2010 г., аномалий высоты тропопазы  $\Delta H_{троп}$  (цветовой шкала) и  $H_{500}$  (изолинии) (в), а также векторов среднего ветра  $V$  на уровне 500 гПа (г) 1–10 августа 2010 г.

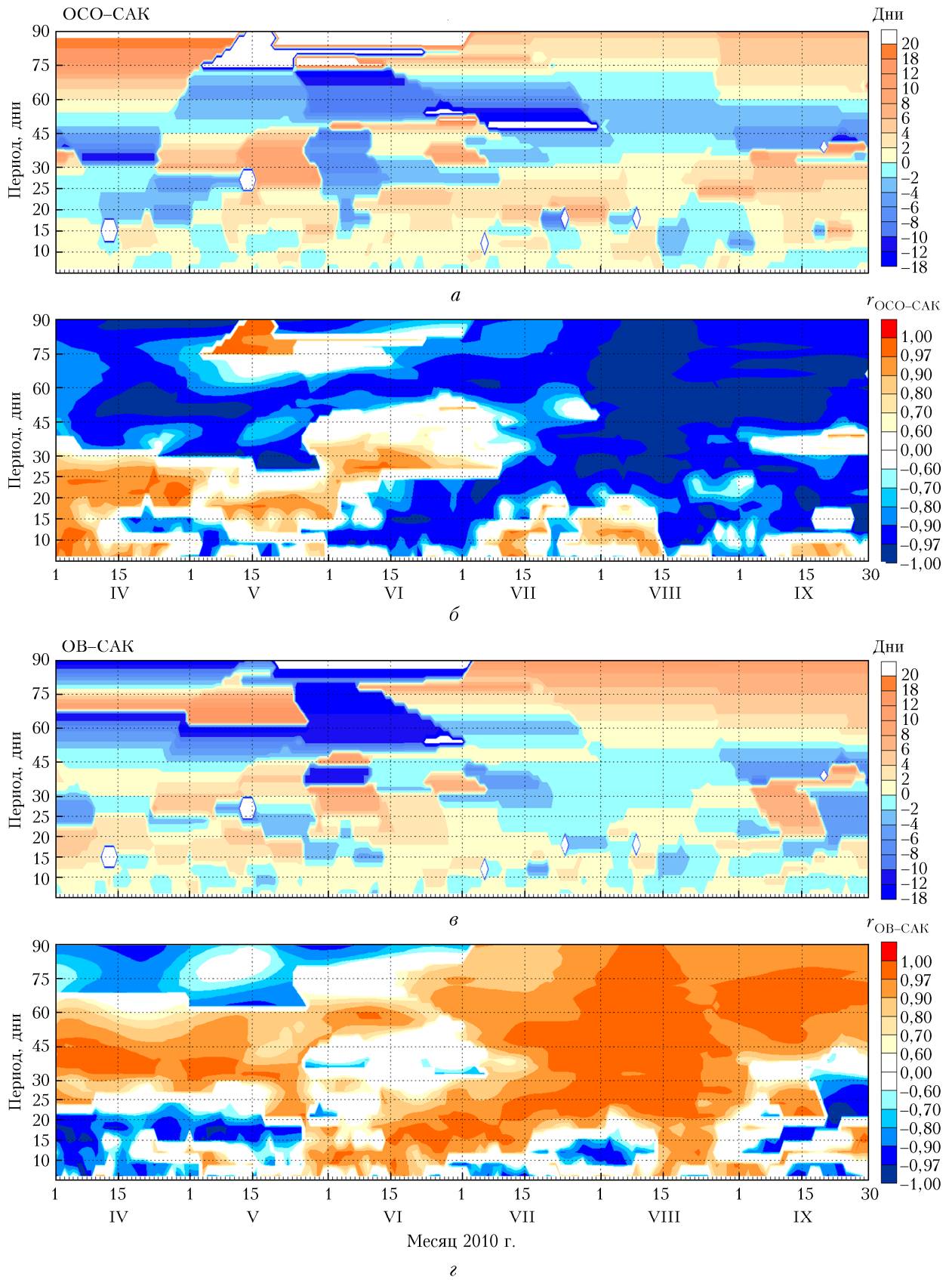


Рис. 3. Локальные сдвиги фаз (*а, в*) и когерентности (*б, г*) вариаций: индекса САК и аномалий ОСО (*а, б*), индекса САК и аномалий ОБ (*в, г*) в апреле–сентябре 2010 г.