

УДК 551.465.7

РОЛЬ ПОТОКА ТЕПЛА ИЗ ОКЕАНА В ФОРМИРОВАНИИ ПОЛЕЙ ГРАДИЕНТОВ ГЕОПОТЕНЦИАЛА В СРЕДНЕЙ ТРОПОСФЕРЕ

© 2015 г. О. А. Разоренова, П. А. Шабанов

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва**e-mail: olgar@sail.msk.ru, pa.shabanov@gmail.com*

Поступила в редакцию 01.06.2015 г.

Проведено исследование взаимодействия теплоотдачи океана и формирования полей пространственных градиентов геопотенциала в средней тропосфере методом линейного регрессионного анализа. Анализ пространственного распределения коэффициентов корреляции показал, что тепловые потоки в Северной Атлантике играют существенную роль в формировании циркуляционных особенностей средней тропосферы над Атлантико-Европейским регионом, что говорит о возможной предсказуемости крупномасштабных характеристик циркуляции за счет океанических процессов.

DOI: 10.7868/S0030157415060155

ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых задач определения причин наблюдаемой изменчивости климата является исследование роли океана в формировании и развитии циркуляционных процессов в атмосфере. Различные аспекты взаимодействия океана и атмосферы рассмотрены в многочисленных исследованиях отечественных и зарубежных авторов. Океан наряду с поступающей от Солнца радиацией является одним из основных источников тепла для атмосферы. Изменчивость потока тепла на поверхности океана интенсифицирует или уменьшает диабатические притоки тепла к атмосфере и, как следствие, перенос воздушными течениями тепла на континенты. Взаимодействие океана и атмосферы может усилить или ослабить межширотный обмен массой, теплом и влагой в атмосфере, определяя тем самым преобладание меридиональных или зональных типов циркуляции. Наблюдаемый в последние два десятилетия характер внутри- и межгодовой изменчивости циркуляционных процессов в средних широтах свидетельствует о преобладании меридиональных режимов в атмосфере в настоящее время. Отчасти это объясняется более сильным сигналом глобального потепления в высоких широтах по сравнению с тропиками. Однако вопрос о роли океана в динамике циркуляционных режимов также является важным, поскольку океан может генерировать внутренние (естественные) моды изменчивости в атмосфере, согласующиеся или не согласующиеся с глобальными трендами [4, 5]. В частности, в [1, 2] было показано, что океанические процессы играют важную роль в формировании циркуляционных режимов в атмосфере.

В данной работе рассматривается связь турбулентных потоков тепла из океана с полем про-

странственных градиентов геопотенциала в средней тропосфере. Поля градиентов геопотенциала отражают развитие высотных фронтальных зон (ВФЗ), которые представляют собой переходные зоны между высокими теплыми антициклонами и высокими холодными циклонами, отображая, таким образом, глобальное распределение крупномасштабных ложбин и гребней в тропосфере. Эволюция ВФЗ влияет на перемещение циклонических образований, формирующихся в результате неустойчивости зонального потока [9], и динамику тропосферных фронтов. Данная работа нацелена на количественную оценку связанности потоков тепла из океана с высотными фронтальными зонами и на понимание механизмов этой связи.

ДАнные И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовались среднемесячные данные о геопотенциале на высоте изобарической поверхности 500 гПа из архива реанализа NCEP/NCAR I [8] и о потоках явного и скрытого тепла из океана из архива реанализа NCEP CFSR [10] за временной период с 1979 по 2014 гг. включительно. Реалистичность циркуляционных характеристик и турбулентных потоков тепла в этих реанализах для средних широт была показана в [6], где, в частности, отмечались существенные неопределенности в высоких и экваториальных широтах, которые не рассматриваются в нашей работе. Все расчеты проводились на регулярной сетке с пространственным шагом $2.5^\circ \times 2.5^\circ$. По данным реанализа NCEP/NCAR I были рассчитаны модули горизонтального градиента геопотенциала с помощью аппроксимации производных геопотенциала методом центральных разно-

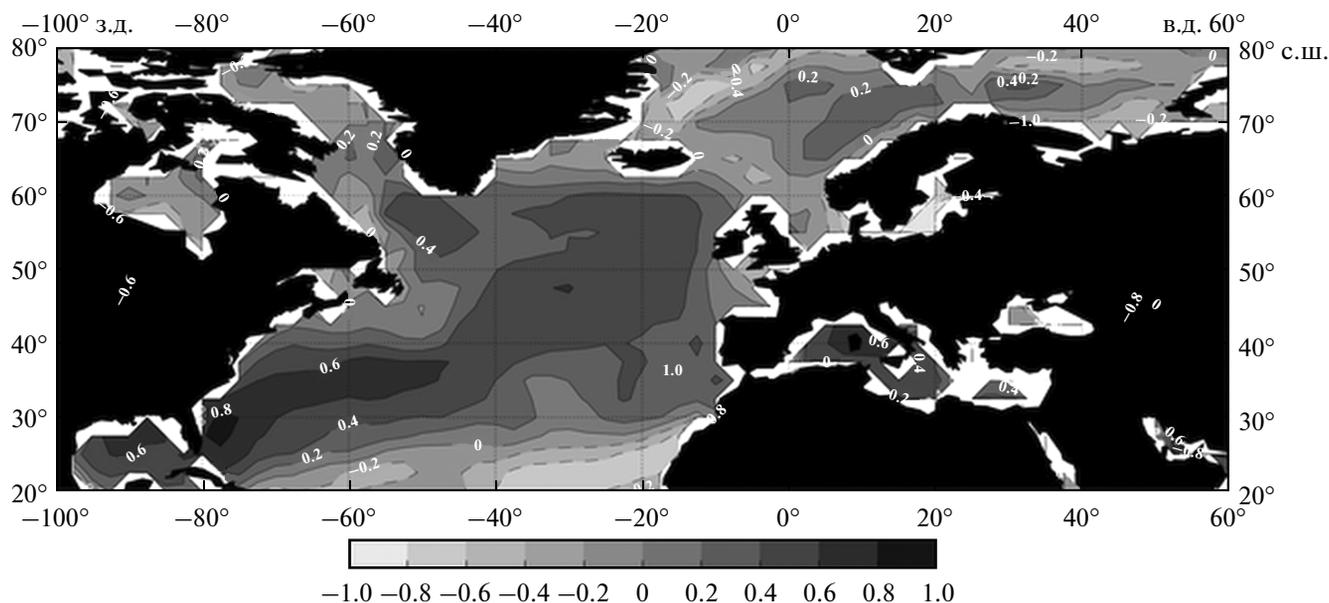


Рис. 1. Коэффициенты линейной корреляции между среднемесячными потоками океанического тепла и среднемесячными значениями модуля градиентов геопотенциала на изобарической поверхности 500 гПа в Северной Атлантике (январь).

стей. Данные о суммарном потоке тепла от океана были рассчитаны как сумма турбулентных потоков скрытого и явного тепла из реанализа NCEP CFSR. Для каждого узла регулярной сетки были рассчитаны коэффициенты линейной корреляции Пирсона между значениями модуля градиента геопотенциала на высоте изобарической поверхности 500 гПа и суммарного потока тепла от океана и оценена их значимость на 5%-ном уровне. Для дальнейшего анализа был выбран Атлантико-Европейский сектор от 100° з.д. до 60° в.д. Основная цель исследования состояла в том, чтобы на основе линейного корреляционного анализа выяснить, существуют ли значимые корреляционные связи между среднемесячными турбулентными потоками тепла из океана и среднемесячными характеристиками циркуляции в средней тропосфере. В статье рассматривается зимний период, характеризующийся наиболее интенсивным тепловым взаимодействием океана и атмосферы. Ниже представлены результаты для января, хотя сходные результаты были получены для всех зимних месяцев.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Прежде всего, рассмотрим распределение локальных коэффициентов корреляции (R) между потоками тепла и модулем градиента геопотенциала, представленное на рис. 1. Практически над всей акваторией Северной Атлантики отчетливо прослеживается положительная линейная связь между потоком океанического тепла и модулем

градиента геопотенциала. Максимальные коэффициенты корреляции наблюдаются в районе продолжения Гольфстрима и его перехода в Североатлантическое течение, где $R = 0.85$. К востоку область положительной корреляции, немного ослабевая до значений 0.5–0.6, протягивается до Британских островов вдоль Североатлантического течения. В этих широтах локализуется североатлантическая ветвь ВФЗ. Таким образом, усиление потока тепла из океана в Северной Атлантике четко связано с усилением термобарических контрастов в средней тропосфере и, следовательно, способствует интенсификации североатлантической ветви ВФЗ.

В районе южного побережья о. Гренландия (в поле градиента геопотенциала в этом районе отмечается небольшой гребень) наблюдается еще один очаг повышенной положительной связи ($R > 0.5$) между потоками тепла и градиентом геопотенциала. Очаги отрицательной статистически значимой корреляции прослеживаются лишь севернее 70° с.ш., в полярных широтах, и южнее 20° с.ш., в тропических широтах, однако к данным реанализов в этих районах надо относиться с осторожностью. Кроме того, в тропиках значительную роль могут играть радиационные потоки, не исследуемые в нашей работе. Максимальный отрицательный коэффициент корреляции достигает значения $R = -0.59$ в районе западного побережья Северной Африки и приурочен к холодному Канарскому течению, где это ожидаемо вследствие очень малых, а часто отрицательных (направленных в океан) потоков тепла.

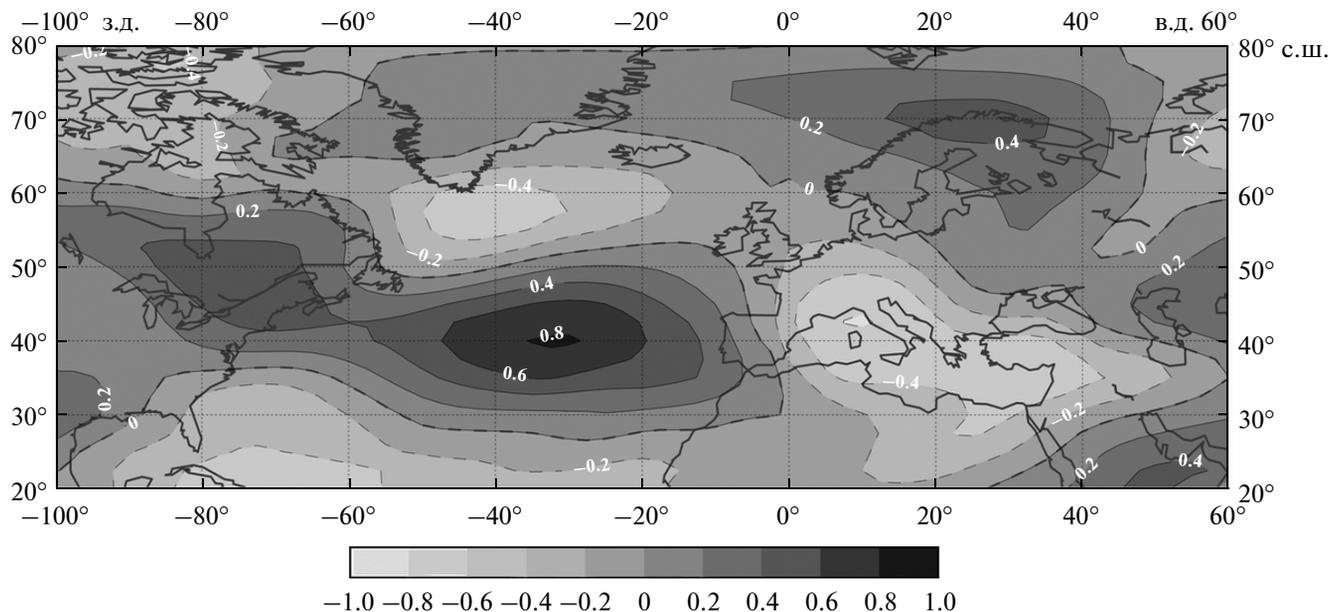


Рис. 2. Коэффициенты линейной корреляции между среднемесячными потоками океанического тепла в Ньюфаундлендской ЭАЗО и среднемесячными значениями модуля градиентов геопотенциала на изобарической поверхности 500 гПа в Атлантико-Европейском секторе (январь).

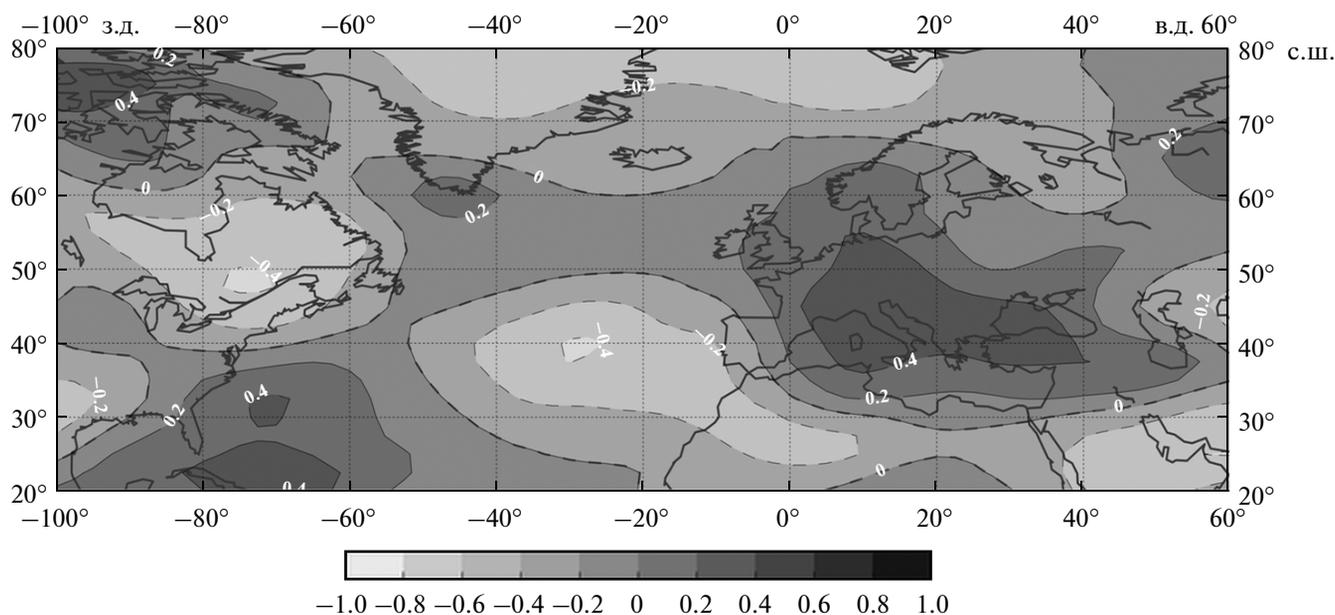


Рис. 3. Коэффициенты линейной корреляции между среднемесячными потоками океанического тепла в Норвежской ЭАЗО и среднемесячными значениями модуля градиентов геопотенциала на изобарической поверхности 500 гПа в Атлантико-Европейском секторе (январь).

На следующем этапе было исследовано влияние потоков тепла на характеристики ВФЗ и на формирование полей модуля градиента геопотенциала в средней тропосфере над Атлантическим и Европейским секторами в ключевых районах Северной Атлантики: 1) Ньюфаундлендской энергоактивной зоне (НфЭАЗО) и 2) Норвежской

энергоактивной зоне (НЭАЗО) [3]. Распределение ассоциированных корреляций представлено на рис. 2 и 3. Как видно из рис. 2, поле коэффициентов корреляции в первом случае демонстрирует характерную дипольную структуру как над Северной Атлантикой, так и над Европейским сектором. Область максимальных положительных ко-

эффициентов корреляции между потоками тепла в НфЭАЗО и модулем градиента геопотенциала Н500 ($R = 0.82$) расположена в центральной Атлантике вдоль 40° с.ш., она соединяется с очагом положительных корреляций ($R = 0.55$) над северо-востоком Северной Америки. Таким образом, усиление теплоотдачи океана в НфЭАЗО соответствует увеличению градиентов геопотенциала в средней тропосфере в указанных районах, где располагаются североамериканская и североатлантическая ветви ВФЗ. При увеличении потока тепла от океана происходит интенсификация высотных фронтальных зон над Северной Атлантикой. Это свидетельствует об усилении контрастов между высотной ложбиной и высотным гребнем, соответствующих Исландскому минимуму и Азорскому максимуму. Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод об усилении Североатлантического колебания (САК) [7] и интенсификации зонального переноса над Атлантикой при увеличении потока океанического тепла в НфЭАЗО; обратная картина наблюдается при уменьшении потока тепла от океана. Над Европейским сектором область максимальных коэффициентов корреляции ($R = 0.49$) располагается над севером Скандинавии, где в зимний период расположена скандинавская ветвь ВФЗ, которая усиливается при увеличении теплоотдачи океана в НфЭАЗО. Над большей частью Европы и над Средиземноморьем обнаруживается область отрицательных коэффициентов корреляции ($R = -0.61$), свидетельствующих об уменьшении барических контрастов в средней тропосфере над большей частью Европы при увеличении потока тепла от океана в НфЭАЗО. Этот феномен наблюдается при значительной изменчивости синоптических процессов, характерной для зимних условий при положительной фазе САК.

Проведенный анализ показал, что влияние теплоотдачи океана в Ньюфаундлендской ЭАЗО на динамику поля градиента геопотенциала в средней тропосфере соответствует классической схеме развития Североатлантического колебания.

Противоположную картину демонстрирует распределение коэффициентов корреляции для Норвежской ЭАЗО (рис. 3). При усилении теплоотдачи в этом районе Атлантики наблюдается уменьшение градиентов геопотенциала Н500 над центральной частью Северной Атлантики, над северо-востоком Северной Америки ($R = -0.44$) и над северной частью Скандинавии. Соответственно, происходит ослабление североамериканской, североатлантической и скандинавской ВФЗ, зональный перенос становится менее интенсивным и увеличивается частота возникновения меридиональных режимов в атмосфере. Над Европейским сектором, за исключением крайнего севера, расположена область положительных коэффициентов корреляции ($R = 0.54$). При уве-

личении потока тепла от океана в НЭАЗО над большей частью Европы и Средиземноморьем формируется область повышенных градиентов геопотенциала в средней тропосфере, что происходит при достаточно устойчивых процессах в атмосфере, когда в течение длительного времени над регионом располагаются малоподвижные крупномасштабные ложбины и гребни, свидетельствующие о преобладании меридиональных форм циркуляции. При уменьшении теплоотдачи океана в НЭАЗО картина распределения градиентов Н500 приближается к среднемноголетней.

Таким образом, получена картина линейных связей потоков океанического тепла и градиентов геопотенциала в средней тропосфере в зимний период над Атлантико-Европейским регионом. Анализ корреляционных связей между суммарными потоками тепла и градиентом геопотенциала на изобарической поверхности 500 гПа свидетельствует о наличии значимой статистической связи между полями потоков тепла от океана и зонами повышенных термобарических градиентов в средней тропосфере. Аномалии теплоотдачи океана могут быть одной из причин формирования поля градиентов геопотенциала и, следовательно, усиления или ослабления высотных фронтальных зон в средней тропосфере, что, в свою очередь, влияет на развитие циркуляционных режимов, обуславливающих формирование погодных условий над Атлантико-Европейским регионом. Обнаружено также существенное различие в характере влияния теплоотдачи океана для двух энергоактивных зон Северной Атлантики на циркуляционные особенности средней тропосферы над Атлантикой и Европой.

Важной проблемой является выяснение устойчивости обнаруженных связей в зависимости от временных масштабов процессов. Взаимодействие океана и атмосферы может иметь разный характер на масштабах междекадной и межгодовой изменчивости [5], поэтому в дальнейшем было бы полезно изучить процессы на этих масштабах с применением спектральных методов и полюсовой фильтрации. Другим аспектом является исследование обнаруженных закономерностей с точки зрения связи ВФЗ с основным североатлантическим шторм-треком.

Авторы благодарят сотрудницу Лаборатории взаимодействия океана и атмосферы и мониторинга климата Тилинину Наталью за подготовку данных о потоках тепла из массива реанализа NCEP CFSR.

Расчет полей модуля градиентов геопотенциала 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 выполнены за счет РНФ (проект № 14-50-00095).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *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.
3. *Угрюмов А.И.* Закономерности крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы и возможности их использования в долгосрочных гидрометеорологических прогнозах: Дис. на соиск. уч. степ. докт. географических наук. Л., 1986. 465 с.
4. *Bjerknes J.* Atlantic air–sea interaction // *Advances in Geophysics*. Academic Press. 1964. V. 10. P. 1–82.
5. *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).
6. *Gulev S.K., Belyaev K.P.* Probability distribution characteristics for surface air–sea turbulent heat fluxes over the global ocean // *J. Climate*. 2012. V. 25. № 1. P. 184–206.
7. *Hurrell J.W.* Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation // *Science*. 1995. V. 269. P. 676–679.
8. *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.
9. *Kravtsov S., Gulev S.K.* Kinematics of eddy–mean flow interaction in an idealized atmospheric model // *J. Atmosph. Sci.* 2013. V. 70. P. 2574–2595. DOI: 10.1175/JAS-D-12-0309.1
10. *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

Role of the Oceanic Heat Fluxes in the Formation of the Geopotential Gradient Fields in the Middle Troposphere

O. A. Razorenova, P. A. Shabanov

Investigation of the interaction between oceanic heat fluxes and formation of the geopotential gradient fields in the middle troposphere has been carried out by applying linear correlation analysis. Analysis of the spatial distribution of the correlation coefficients has demonstrated the important role of the heat fluxes in the North Atlantic in the formation of the mid-troposphere circulation features in the Atlantic-European region.