

УДК 551.465.7

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ ПОТОКОВ ТЕПЛА ОТ ОКЕАНА И ПОЛЕЙ ГРАДИЕНТОВ ГЕОПОТЕНЦИАЛА В СРЕДНЕЙ ТРОПОСФЕРЕ ПРИ МЕРИДИОНАЛЬНЫХ И ЗОНАЛЬНЫХ ПРОЦЕССАХ

© 2019 г. О. А. Разоренова*, П. А. Шабанов**

Институт океанологии им. П.П.Шириова РАН, Москва, Россия

**e-mail: olgar@sail.msk.ru*

*** e-mail: pa.shabanov@gmail.com*

Поступила в редакцию 26.03.2017 г.

После доработки 17.09.2018 г.

Принята к публикации 05.02.2019 г.

Проведено исследование взаимодействия теплоотдачи океана и полей пространственных градиентов геопотенциала в средней тропосфере методом линейного регрессионного анализа при меридиональных и зональных процессах. Анализ пространственного распределения коэффициентов корреляции показал, что структура взаимосвязи тепловых потоков в Северной Атлантике с полем градиентов геопотенциала в средней тропосфере над Атлантико-Европейским сектором различается в периоды с преобладанием меридиональных и зональных форм циркуляции, что свидетельствует о вкладе теплоотдачи океана в формирование и развитие циркуляционных режимов в атмосфере.

Ключевые слова: турбулентный поток тепла, градиент геопотенциала, атмосферная циркуляция, зональные и меридиональные процессы, Атлантико-Европейский сектор, корреляционный анализ

DOI: 10.31857/S0030-1574594521-528

ВВЕДЕНИЕ

Одна из основных проблем взаимодействия океана и атмосферы — это определение влияния океанических процессов на формирование циркуляционных условий в атмосфере. В частности, важной задачей является изучение реакции атмосферных шторм-треков на потоки тепла из океана. В многочисленных работах [3, 4, 7–10, 12–14, 16] рассматривались вопросы влияния океанических процессов на атмосферную циркуляцию. В качестве параметров использовались поля приземного давления, геопотенциала в средней тропосфере, температуры поверхности океана (ТПО) и ее градиентов, однако практически отсутствуют исследования, в которых в качестве параметра используются потоки тепла от океана. В данном исследовании впервые рассматривается взаимосвязь турбулентных потоков тепла и градиентов геопотенциала в средней тропосфере. С нашей точки зрения, такой подход наиболее продуктивен, так как, с одной стороны, градиенты геопотенциала определяют положения тропосферных

фронтов и циклонических траекторий и могут быть успешно использованы при анализе смещений атмосферного шторм-трека, а с другой стороны, турбулентные потоки тепла являются одним из компонентов энергетического баланса атмосферы, они вносят существенный вклад в динамику атмосферных движений. Работа является продолжением исследования [5], в котором было показано наличие значимой статистической связи между полями потоков тепла от океана и зонами повышенных термобарических градиентов в средней тропосфере. Кроме того, обнаружены существенные различия в характере влияния теплоотдачи океана в Норвежской и Ньюфаундлендской энергоактивных зонах Северной Атлантики на циркуляционные особенности средней тропосферы над Атлантикой и Европой. Закономерно встал вопрос о рассмотрении взаимосвязи потоков тепла и полей градиентов геопотенциала, отображающих распределение высотных фронтальных зон, отдельно в периоды с преобладанием меридиональных и зональных процессов, что дает

возможность более детально проанализировать роль океана в динамике крупномасштабных циркуляционных режимов, поскольку океан может генерировать внутренние (естественные) моды изменчивости в атмосфере, согласующиеся или не согласующиеся с глобальными трендами [6, 9]. В частности, в [3, 4] было показано, что океанские процессы играют важную роль в формировании циркуляционных условий в атмосфере.

ДААННЫЕ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовались данные и методика, подробно изложенные в [5]. По данным реанализа NCEP/NCAR I [11] о геопотенциале на высоте изобарической поверхности 500 гПа были рассчитаны модули горизонтального градиента геопотенциала с помощью аппроксимации производных геопотенциала методом центральных разностей. Данные о суммарном потоке тепла от океана были рассчитаны как сумма турбулентных потоков скрытого и явного тепла из реанализа NCEP CFSR [15]. Временной период составил 36 лет — с 1979 по 2014 г.; анализ выполнен для зимнего сезона, для которого характерно наиболее интенсивное тепловое взаимодействие океана и атмосферы. На основе расчета индексов циркуляции Погосьяна-Павловской [2] были выбраны месяцы с преобладанием меридиональных или зональных процессов в Атлантико-Европейском секторе и составлены соответствующие выборки полей модуля градиентов геопотенциала и турбулентных потоков тепла, между которыми для каждого узла регулярной сетки были рассчитаны коэффициенты линейной корреляции Пирсона и оценена их значимость на 5%-ном уровне. Кроме того, для полученных выборок полей модуля градиентов геопотенциала были рассчитаны и построены положения высотных фронтальных зон при преобладании зональных и меридиональных процессов в рассматриваемом регионе. Также получены оценки корреляционной связи между потоками тепла от океана в энергоактивных зонах Северной Атлантики и полями модуля горизонтального градиента геопотенциала в средней тропосфере отдельно для периодов преобладания меридиональных и зональных форм циркуляции в атмосфере в Атлантико-Европейском секторе. Основная цель исследования состояла в том, чтобы на основе линейного корреляционного анализа выяснить, существуют ли зна-

чимые корреляционные связи (и в чем их различие) между среднемесячными турбулентными потоками тепла из океана и среднемесячными характеристиками циркуляции в средней тропосфере отдельно в периоды с меридиональными и зональными процессами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлено распределение значимых локальных коэффициентов корреляции (R) между потоками тепла и модулем градиента геопотенциала при преобладании зональных (а) и меридиональных (б) процессов в январе (5%-ный уровень значимости составляет для рассчитанных полей $|0.55|$). Похожая картина характерна также для декабря и февраля. Соответствующее распределение высотных фронтальных зон показано на рис. 2 (а, б). При преобладании зональных процессов над центральной Атлантикой наблюдается хорошо выраженный западный перенос в средней тропосфере; центр среднетропосферного циклона, связанный с Исландской депрессией, располагается над о. Баффинова Земля. Анализ рисунков показал, что в данной ситуации область значимых положительных коэффициентов корреляции с максимальными значениями $R = 0.81$ расположена в центральной части Северной Атлантики, где наблюдается наибольшая интенсивность североатлантической высотной фронтальной зоны (ВФЗ) (здесь расположена область максимальных барических градиентов). При усилении меридиональных процессов барическое поле в средней тропосфере над Атлантикой характеризуется повышенными значениями геопотенциала над центральной и восточной акваторией, гребень распространяется на всю Гренландию. Область низкого давления смещена на север Канадского архипелага. Североатлантическая высотная фронтальная зона локализуется значительно южнее по сравнению со среднемноголетним положением, зона максимальных градиентов геопотенциала находится у восточного побережья Северной Америки. Распределение значимых коэффициентов корреляции между потоками тепла и модулем градиента геопотенциала хорошо согласуется с положением высотных фронтальных зон: основной очаг положительных коэффициентов корреляции ($R = 0.92$) приурочен к области максимальных градиентов североатлантической ВФЗ. Вторая область положительных коэффициентов корреле-

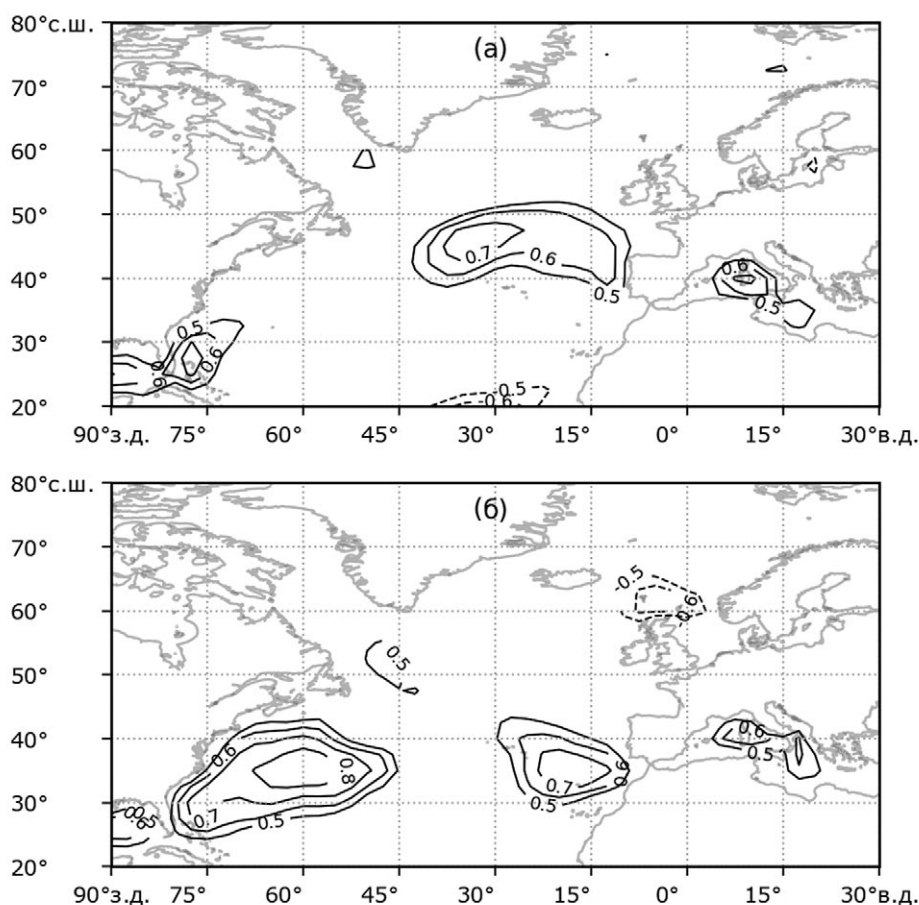


Рис. 1. Коэффициенты линейной корреляции R между среднемесячными потоками океанического тепла и среднемесячными значениями модуля градиентов геопотенциала на изобарической поверхности 500 гПа в Северной Атлантике в январе при развитии зональных (а) и меридиональных (б) процессов.

ляции ($R = 0.81$) расположена на востоке субтропической Атлантики, где также находится зона повышенных локальных градиентов геопотенциала и связанные с ней североатлантическая и средиземноморская ВФЗ. Наконец, третий очаг значимой положительной корреляции ($R = 0.6$) находится к югу от Гренландии, где также расположена область повышенных локальных градиентов геопотенциала, наиболее ярко выраженная в декабре и в феврале, когда в данном районе образуется региональная лабрадорская высотная фронтальная зона. Очаг значимых отрицательных коэффициентов корреляции ($R = -0.81$) расположен в Северном море, где получены наименьшие значения модуля градиента геопотенциала.

Представленная картина распределения коэффициентов корреляции свидетельствует о значимой связи теплоотдачи океана с форми-

рованием полей градиентов геопотенциала в средней тропосфере при развитии как зональных, так и меридиональных процессов. Однако структура распределения коэффициентов корреляции различается в периоды преобладания зональных и меридиональных режимов циркуляции, она определяется расположением высотных фронтальных зон.

На рис. 3а представлено распределение коэффициентов корреляции между потоком тепла от океана в Ньюфаундлендской ЭАЗО (НфЭАЗО) и модулем градиента геопотенциала H_{500} в Атлантико-Европейском секторе при развитии зональных процессов в январе. Похожая картина наблюдается в декабре и в феврале. Очаг максимальной положительной корреляции ($R = 0.89$) расположен в центральной части Северной Атлантики в районе наибольшей интенсивности североатлантической ВФЗ. Области

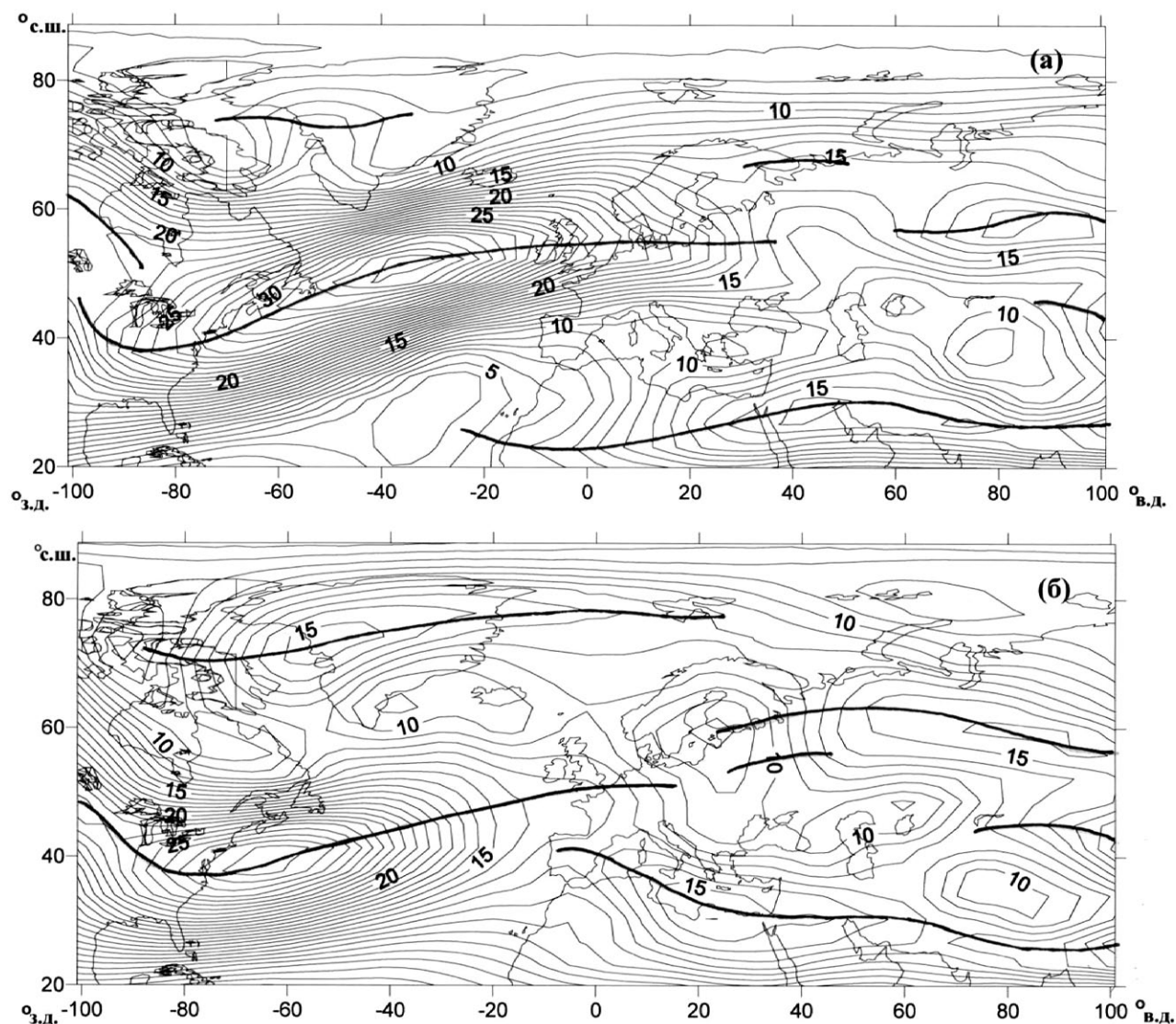


Рис. 2. Распределение высотных фронтальных зон в средней тропосфере в Атлантико-Европейском секторе в январе при развитии зональных (а) и меридиональных (б) процессов. Изолинии отображают значения градиента геопотенциала (гп. м./100 км). Жирные линии — положение осей высотных фронтальных зон.

отрицательных значений коэффициентов корреляции соответствуют малоградиентным полям в средней тропосфере — в областях распространения высотных гребней: над Западной Европой, Средиземноморьем и над Северной Атлантикой к юго-востоку от о. Гренландия. Таким образом, при развитии зональных процессов теплоотдача в НфЭАЗО способствует сохранению и усилению западного переноса.

Меридиональные процессы в атмосфере демонстрируют более сложную картину рас-

пределения корреляционных связей, структура которой в каждый из зимних месяцев определяется распределением высотных фронтальных зон в средней тропосфере. В декабре и январе картина распределения значимых коэффициентов корреляции носит сходный характер: область максимальных положительных значений ($R = 0.6-0.8$) расположена в районе 40° с.ш. и $35-20^\circ$ з.д., где наблюдается сближение североатлантической и средиземноморской ВФЗ. Очаг значимых отрицательных значений

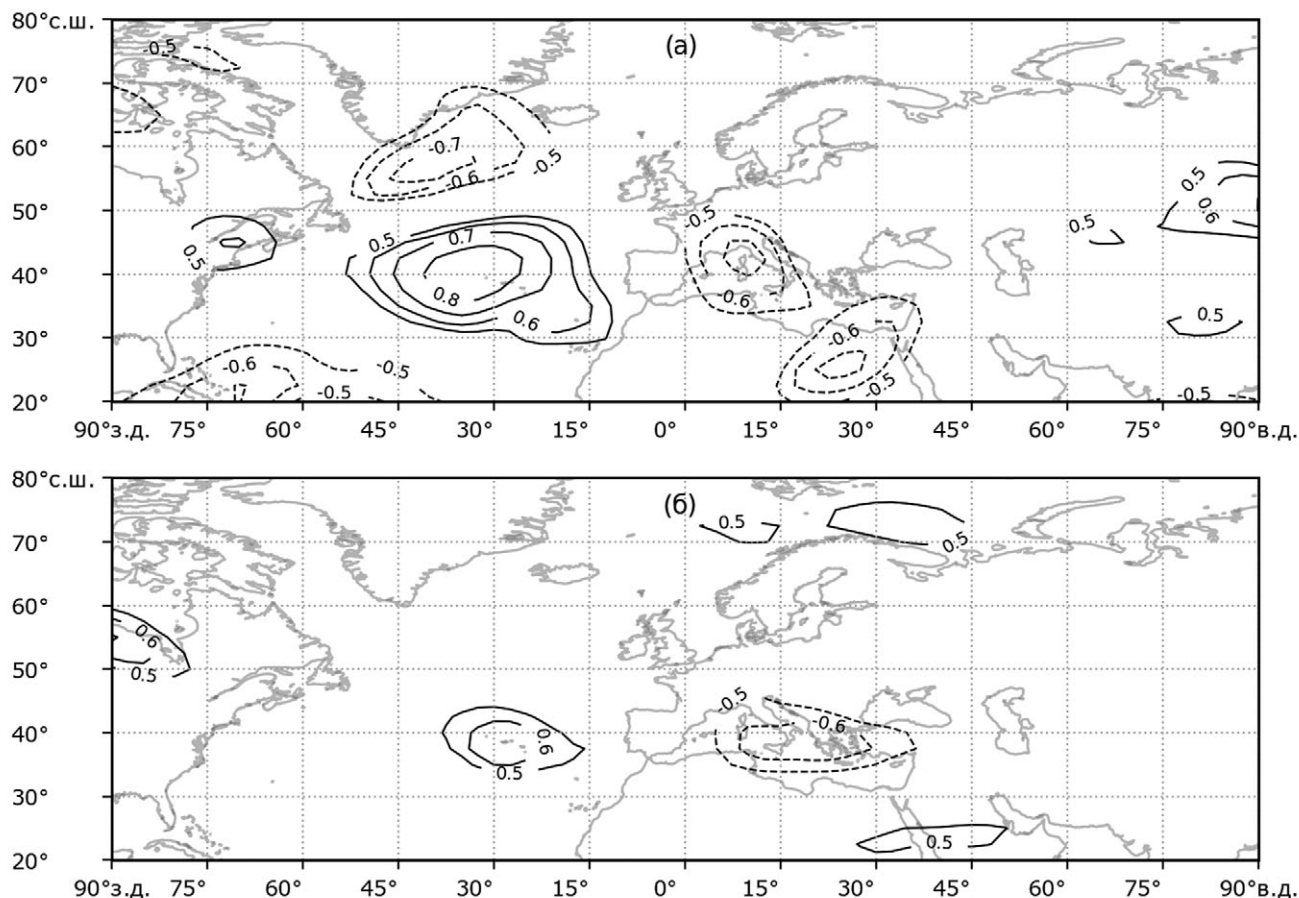


Рис. 3. Коэффициенты линейной корреляции R между среднемесячными потоками океанического тепла в Ньюфаундлендской ЭАЗО и среднемесячными значениями модуля градиентов геопотенциала на изобарической поверхности 500 гПа в Атлантико-Европейском секторе в январе при развитии зональных (а) и меридиональных (б) процессов.

($R = -0.5 \dots -0.7$) охватывает центральную и восточную части средиземноморья, где при меридиональных процессах происходит увеличение градиентов геопотенциала и интенсификация средиземноморской ВФЗ. Таким образом, усиление теплоотдачи в НфЭАЗО приводит к ослаблению меридиональных процессов в средней тропосфере над центральной и восточной акваториями Средиземного моря.

Февральская карта распределения коэффициентов корреляции демонстрирует соответствие области максимальных положительных ($R > 0.8$) положению североатлантической ВФЗ над Атлантикой, которая смещена в значительной степени к югу по сравнению с зональными процессами и смыкается на востоке Атлантики с средиземноморской ВФЗ. Отличительной особенностью является наличие обширной области значимых положительных коэффициентов кор-

реляции ($R > 0.6$) над всей центральной и восточной Европой, Каспийским морем и Средней Азией. В этих районах при преобладании меридиональных форм циркуляции в феврале наблюдается формирование нескольких ветвей высотных фронтальных зон, свидетельствующих о сложной барической структуре и разнообразии атмосферных процессов в данном регионе, в том числе и о развитии блокирующих ситуаций. Таким образом, возрастание теплоотдачи океана в Ньюфаундлендской ЭАЗО может существенно увеличивать вероятность развития меридиональных форм циркуляции в Европе и Средней Азии в феврале.

Анализ распределения коэффициентов корреляции между потоком тепла от океана в Норвежской ЭАЗО (НЭАЗО) и градиентов геопотенциала в средней тропосфере (рис. 4а, 4б) показал, что значимая взаимосвязь существует для Евро-

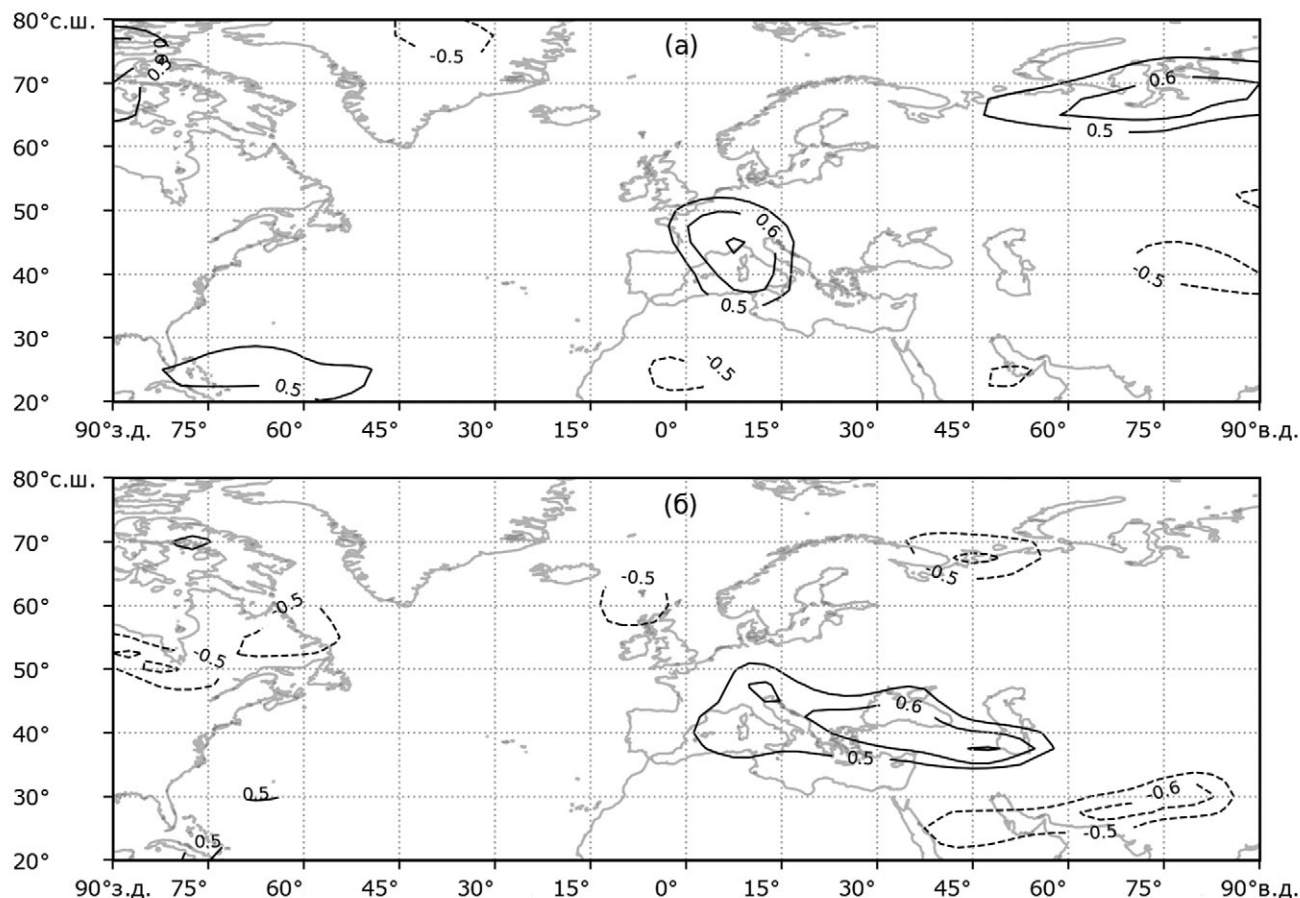


Рис. 4. Коэффициенты линейной корреляции R между среднемесячными потоками океанического тепла в Норвежской ЭАЗО и среднемесячными значениями модуля градиентов геопотенциала на изобарической поверхности 500 гПа в Атлантико-Европейском секторе в январе при развитии зональных (а) и меридиональных (б) процессов.

пейского сектора при развитии как зональных, так и меридиональных форм циркуляции. При развитии зональных процессов (рис. 4а) в зимние месяцы увеличение потока тепла в НЭАЗО соответствует росту градиента геопотенциала в средней тропосфере над всей Западной Европой, происходят интенсификация ВФЗ и усиление циклонической активности над этим регионом. Анализ ситуации для меридиональных процессов (рис. 4б) показал, что области максимальных положительных коэффициентов корреляции в декабре и январе соответствует область наименьших градиентов геопотенциала: увеличение потока тепла в НЭАЗО приводит к росту градиентов геопотенциала, что в свою очередь способствует ослаблению или разрушению меридиональных форм циркуляции и восстановлению зонального переноса над большей частью Европейского региона; над Скандинавией и северной частью европейской террито-

рии России наблюдается область отрицательной корреляции, свидетельствующая об усилении меридиональных процессов при росте теплоотдачи в НЭАЗО. В феврале структура распределения коэффициентов корреляции отличается от предыдущих месяцев, но и она соответствует описанному выше механизму: усиление теплоотдачи в НЭАЗО ослабляет меридиональность над центральной и восточной Европой и способствует ее сохранению или усилению над северными районами Европы.

ВЫВОДЫ

Анализ полученной картины распределения коэффициентов корреляции показал, что значимая статистическая связь между океаническим потоком тепла и градиентами геопотенциала в средней тропосфере отмечается именно в областях формирования высотных фронталь-

ных зон в периоды преобладания и зональных, и меридиональных процессов. Аномалии теплоотдачи океана могут быть одной из причин формирования и распределения высотных фронтальных зон, определяя структуру барического поля в средней тропосфере и, таким образом, обуславливая развитие определенных циркуляционных режимов. Изменение потока тепла в двух энергоактивных зонах Северной Атлантики по-разному влияет на формирование барического поля в Европейском регионе: усиление теплоотдачи в НФЭАЗО способствует сохранению и интенсификации меридиональных процессов в центральной Европе; наоборот, увеличение потока тепла в НЭАЗО приводит к ослаблению меридиональности в центральной и восточной Европе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о наличии влияния теплоотдачи Атлантики на формирование среднемесячного барического поля в средней тропосфере над Атлантико-Европейским регионом. Следующим важнейшим этапом станет выяснение влияния океанических процессов на формирование и эволюцию режимов атмосферной циркуляции на синоптическом масштабе с временными сдвигами. Предполагаются два подхода: с применением спектральных методов и полосовой фильтрации и с применением типизации атмосферных процессов Дзердзеевского [1]. Решение этой задачи позволит ответить на вопрос, на каких временных масштабах наблюдается максимальное синоптическое взаимодействие теплоотдачи океана и циркуляции атмосферы. Другим аспектом является исследование обнаруженных закономерностей с точки зрения связи ВФЗ с основным североатлантическим шторм-треком. Это позволит выявить связь потоков тепла от океана с циклоническими траекториями. Таким образом, будет получена картина влияния океанического теплового потока на формирование циркуляционных режимов и связанных с ними циклонов и антициклонов, что в конечном итоге даст возможность проследить изменения циклонических траекторий под влиянием потоков тепла от океана.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках Госзадания (№ 0149-2018-0001). Расчет полей модуля градиентов геопотенциала для меридиональных и зональных процес-

сов осуществлен за счет гранта Правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых (проект № 14.В25.31.0026). Расчет корреляционных связей и анализ полученных результатов выполнен за счет гранта РНФ (проект № 14-50-00095).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дзердзеевский Б. Л. Циркуляционные механизмы в атмосфере Северного полушария в XX столетии // Материалы метеорологических исследований. М.: Междувед. геофиз. комитет АН СССР, 1968. 240 с.
2. Погосян Х. П., Павловская А. А. Аномалии атмосферной циркуляции приземного давления и температуры в связи с квазидвухлетней цикличностью. Л.: Гидрометеиздат, 1977, 79 с.
3. Разоренова О. А. Крупномасштабное взаимодействие океана и атмосферы в Северной Атлантике. I. Исследование связи океанических потоков тепла с характеристиками циркуляции в средней тропосфере методом линейной корреляции // Метеорология и гидрология. 1998. № 9. С. 77-86.
4. Разоренова О. А. Крупномасштабное взаимодействие океана и атмосферы в Северной Атлантике. II. Применение метода канонических корреляций к исследованию взаимодействия океана и атмосферы // Метеорология и гидрология. 1998. № 10. С. 69-80.
5. Разоренова О. А., Шабанов П. А. Роль потока тепла из океана в формировании полей градиентов геопотенциала в средней тропосфере // Океанология. 2015. Т. 55. № 6. С. 888-892.
6. Bjerknes J. Atlantic air-sea interaction // *Advances in Geophysics*. Academic Press. 1964. V. 10. P. 1-82.
7. Cayan D. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: The connection to monthly atmospheric circulation. // *J. Climate*. 1992. V. 5. P. 354-369.
8. Collins M., Minobe S., Barreiro M., et al. Challenges and opportunities for improved understanding of regional climate dynamics // *Nature Climate Change*. 2018. V. 8, P. 101-108.
9. Gulev S. K., Latif M., Keenlyside N. et al. North Atlantic Ocean control on surface heat flux on multidecadal timescales // *Nature*. 2013. V. 499. P. 464-467, doi:10.1038/nature12268 (2013).
10. Gulev S. K., Jung T., Ruprecht E. Interannual and seasonal variability in the intensities of synoptic scale processes in the North Atlantic mid latitudes from the NCEP/NCAR Reanalysis data // *J. Climate*. 2002. V. 15. P. 809-828.
11. Kalnay E., Collins W., Saha S. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1996. V. 77. № 3. P. 437-471.
12. O'Reilly, C. H., Czaja A. The response of the Pacific storm track and atmospheric 891 circulation to Kuroshio extension variability // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2015. V. 141 P. 52-66. doi:10.1002/qj.2334.

13. Parfitt, R., Czaja A., Minobe S., Kuwano-Yoshida A. The atmospheric frontal response to SST perturbations in the Gulf Stream region // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 2299-2306. doi:10.1002/2016GL067723.
14. Rodwell M.J., Rowell D.P., Folland C.K. Oceanic forcing of the wintertime North Atlantic Oscillation and European climate // *Nature*. 1999. V. 398. P. 320-323.
15. Saha S., Moorthi S., Pan H-L. et al. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2010. V. 91. № 8. P. 1015-1057. doi:10.1175/2010BAMS3001.1
16. Zolina, O., Gulev S.K. Synoptic variability of ocean-atmosphere turbulent fluxes associated with atmospheric cyclones // *J. Climate*. 2003. V. 16. P. 3023-3041.

CORRELATION ANALYSIS OF THE INTERACTION BETWEEN OCEANIC HEAT FLUXES AND THE GEOPOTENTIAL GRADIENT FIELDS IN THE MIDDLE TROPOSPHERE DURING MERIDIONAL AND ZONAL PROCESSES

© 2019 O. A. Razorenova*, P. A. Shabanov**

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: olgar@sail.msk.ru

** e-mail: pa.shabanov@gmail.com

Received March 26, 2017

Revised version received September 17, 2018

After revision February 05, 2019

Investigation of the interaction between oceanic heat fluxes and formation of the geopotential gradient fields in the middle troposphere during meridional and zonal processes has been carried out by applying linear correlation analysis. Analysis of the spatial distribution of the correlation coefficients has demonstrated that the structure of the interaction of heat fluxes in the North Atlantic with the geopotential gradient field in the middle troposphere over the Atlantic-European sector differs in periods with the predominance of meridional and zonal circulation forms, which indicates the significant role of the ocean heat flow in the formation and development of circulation regimes in the atmosphere.

Keywords: turbulent heat fluxes, geopotential gradient, atmospheric circulation, zonal and meridional processes, Atlantic-European sector, correlation analysis