ГЛОБАЛЬНАЯ АТМОСФЕРНАЯ ОСЦИЛЛЯЦИЯ В ТРОПОСФЕРЕ И НИЖНЕЙ СТРАТОСФЕРЕ*

И.В. Серых, Д.М. Сонечкин, В.И. Бышев, В.Г. Нейман, Ю.А. Романов

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,

РФ, г. Москва, Нахимовский проспект, 36

E-mails: *iserykh@ocean.ru, dsonech@yandex.ru, byshev.v@mail.ru, vneiman2007@yandex.ru, romanov@ocean.ru*

Исследуется трёхмерная структура аномалий геопотенциала, возникающих в тропосфере и нижней стратосфере при Глобальной Атмосферной Осцилляции (ГАО), ранее обнаруженной в приземных полях температуры и давления. Установлена высокая статистическая значимость этих аномалий, что служит формальным свидетельством их реальности. В тропосфере (800–100 гПа) и в нижней стратосфере (100–30 гПа), структура ГАО существенно изменяется по сравнению с приземными полями, постепенно приобретая зональный характер. По-видимому, это связано с тем, что атмосферный полюсный прилив, вызываемый чандлеровским колебанием полюсов Земли и лунно-солнечной нутацией, почти беспрепятственно огибает Землю, испытывая лишь небольшое топографическое воздействие от континентов.

Ключевые слова: Эль-Ниньо – Южное колебание, Глобальная Атмосферная Осцилляция, геопотенциальные высоты, свободная атмосфера.

Поступила в редакцию: 26.04.2018.

Введение. В исследованиях динамики атмосферы и океана широко используется представление о том, что явления Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК), развивающиеся в приэкваториальной полосе Тихого океана, влияют на погоду и климат практически всюду на Земле. Об этом, как о возможном обстоятельстве, упоминали еще пионеры исследования ЭНЮК Дж. Уолкер, Г. Берлаге, А. Троуп и К. Виртки. Затем появились работы, в которых устанавливалось, что на разных фазах ЭНЮК действительно развиваются свои специфические аномалии в районах Земли, зачастую весьма удаленных от тропиков Тихого океана. Самыми первыми были, вероятно, публикации [1, 2]. Сейчас таких работ столь много, что в журнальной статье возможно перечислить лишь некоторые из них [3–5].

Хотя не было представлено прямых доказательств того, что ЭНЮК является причиной, а эти специфические аномалии – следствием, но найденные связи стали толковать именно в духе такой причинности. Например, К. Тренберз – один из наиболее известных современных исследователей ЭНЮК – начинает свою статью [6] фразой: «One of the most prominent sources of interannual variations

in weather and climate around the world is the ENSO phenomenon».

Такое толкование означает, образно говоря, что «хвост» (ЭНЮК) «виляет собакой» (погодой и климатом всюду на Земле). В этом усомнились В.И. Бышев и соавторы [7, 8], выполнившие тщательный анализ различий в глобальной пространственной структуре приземных полей температуры и давления на экстремальных фазах процессов ЭНЮК, т.е. при возникновении Эль-Ниньо или Ла-Нинья, а также в период, предшествующий этим событиям. Для этого были использованы наиболее полные из имевшихся на тот момент массивов данных метеорологических наблюдений. В результате, была найдена пространственная структура аномалий, названная Глобальной Атмосферной Осцилляцией (ГАО), и возникающая задолго до очередных событий ЭНЮК. Эта структура симметрична относительно экватора, несмотря на различия в конфигурациях континентов северного и южного полушарий. Она покрывает практически всю Землю, в том числе включая в себя аномалии, приписываемые проявлению

* Публикуется в дискуссионном порядке.

дальних связей с ЭНЮК. Поскольку во времени возникновения эти аномалии обнаруживаются до появления событий Эль-Ниньо – Ла-Нинья, саму постановку вопроса об их непосредственной обусловленности явлениями ЭНЮК следует считать некорректной. Из всего этого был сделан вывод, что ГАО – первично, а ЭНЮК – вторично, т.е. «собака виляет хвостом, а не хвост – собакой».

В более поздней работе В.И. Бышева и соавторов [9] был применен *t*-тест Стьюдента к различиям в пространственных структурах между событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Тест показал, что разности значений приземных давления и температуры, свойственные событиям Эль-Ниньо и Ла-Нинья, являются статистически высоко значимыми практически повсюду на Земле, а не только в тропиках Тихого океана (ареале действия ЭНЮК). Тем самым было получено дополнительное формальное доказательство существования ГАО. Хотя проблема причинности ГАО и ЭНЮК в работе [9] специально не рассматривалась, ее авторы на основе вышеизложенного сформулировали и обосновали рабочую гипотезу о том, что основные события ЭНЮК должны рассматриваться как структурные элементы ГАО в тихоокеанском регионе. Это соображение оказалось весьма полезным для проведения нашего настоящего исследования, в котором мы широко используем общеизвестные индексы ЭНЮК в качестве исходных маркеров для определения фазового состояния системы ГАО.

Цель данной работы: не обсуждая проблему причинности, которая требует специального рассмотрения в силу ее чрезвычайной сложности для такой нелинейной динамической системы, как изменчивость глобального климата (см. по этому поводу работу [10]), проследить проявление пространственной структуры ГАО во всей толще тропосферы и нижней стратосферы.

Материалы и методы. Исходными данными для настоящей работы послужили ре-анализы 20thC_ReanV2c, ERA-20C и NCEP/NCAR глобальных среднемесячных полей геопотенциала на стандартных изобарических поверхностях атмосферы, а также температуры воздуха у поверхности Земли (ТВП). Данные

NOAA CIRES 20th Century Global Reanalysis Version 2c (20thC_ReanV2c) заданы в узлах регулярной сетки $2^\circ \times 2^\circ$ на 24 основных изобарических поверхностях от 1000 до 10 гПа для периода 1851–2014 гг. [11]. Данные ECMWF ERA-20C заданы в узлах регулярной сетки $1^\circ \times 1^\circ$ на 37 основных изобарических поверхностях от 1000 до 1 гПа для периода 1900–2010 гг. [12]. Данные NCEP/NCAR Reanalysis заданы в узлах регулярной сетки $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ на 17 основных изобарических поверхностях от 1000 до 10 гПа для периода 1948–2017 гг. [13].

Для всех временных рядов перечисленных массивов данных в каждом узле сетки рассчитывался средний годовой ход рассматриваемых климатических характеристик, который затем вычитался из исходных данных. По полученным таким образом полям аномалий ТВП был рассчитан Расширенный океанический индекс Эль-Ниньо (Extended Oceanic Niño Index – EONI) [9]. Он представляет собой скользящее трехмесячное сглаживание средних аномалий ТВП в районе (5° с.ш.– 5° ю.ш., 170° – 80° з.д.). В этом районе судовых метеорологических наблюдений намного больше, чем в районе, рассматриваемом при вычислении общепринятого для определения Эль-Ниньо индекса Niño 3.4 (5° с.ш.– 5° ю.ш., 170° – 120° з.д.).

Линейные тренды были удалены из полученных рядов EONI методом наименьших квадратов с целью подавления междекадных изменений климата. События Эль-Ниньо и Ла-Нинья определялись по EONI так, чтобы значение этого индекса превышало на протяжении 5 или более месяцев подряд $+0,5^\circ\text{C}$ или было меньше $-0,5^\circ\text{C}$, соответственно, как это уже делалось в работе [9].

Были выбраны последовательности полей аномалий высот геопотенциала для стандартных изобарических поверхностей, соответствующие по времени событиям Эль-Ниньо и Ла-Нинья, и подсчитаны их средние разности так, как это было описано в работе [9]. Кроме того, были подсчитаны среднеквадратические отклонения глобальных полей указанных характеристик для момента каждого такого конкретного события от соответствующего среднего поля во время Эль-

Ниньо или Ла-Нинья. Затем для каждого узла регулярной сетки было вычислено значение t -теста Стьюдента, оценивающего статистическую значимость отличия от нуля средней разности указанных глобальных полей в данном узле расчетной сетки.

Полученные результаты. Сравнение построенных по указанным реанализам глобальных полей разностей аномалий геопотенциала и температуры между противоположными фазами ГАО, рассчитанными в привязке к временной эволюции названного выше индекса ЭНЮК, показало их близкое сходство. Исходя из этого, в данной работе эти поля иллюстрируются только на примере 20thC_ReanV2c, который содержит наиболее представительную выборку: 30 событий Эль-Ниньо и 29 событий Ла-Нинья.

На рис. 1 показано среднее поле разностей аномалий температуры воздуха на уровне 1000 гПа (вверху) и соответствующее ему поле значений вероятностей по t -тесту Стьюдента (внизу) между двумя противоположными фазами ЭНЮК, т.е. при Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Область самых больших по модулю разностей температуры (от 1°C и до более чем 2°C) видна на востоке и в центре приэкваториальной зоны Тихого океана, т.е. в каноническом районе Эль-Ниньо. Вероятности того, что эти разности являются ненулевыми, в центре этой области превосходят 99%. Этого и следовало ожидать согласно принятым в данной работе определениям событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

Вероятности ненулевых разностей весьма велики (95% и выше) не только в каноническом районе Эль-Ниньо. Так, на юге Тихого океана, где разность температур между событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья в среднем составляет 0,5°C, эти вероятности превосходят 99%. Как видно на рис. 1, еще более значительная (1,0°C) положительная разность температуры между двумя фазами ГАО имеет место в симметрично расположенном относительно экватора районе западной Канады. Вероятности положительных разностей температур более 95% видны еще в трех районах: 1) в районе Индийского океана; 2) в тропиках Атлантики и

на Атлантическом побережье Бразилии; 3) в центре и на юге Африки.

Статистически значимые отрицательные разности температуры (с вероятностями более 95%) наблюдаются в нескольких географических районах. Два из них – это канонический для Южного колебания район острова Таити, а также район Алеутского минимума приземного давления. Этот последний район расположен симметрично относительно экватора по отношению к району острова Таити.

Переходя к рассмотрению проявлений ГАО в полях геопотенциала (рис. 2), отметим, что на уровне 1000 гПа поле ГАО очень похоже на то, что свойственно полю средней разности давления на уровне моря, показанному на рисунках в работах [7, 9]. Отрицательные значения (до 20 геопотенциальных метров по модулю) в этом поле, вероятности которых достигают 99%, охватывают почти всю акваторию Тихого океана к востоку от линии смены дат, составляя Х-образную структуру.

Положительные различия (до 10 геопотенциальных метров) почти полностью охватывают акватории тропиков Индийского и Атлантического океанов, а также Африку, архипелаг Индонезии, большую часть Австралии и прилегающие акватории Тихого океана в пределах $\pm 30^\circ$ широты. Значения вероятности разностей геопотенциала в этих районах доходит до 99% из-за сравнительно небольшой изменчивости геопотенциала поверхности 1000 гПа в тропиках. Вне тропиков статистически значимыми (с вероятностями более 95%) являются очаги положительной разности на территории Канады и на юго-востоке Тихого океана. Хотя величина средней разности геопотенциала в этом последнем очаге очень велика (до 30 м), но она теряет свое значение с точки зрения статистической значимости в связи огромной изменчивостью геопотенциала в этом районе, как реальной, так и вызванной ошибками наблюдений. Также статистически значимыми являются ветви Х-образной структуры, выходящие из её центра в сторону: Европы, Южной Атлантики, Новой Зеландии и Чукотского полуострова.

Рис. 1. Поле разностей аномалий температуры воздуха на уровне 1000 гПа между противоположными фазами ГАО (а) и соответствующее ему поле вероятностей по *t*-тесту Стьюдента (b)

Рис. 2. Поле разностей аномалий геопотенциала на уровне 1000 гПа между противоположными фазами ГАО (а) и соответствующее ему поле вероятностей по *t*-тесту Стьюдента (b)

Для уровня 800 гПа (рис. 3) пространственная структура поля средней разности геопотенциала остается, в целом, похожей на ту, что свойственна уровню 1000 гПа. Однако центр Х-образной структуры отрицательной разности на этом уровне уже начинает разрушаться. Средняя разность геопотенциала непосредственно в каноническом районе Эль-Ниньо (центр и восток приэкваториальной области Тихого океана) составляет менее чем 5 м по модулю, т.е. меньше, чем для уровня 1000 гПа, и она является уже статистически незначимой (значения вероятностей меньше 80%). С другой стороны, несколько увеличиваются значения положительной разности геопотенциала и соответствующие им значения вероятностей на востоке Индийского океана и в Индонезии. Очаги положительных разностей в приэкваториальной Атлантике, на севере Канады и на юго-востоке Тихого океана также несколько усиливаются.

Для уровня 500 гПа глобальная структура среднего поля разности показана на рис. 4. Она является почти зональной, что соответствует результатам, полученным в [14]. Во всем тропическом поясе средняя разность геопотенциала превосходит 10 геопотенциальных метров, а значения её вероятностей превосходят 99%. Вне тропического пояса на севере и юге Тихого океана видны очаги очень больших отрицательных разностей геопотенциала (до 30 м по модулю) с высоким уровнем статистической значимости (более 99%), как бы сохранившихся от концов Х-образной структуры, описанной выше для полей геопотенциала уровней 1000 и 800 гПа. Ветви Х-образной структуры, вытянутые на север и юг Атлантики также видны, но уже не являются целиком статистически значимыми. Зато очаги положительных средних разностей, соответствующие упоминавшимся выше антициклонам на самом юге Тихого океана, на Аляске и в Канаде, стали еще более мощными и статистически значимыми (вероятности более 99%). Таким образом, сказывается уменьшение влияния расположения океанов и континентов на пространственную структуру ГАО. По-видимому, это связано с тем, что атмосферный полюс-

ный прилив, вызываемый чандлеровским колебанием полюсов Земли и лунно-солнечной нутацией, почти беспрепятственно огибает Землю, испытывая лишь небольшое топографическое воздействие от континентов.

На рис. 5 показано поле средней разности геопотенциала для уровня 100 гПа. Зональная структура этого поля выражена еще более резко, чем для уровня 500 гПа. В тропическом поясе положительные разности геопотенциала превосходят 30 м. Усилились и все прочие очаги значительных по модулю разностей геопотенциала. Однако, в связи с гораздо большей изменчивостью самого поля геопотенциала для уровня 100 гПа по сравнению с полем для уровня 500 гПа, значения соответствующих вероятностей несколько уменьшились, хотя довольно высокая статистическая значимость некоторых очагов наибольших значений разности геопотенциала в высоких широтах сохранилась.

Поля средней разницы для еще более высоких уровней (50 и 30 гПа), которые также были построены, качественно не отличаются от поля для уровня 100 гПа. Но статистическая значимость очагов в этих полях все более уменьшается, так что для уровня 30 гПа значения вероятностей, превышающие 90%, остаются только в тропической зоне. Несмотря на то, что для уровня 10 гПа формальная статистическая значимость повсеместно теряется, основные элементы зональной структуры ГАО на всех указанных стратосферных уровнях сохраняются.

Заключение.

1. Найдено, что Глобальная Атмосферная Осцилляция (ГАО), ранее выявленная в приземных полях давления и температуры, существует во всей тропосфере и нижней стратосфере (до 30 гПа), сохраняя симметрию относительно экватора своей пространственной структуры.

2. Статистически значимые различия между противоположными фазами ГАО в поле температуры на уровне 1000 гПа вполне сходны с теми, что были выявлены ранее в поле приземной температуры. Различия в поле геопотенциала на уровне 1000 гПа образуют Х-образную структуру, подобную такой структуре,

Рис. 3. Поле разностей аномалий геопотенциала на уровне 800 гПа между противоположными фазами ГАО (а) и соответствующее ему поле вероятностей по *t*-тесту Стьюдента (b)

Рис. 4. Поле разностей аномалий геопотенциала на уровне 500 гПа между противоположными фазами ГАО (а) и соответствующее ему поле вероятностей по *t*-тесту Стьюдента (b)

Рис. 5. Поле разностей аномалий геопотенциала на уровне 100 гПа между противоположными фазами ГАО (а) и соответствующее ему поле вероятностей по t -тесту Стьюдента (b)

ранее найденной в поле приземного давления. Ветви этой Х-образной структуры распространяются на умеренные и высокие широты Тихого и Атлантического океанов и замыкаются над Евразией и югом Индийского океана. Однако последнее замыкание не подтверждается t -тестом Стьюдента из-за большой изменчивости геопотенциала в этом районе.

3. Пространственная структура ГАО с высотой постепенно становится зональной. Отсутствие такой зональности в приземных полях ГАО легко объяснить существенным влиянием на нее океанов и континентов. Так, в работах [15–17] показано как полюсный прилив в Тихом океане, вызванный чандлеровским колебанием полюсов Земли и лунно-солнечной нутацией оси вращения Земли, трансформируется после его отражения от западных берегов Северной и Южной Америки и, в конце концов, превращается в волну, бегущую на запад вдоль экватора. Эта волна дает начало тепловому поверхностному течению Эль-Ниньо. Континенты влияют на западно-восточное распространение атмосферно-

го полюсного прилива как топографические препятствия. Но это влияние гораздо менее существенно, чем отражение океанического полюсного прилива от берегов Америки.

Статья подготовлена при поддержке программы президиума РАН № 1.2.49 «Взаимодействие физических, химических и биологических процессов в Мировом океане».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ropelewski C.F., Halpert M.S. Precipitation Patterns Associated with the High Index Phase of the Southern Oscillation // J. Climate. 1989. V. 2. P. 268–284.
2. Glantz M.H., Katz R.W., Nicholls N. Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies, 535 pp., Cambridge Univ. Press, New York, 1991.
3. Воскресенская Е.Н., Михайлова Н.В. Классификация событий Эль-Ниньо и погодно-климатические аномалии в Черноморском регионе // Доп. НАН України. 2010. № 3. С. 124–130.

4. Коваленко О.Ю., Воскресенская Е.Н. Экстремальные температурные аномалии в Черноморском регионе, обусловленные событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья // Системы контроля окружающей среды. 2017. Вып. 9 (29). С. 89–94.
5. Марчукова О.В., Воскресенская Е.Н., Лубков А.С. Проявление разных типов Ла-Нинья в Черноморском регионе // Системы контроля окружающей среды. 2017. Вып. 8 (28). С. 79–85.
6. Trenberth K.E., Caron J.M. The Southern Oscillation revisited: sea level pressures, surface temperatures, and precipitation // J. Climate. 2000. V. 13. P. 4358–4365.
7. Эль-Ниньо как следствие глобальной осцилляции в динамике климатической системы Земли / В.И. Бышев, В.Г. Нейман, Ю.А. Романов [и др.] // Доклады Академии наук. 2012. Т. 446. № 1. С. 89–94.
8. О влиянии событий Эль-Ниньо на климатические характеристики Индо-океанского региона / В.И. Бышев, В.Г. Нейман, Ю.А. Романов [и др.] // Океанология. 2012. Т. 52. № 2. С. 165–175.
9. О статистической значимости и климатической роли Глобальной атмосферной осцилляции / В.И. Бышев, В.Г. Нейман, Ю.А. Романов [и др.] // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 179–185.
10. Sugihara G., May R., Ye H. Detecting causality in complex systems // Science. 2012. V. 338. P. 496–500.
11. Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D. The Twentieth Century Reanalysis Project // Quarterly J. Roy. Meteorol. Soc. 2011. V. 137. P. 1–28.
12. Stickler A., Brönnimann S., Valente M.A. ERA-CLIM: Historical Surface and Upper-Air Data for Future Reanalyses // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2014. V. 95. No. 9. P. 1419–1430.
13. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. The NCEP / NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. V. 77. P. 437–471.
14. Brands S. Which ENSO teleconnections are robust to internal atmospheric variability // Geophys. Res. Lett. 2017. V. 44. Issue 3. P. 1483–1493.
15. Серых И.В., Сонечкин Д.М. О влиянии полюсного прилива на Эль-Ниньо // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 44–52.
16. Серых И.В., Сонечкин Д.М. О проявлениях движений полюсов Земли в ритмах Эль-Ниньо – Южного колебания // Доклады Академии наук. 2017. Т. 472. № 6. С. 716–719.
17. Серых И.В., Сонечкин Д.М. Хаос и порядок в атмосферной динамике. Часть 2. Межгодовые ритмы Эль-Ниньо – Южного колебания // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25. № 5. С. 5–25.

GLOBAL ATMOSPHERIC OSCILLATION IN TROPOSPHERE AND LOWER STRATOSPHERE

I.V. Serykh, D.M. Sonechkin, V.I. Byshv, V.G. Neiman, Yu.A. Romanov

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
Russian Federation, Moscow, Nakhimovskii prospekt, 36

Three-dimensional structure of atmospheric geopotential anomalies is investigated which arise in the course of the Global Atmospheric Oscillation (GAO) earlier found in the near-surface temperature and pressure fields. A very high statistical significance of these anomalies is found that serves as a formal evidence of their reality. The GAO-structure significantly changes in the troposphere (800–100 hPa) and the lower stratosphere (100–30 hPa) in comparison with the near-surface GAO-structure gradually gaining more and more zonal character. It can be explained by the fact that the atmospheric pole tide caused by beats of the Earth's rotation axis propagates almost free around the Earth, experiencing only a small topographic torque from continents.

Keywords: El Niño – Southern Oscillation, Global atmospheric oscillation, geopotential heights, free atmosphere.