

УДК 551.515.1:551.576.2:551.581.1:551.583

ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИКЛОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И ОБЛАЧНОСТИ В АТМОСФЕРЕ ВНЕТРОПИЧЕСКИХ ШИРОТ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ ПО МОДЕЛЬНЫМ РАСЧЕТАМ В СОПОСТАВЛЕНИИ С ДАННЫМИ РЕАНАЛИЗА И СПУТНИКОВЫМИ ДАННЫМИ

© 2009 г. Член-корреспондент РАН И. И. Мохов, А. В. Чернокульский, М. Г. Акперов, Ж.-Л. Дюфрен, Э. Ле Трет

Поступило 16.09.2008 г.

Проведен анализ изменений характеристик циклонической активности и облачности, в том числе их взаимных изменений, в атмосфере северного полушария (СП) от тропических до полярных широт по модельным расчетам при климатических изменениях в сопоставлении со спутниковыми данными и данными реанализа [1]. Согласно полученным модельным оценкам при глобальном потеплении в XXI в. уменьшение общей площади облаков внетропических широт СП связано с соответствующим уменьшением доли покрытия внетропических широт циклонами.

Цель совместного анализа тенденций изменения характеристик циклонической активности и облачности при изменениях климата связана с необходимостью диагностики взаимной эволюции и взаимного влияния в климатической системе процессов общей циркуляции атмосферы и радиационно-облачных процессов [2–7]. Вихревая (циклоническая и антициклоническая) активность имеет существенное значение как для атмосферной динамики в целом, так и для реализации экстремальных локальных и региональных режимов. Облака, формирование существенной части которых связано с циклоническими условиями, имеют ключевое влияние на радиационные потоки и, как следствие, на температурный режим Земли в целом и отдельных регионов и общую циркуляцию атмосферы.

При анализе использованы результаты численных расчетов среднесуточных глобальных полей атмосферного давления на уровне моря и количества облаков с климатической моделью общей циркуляции (КМОЦ) IPSL-CM4 [8]. КМОЦ

IPSL-CM4 включает в себя модели общей циркуляции атмосферы LMDZ-4 (с 19 уровнями в атмосфере по вертикали и горизонтальным пространственным разрешением $2.5^\circ \times 3.75^\circ$) и океана ORCA (горизонтальным пространственным разрешением 2° с улучшением разрешения до 1° вблизи экватора для Средиземного и Красного морей), блок ORCHIDEЕ для суши и вегетации и блок LIM для морского льда.

В расчетах в КМОЦ IPSL-CM4 задавались антропогенные эмиссии парниковых газов и аэрозоля в атмосферу на основе данных наблюдений для периода 1860–2000 гг. и в соответствии с антропогенным сценарием SRES-A2 для 2001–2100 гг.

Циклоны и антициклоны выделялись соответственно областями пониженного и повышенного давления, ограниченными замкнутыми изолиниями – изогипсами при использовании данных для геопотенциала аналогично [9] (см. также [10]). Анализировались изменения доли площади земной сферы (в частности, внетропических широт СП), покрытой атмосферными вихрями – циклонами, или плотности упаковки циклонов на сфере с в соответствии с определением [11].

Для сравнения использованы результаты анализа характеристик циклонической активности [9, 10] по данным NCEP/NCAR реанализа [12] для атмосферного давления на уровне моря в полосе широт 20° – 80° с.ш. на сетке $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ за каждые 12 ч для периода 1952–2007 гг. Кроме того, использовались спутниковые данные Международного спутникового проекта по климатологии облачности (International Satellite Cloud Climatology Project – ISCCP) в формате D2 для периода 1983–2007 гг. [13].

На рисунке 1 приведены изменения общего количества облаков n и плотности упаковки циклонов c для внетропических широт СП (20° – 80° с.ш.) по модельным расчетам для периода 1860–2100 гг.

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской Академии наук, Москва
Laboratoire Meteorologie Dynamique du CNRS, Paris,
France*

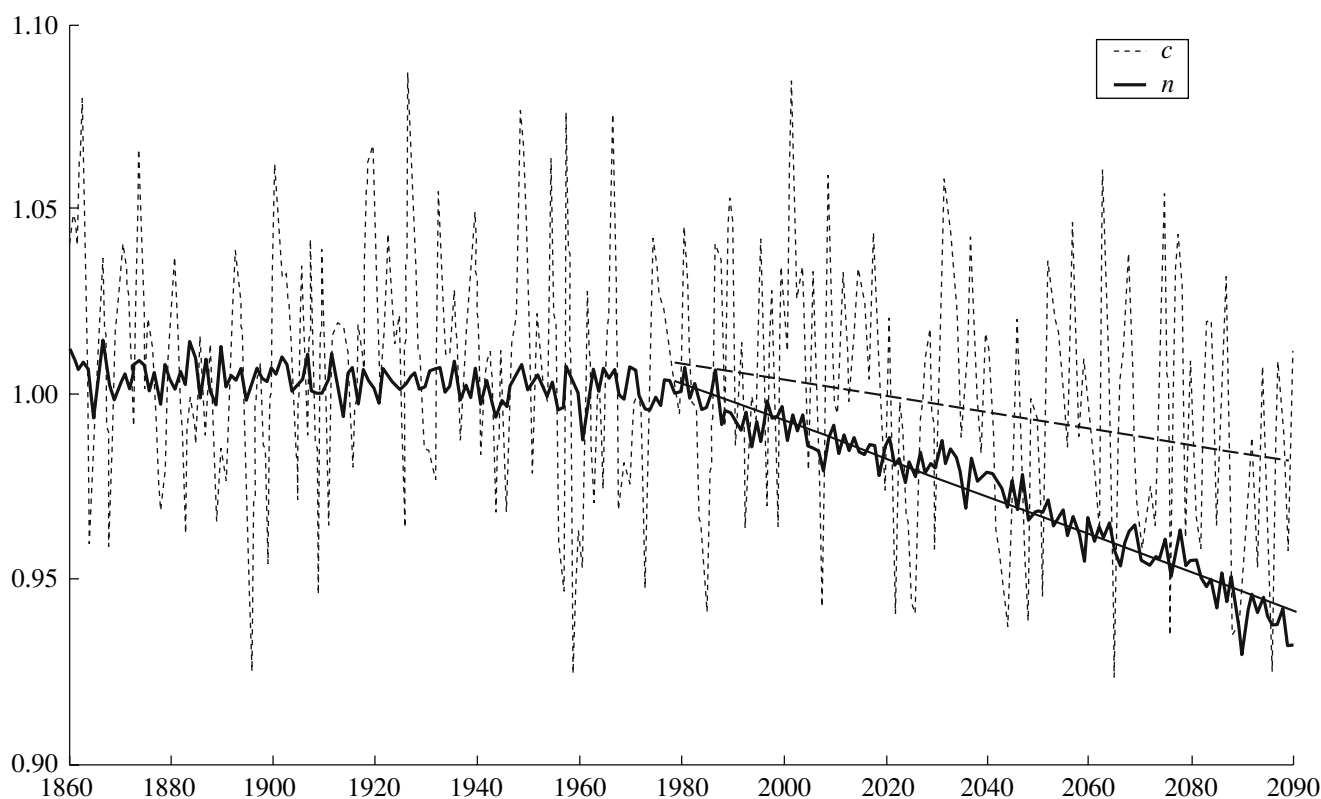


Рис. 1. Изменения среднегодовых нормированных n и c для пояса широт 20° – 80° с.ш. по модельным расчетам для периодов 1860–2000 и 2001–2100 гг. (при антропогенном сценарии SRES-A2 для XXI в.).

Переменные на рис. 1 нормированы на их средние значения для периода 1961–1990 гг. В модели не отмечено существенных изменений n и c с середины XIX в. до конца XX в. Начиная с последних двух десятилетий XX в. до конца XXI в. для обеих величин проявляется заметное уменьшение. Эта тенденция уменьшения статистически более значима для облачности (с интегрально меньшей межгодовой изменчивостью). По среднегодовым данным для XXI в. тренд для доли покрытия циклонами $\frac{dc}{dt}$ оценен в -0.000038 год $^{-1}$ (или $c^{-1} \frac{dc}{dt} = -3.5\%$ за 100 лет) при коэффициенте корреляции $r = -0.29$, а линейный тренд $\frac{dn}{dt}$ для общей облачности получен равным -0.00037 год $^{-1}$ (или $n^{-1} \frac{dn}{dt} = -5.5\%$ за 100 лет) при $r = -0.96$.

Отмеченная в модели тенденция общего уменьшения плотности покрытия земной сферы циклонами связана согласно [11] (см. также [14]) с тенденцией общего ослабления действия механизма бароклинной неустойчивости при глобальном потеплении. При этом в изменениях баро-

клинной неустойчивости атмосферы, которая приводит к генерации атмосферных вихрей, проявляются два противоположных эффекта. С одной стороны, уменьшение меридионального градиента температуры (перепада температур экватор–полюс) в тропосфере при глобальном потеплении способствует снижению скорости генерации и уменьшению общего числа вихрей в атмосфере. С другой стороны, увеличение при этом вертикального градиента температуры в тропосфере (см. также [15]) и уменьшение ее статической устойчивости приводят к увеличению скорости генерации вихрей в тропосфере. Различие относительной роли этих конкурирующих факторов в разных регионах и атмосферных слоях (и в разные сезоны) должно приводить к различным тенденциям изменения (по величине и по знаку) вихревой активности в атмосфере. При относительно слабом уменьшении статической устойчивости тропосферы (а тем более при ее увеличении) следует ожидать уменьшения общего числа вихрей в атмосфере при глобальном потеплении.

Следует отметить, что общая тенденция уменьшения плотности покрытия земной сферы циклонами при общем уменьшении перепада температур в тропосфере при глобальном потепле-

нии не исключает особых режимов для отдельных регионов и атмосферных слоев и для отдельных диапазонов функций распределения циклонов в зависимости от их мощности и размеров. В частности, не только не исключено, а вполне реально усиление роли интенсивных циклонов, увеличение меридиональных температурных градиентов, например в верхней тропосфере. Последнее реально в связи с охлаждением стратосферы и мезосферы при глобальном потеплении у поверхности и в тропосфере в целом, в частности в случае антропогенных воздействий с увеличением в атмосфере содержания парниковых газов. В этом случае проявляется усиление субтропического струйного течения с максимумом в разрыве тропопаузы с проявлением влияния этого эффекта и в тропосфере с увеличением, например, зональной скорости ветра у поверхности в некотором диапазоне средних широт. В целом же при общем потеплении тропосферы следует ожидать общего уменьшения зональной геострофической скорости в ветра.

Относительно же общей облачности до сих пор существует большая неопределенность в оценке тенденций ее изменения при глобальном потеплении и по данным наблюдений, и по модельным расчетам, даже в знаке возможных изменений облачности. Это связано с различными механизмами формирования разных типов облаков и разными эффектами их влияния на климатическую систему, зависящими, в частности, от региона и сезона.

На рисунке 2 представлена зависимость доли облачного неба n от доли покрытия небосвода циклонами c в поясе широт 20° – 80° с.ш. по среднегодовым данным на основе модельных расчетов для XXI в. при антропогенном сценарии SRES-A2. Согласно рис. 2 проявляется общая корреляция n и c для XXI в.

Следует отметить, что средние значения доли небосвода c облаками и циклонами существенно различаются. На рис. 3 приведены широтные распределения c и n для периода 1984–2000 гг. по модельным расчетам в сопоставлении с данными NCEP/NCAR реанализа (для c) и спутниковыми данными ISCCP (для n). Согласно модельным результатам $n \sim \frac{2}{3}$, а $c \sim 10^{-1}$, что в целом согласуется со спутниковыми и наземными данными для облачности и оценками для плотности покрытия Земли циклонами по данным наблюдений и реанализа (см. [2, 11]). Для периода 1984–2000 гг. по данным NCEP/NCAR реанализа $c = 0.10$, а по данным ISCCP $n = 0.66$. При этом $\frac{c}{n} = 0.15$, т.е. покрытие небосвода облаками в 6–7 раз превышает соответствующее покрытие циклонами. По модельным расчетам для периода 1984–2000 гг. $c =$

$= 0.14$, $n = 0.64$, а $\frac{c}{n} = 0.22$. Последняя оценка соответствует тому, что в модели покрытие небосвода облаками примерно в 5 раз превышает соответствующее покрытие циклонами.

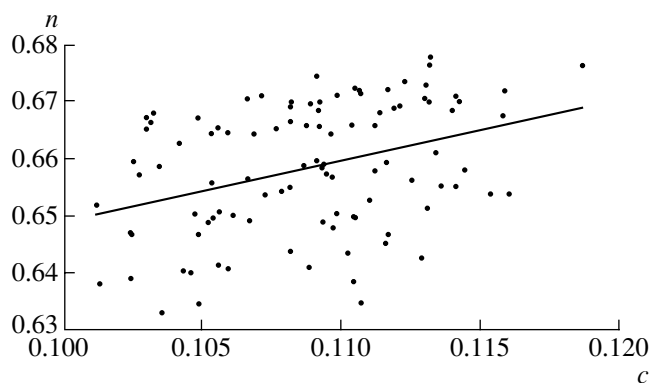


Рис. 2. Доля облачного неба n в зависимости от доли покрытия небосвода циклонами c в поясе широт 20° – 80° с.ш. по среднегодовым данным на основе модельных расчетов для XXI в. при антропогенном сценарии SRES-A2.

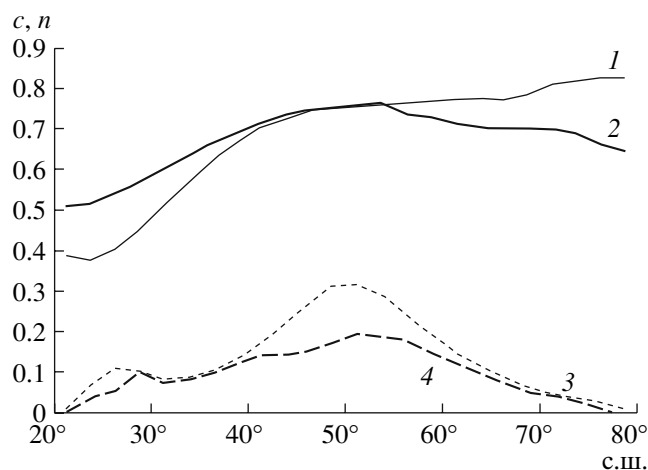


Рис. 3. Широтное распределение c (3) и n (1) для периода 1984–2000 гг. по модельным расчетам в сопоставлении с данными NCEP/NCAR реанализа для c (4) и спутниковыми данными ISCCP для n (2).

зистационарных атмосферных образований с минимумом давления у поверхности и восходящими токами, в том числе на ветвях меридиональных и зональных ячеек общей циркуляции (ячейки Хэдли в приэкваториальных широтах и на границе полярной ячейки и ячейки Ферреля в субполярных широтах, циркуляции Уокера), в циклонических центрах действия атмосферы (Исландском и Алеутском океанических минимумах, летних Южноазиатском и Североамериканском циклонах). Облачные режимы характерны для областей фронтальной активности в атмосфере.

Несмотря на большое разнообразие типов облаков и различие механизмов их формирования и динамики согласно рис. 2 в целом для внетропических широт СП по модельным расчетам для XXI в. доли покрытия облаками и циклонами положительно коррелируют (коэффициент корреляции равен 0.36). При этом коэффициент линейной регрессии n на c практически равен 1. Это свидетельствует о том, что в модели при глобальном потеплении в XXI в. уменьшение общей площади облаков внетропических широт СП связано с таким же уменьшением доли покрытия внетропических широт циклонами.

Для XIX–XX вв. значимой корреляции n и c в межгодовых вариациях для внетропических широт СП в модели не выявлено. Для оценок c на основе данных NCEP/NCAR реанализа и для n по спутниковым данным ISCCP для анализировавшегося их общего короткого периода 1983–2000 гг. заметной корреляции также не отмечено.

Необходим детальный анализ для выяснения, с какими типами облаков связаны отмеченные модельные тенденции. Взаимосвязь тенденций изменения доли покрытия внетропических широт СП циклонами с соответствующими изменениями количества облаков разных ярусов можно оценить по рис. 4 на основе численных расчетов с конкретной климатической моделью [8]. На рис. 4 представлены широтные распределения относительных $\left(\frac{\Delta c}{c} \text{ и } \frac{\Delta n}{n}\right)$ изменений c и n (а также соответствующих изменений облаков разных ярусов – нижних (n_n), средних (n_c) и верхних (n_b)) в XXI в. по сравнению с XX в. по модельным расчетам при сценарии SRES-A2. Согласно рис. 4 для относительных изменений c проявляются особенности структуры общей циркуляции атмосферы и ее изменений при глобальном потеплении. Наибольшие изменения доли циклонического покрытия (ее уменьшения) отмечены в средних и субтропических широтах.

Авторы выражают благодарность С. Бони за полезные обсуждения.

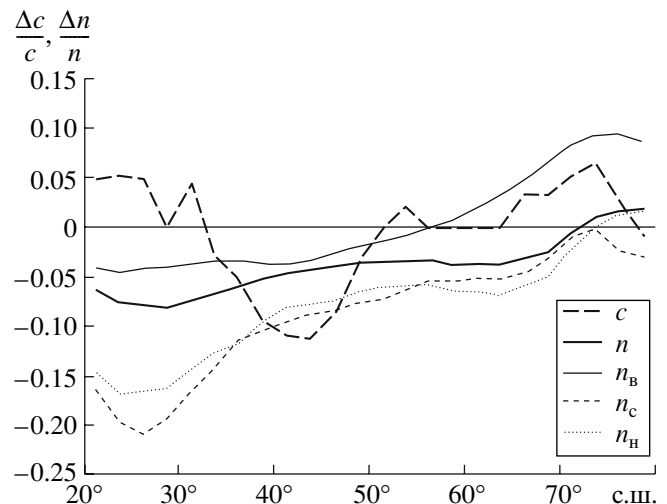


Рис. 4. Широтное распределение относительных $\left(\frac{\Delta c}{c} \text{ и } \frac{\Delta n}{n}\right)$ изменений c и n , а также соответствующих изменений облаков разных ярусов – нижних (n_n), средних (n_c) и верхних (n_b) в XXI в. по сравнению с XX в. по модельным расчетам при сценарии SRES-A2.

Данная работа выполнена в рамках совместного проекта по программе научного сотрудничества РАН и ИЦНИ Франции (CNRS) при поддержке программ РАН, Минобрнауки и РФФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mokhov I.I., Akperov M.G., Chernokulsky A.V. et al. // Res. Activities Atmos. and Ocean. Modeling. 2007. WMO/TD-No.1397. Sect. 7. P. 15–16.
2. Мохов И.И., Мохов О.И., Петухов В.К., Хайруллин Р.Р. // Метеорология и гидрология. 1992. № 1. С. 5–11.
3. Lau N.-C., Crane M.W. // Monthly Weather Rev. 1995. V. 125. P. 3172–3189.
4. Klein S.A., Jakob C. // Monthly Weather Rev. 1999. V. 127. P. 2514–2531.
5. Bony S., Dufresne J.-L. // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32 (20). P. L20806. doi:10.1029/2005GL023851.
6. Norris J.R., Iacobellis S.F. // J. Climate. 2005. V. 18. P. 4862–4878.
7. Tselioudis G., Rossow W.R. // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. P. L02704, doi: 10.1029/2005GL024513.
8. Marti O., Braconnot P., Bellier Y. The New IPSL Climate System Model. IPSL-CM4. Note du Pole de Modelisation. 2005. № 26.
9. Голицын Г.С., Мохов И.И., Акперов М.Г., Бардин М.Ю. // ДАН. 2007. Т. 413. № 2. С. 254–256.

10. Акперов М.Г., Бардин М.Ю., Володин Е.М. и др. // Изв. РАН. ФАО. 2007. Т. 43. № 6. С. 764–772.
11. Мохов И.И., Мохов О.И., Петухов В.К., Хайруллин Р.Р. // Изв. РАН. ФАО. 1992. Т. 28. № 1. С. 11–26.
12. Kistler R., Kalnay E., Collins W. et al. // Bull. Amer. Met. Soc. 2001. V. 82. P. 247–266.
13. Rossow W.B., Duenas E. // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2004. V. 85. P. 167–172.
14. Мохов И.И., Гряник В.М., Доронина Т.Н. и др. Вихревая активность в атмосфере: Тенденции изменения. М.: ИФА РАН, 1993. 96 с.
15. Мохов И.И., Акперов М.Г. // Изв. АН. ФАО. 2006. Т. 42. № 4. С. 467–475.