

Пространственная структура и долговременные изменения оптической нестабильности атмосферы по данным NCEP/NCAR Reanalysis

Е.В. Девятова, П.Г. Ковадло, В.И. Мордвинов*

*Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, а/я 4026*

Поступила в редакцию 3.09.2008 г.

По данным NCEP/NCAR Reanalysis выполнены исследования климатического распределения и долговременных изменений оптической нестабильности земной атмосферы (ОНЗА) и вихревой активности атмосферы. В нижней и средней тропосфере уровень оптической нестабильности зависит от вихревой активности и горизонтальных контрастов температуры в области полярного фронта и на границе «океан – континент». В верхней тропосфере и тропиках колебания температуры связаны с изменениями температуры при вертикальных движениях. В нижней стратосфере изменения ОНЗА обусловлены колебаниями полярного вихря и адиабатическими изменениями температуры. В нижней тропосфере вариации ОНЗА и вихревой активности наиболее тесно связаны в тропиках и субтропиках – на юге Азии, в Африке и Южной Америке. В Южном полушарии в зимний период некоторые благоприятные с точки зрения астроклимата районы (Южная Африка, Южная Америка) оказываются в области положительных тенденций ОНЗА. Возможно, изменения ОНЗА и вихревой активности в этих регионах обусловлены изменениями общей циркуляции атмосферы, в частности углублением Циркумантарктической депрессии.

Ключевые слова: астроклимат, циркуляция атмосферы, вихревая активность.

Введение

Цель данного исследования заключается в разработке подхода к интерпретации и прогнозу изменений астроклимата. Даже если известны главные климатические тенденции выбранного региона, задача остается нетривиальной, так как понятие астроклимата является комплексным и включает набор характеристик, зависящих от глобальных и региональных факторов, различным образом меняющихся со временем. Выполнить анализ всех этих характеристик в рамках одного исследования не представляется возможным. В данной статье подробно рассмотрена одна астроклиматическая характеристика – оптическая нестабильность земной атмосферы (ОНЗА) и уделено внимание одному из основных факторов, определяющих эту характеристику, – вихревой активности атмосферы.

Под оптической нестабильностью земной атмосферы понимается степень неоднородностей показателя преломления, обусловленная вариациями плотности воздуха. Основным фактором, определяющим оптическую нестабильность в пункте наблюдения, является изменчивость температуры, проинтегрированная по вертикальной координате. С увеличением высоты и уменьшением плотности воздуха вклад

температурных вариаций в слоях равной толщины уменьшается, но остается значимым вплоть до высот нижней стратосферы. Влияние колебаний температуры на оптическую нестабильность меньше при высоком температурном фоне и больше при низких температурах. Одной из характеристик нестабильности, учитывающей все эти особенности, является величина, определяемая полуэмпирическим соотношением $ОНЗА \sim \sigma_r/T^2$ [1], где σ_r – среднеквадратическое отклонение температуры, рассчитанное за интервал времени порядка месяца; T^2 – квадрат средней температуры за этот же период.

При таком способе оценки вклад в рассчитываемую характеристику дают и высокочастотные, и низкочастотные колебания температуры. Объектом нашего исследования является низкочастотная составляющая. Оказалось, что низкочастотные вариации не только сами влияют на качество наблюдений, но и являются косвенным индикатором влияния высокочастотной составляющей.

Сопоставление рассчитанных по архивным данным характеристик оптической нестабильности и характеристик, полученных по данным непосредственных оптических и аэрологических измерений на территории бывшего СССР [2], показало их неплохое соответствие, что позволило использовать данный метод и для других районов. Именно эта связь между высоко- и низкочастотными возмущениями позволяет, в принципе, надеяться на возможность прогноза компонентов астроклимата, а для диагностических

* Елена Викторовна Девятова; Павел Гаврилович Ковадло; Владимир Иванович Мордвинов (v_mordv@iszf.irk.ru).

исследований использовать архивы реанализа, полученные с помощью усвоения данных стандартных наблюдений на сети метеорологических станций.

Возможность использования современных архивов для оценки астроклимата важна по двум причинам. Во-первых, архивные данные, интерполированные в узлы регулярной сетки, равномерно заполняют всю поверхность земного шара и, во-вторых, они непрерывны во времени, что позволяет применять их не только для диагностики, но и для решения прогностических задач. Мы использовали данные наиболее цитируемого сейчас архива NCEP/NCAR Reanalysis, в котором накоплен большой массив разнообразных метеопараметров в узлах сетки $2,5 \times 2,5^\circ$ на 17 уровнях атмосферы [3].

Основным погодным фактором, влияющим на изменчивость температуры и оптическую нестабильность, является вихревая и волновая активность атмосферы. В нижней тропосфере преобладают циклонические и антициклонические возмущения, на более высоких уровнях — стационарные и подвижные планетарные волны. В статье мы будем называть и те и другие условно вихревой активностью. Так как в умеренных широтах циркуляция атмосферы приблизительно геострофична, поле скорости можно выразить через распределения давления или функции тока. Удобной для расчетов и достаточно полной характеристикой вихревой активности в умеренных широтах оказывается временная изменчивость этих величин, оцениваемая по дисперсии суточных значений приземного давления или геопотенциала на интервалах времени порядка месяца. В работе [4] эта характеристика была названа вихревым индексом и рассчитана для поверхности 500 гПа.

Следует иметь в виду, что механизм влияния вихревой активности на колебания температуры на разных уровнях атмосферы и в разных широтных зонах, вообще говоря, различен. В нижней и средней тропосфере умеренных широт он носит преимущественно адвективный характер и связан с горизонтальным полем скорости. Для его реализации необходимы пространственные градиенты температуры, в совокупности с вихревой активностью обеспечивающие адвекцию тепла.

Несомненно, формирование температурных контрастов и вихревая активность связаны между собой, однако в первом грубом приближении можно анализировать эти два фактора раздельно, полагая, что температурные контрасты формируются общей циркуляцией атмосферы. В известной степени это действительно так, поскольку градиенты температуры вдоль меридиана являются следствием меридиональных ячеек циркуляции Гадлея и Ферреля, а градиенты температуры вдоль широтных кругов тесно связаны с муссонными эффектами на границах суши и океана.

В верхней тропосфере и в тропиках возрастает вклад вертикальных движений. Изменения температуры в опускающейся или поднимающейся массе воздуха при этом могут быть связаны с выделением тепла фазовых переходов, изменением радиационного баланса при образовании или рассеянии обла-

ков в тропиках или с адиабатическими колебаниями температуры. В нижней стратосфере адиабатические изменения становятся основными.

В какой-то степени компенсировать или усилить роль вихревой активности на оптическую нестабильность атмосферы могут колебания средней температуры. Безусловно, роль этого фактора должна быть значительна в сезонных колебаниях ОНЗА и на больших пространственных масштабах (океан, континент). На коротких интервалах времени и над однородной поверхностью особенности пространственного распределения ОНЗА, скорее всего, в большей степени связаны с распределением вихревой активности, а в нижней тропосфере должны существенно зависеть и от распределения горизонтальных градиентов температуры.

Чтобы убедиться в правильности этих достаточно общих предположений, мы сопоставили пространственные распределения ОНЗА и вихревой активности в разные сезоны на разных высотах атмосферы и в разных регионах земного шара. Для оценки вихревого индекса в узлах сетки были рассчитаны значения дисперсии высоты изобарической поверхности за месячные интервалы времени. За эти же интервалы в узлах сетки вычислялся и параметр оптической нестабильности по приведенной выше формуле. Рассчитанные характеристики были усреднены за период с 1950 по 2006 г. Кроме пространственных распределений оптической нестабильности и вихревой активности были исследованы связи между вариациями обеих характеристик, а также изучены особенности их долговременных изменений.

Пространственные распределения оптической нестабильности и вихревой активности атмосферы

Рис. 1, а, б демонстрирует приземные климатические распределения параметра ОНЗА и вихревой активности в январе и июле.

Сплошной фон отражает распределение оптической нестабильности атмосферы, изолинии — распределение вихревого индекса. Хорошо видны сезонные изменения и той и другой характеристики. Зимой вихревая активность в умеренных широтах выше, чем летом, а средняя температура ниже, что дополнительно усиливает вклад вихревой активности. Уровень ОНЗА невысок над океанами, хотя вихревая активность там может быть большой. Видимо, однородная подстилающая поверхность сглаживает температурные контрасты между воздушными массами и уменьшает вариации температуры. Над континентами распределения ОНЗА имеют квазизональный характер и соответствуют широтному ходу распределения вихревой активности. Широтный ход имеют и температурные градиенты, особенно большие в области полярного фронта. Особыми зонами являются побережья континентов. Контрасты температуры между сушей и океаном приводят здесь к особенно сильным адвективным колебаниям температуры и большим значениям ОНЗА.

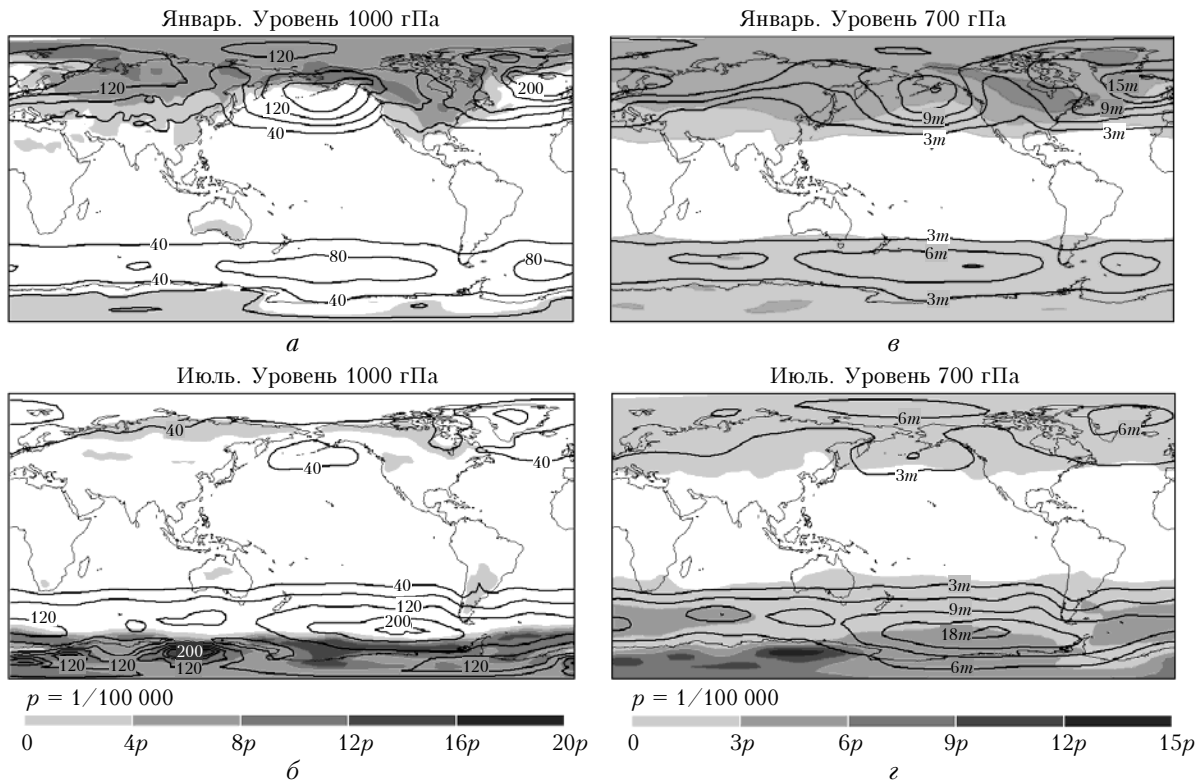


Рис. 1. Распределения параметра ОНЗА и вихревой активности на уровне земли (а, б) и поверхности 700 гПа (в, г) в январе и июле. Изолинии – распределение вихревого индекса с дискретностью 40 м^2 (40, 80, 120...) на уровне земли и с дискретностью 3 м (3m, 6m, 9m...), где $m = 1000 \text{ м}^2$, на уровне 700 гПа. Сплошной фон – распределение ОНЗА в условных единицах

На рис. 1, в, г представлены пространственные распределения ОНЗА (фон) и вихревой активности (изолинии) в январе и июле на уровне 700 гПа, приблизительно соответствующем высоте 3 км. Видно, что на этом уровне особенности пространственного распределения ОНЗА и вихревой активности в целом повторяют особенности распределений вблизи поверхности. Таким образом, в нижней и средней тропосфере, как мы и предполагали, влияние вихревой активности на оптическую нестабильность имеет адвективный характер и зависит от пространственного распределения градиентов температуры в области полярного фронта и на границе между сушей и океаном.

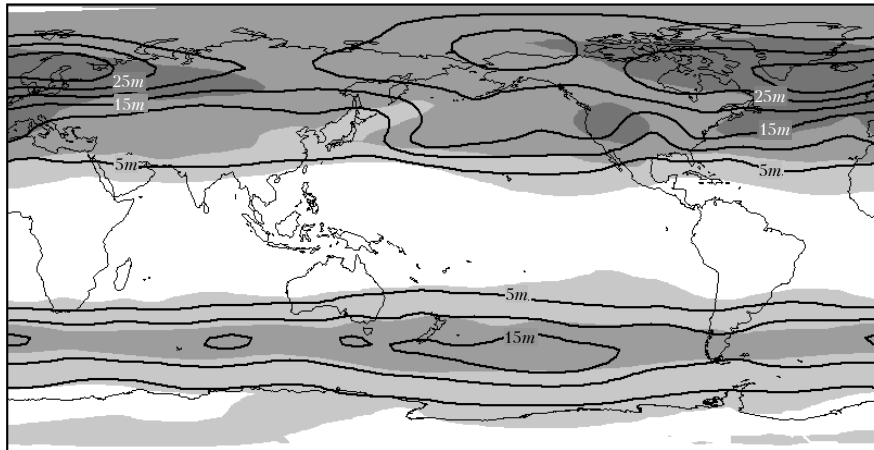
С увеличением высоты, начиная с верхней тропосферы, колебания температуры носят уже не адвективный, а конвективный характер и связаны с адиабатическими изменениями при вертикальных движениях. Уменьшается роль горизонтальных градиентов температуры и температурных различий воздушных масс, усиливается связь с колебаниями давления в волнах Россби. Генерация волн Россби, как известно, происходит в зонах обострений струйных течений, и с этими зонами, как и следовало ожидать, оказываются связанными максимальные значения ОНЗА. Это иллюстрирует рис. 2, на котором представлены распределения параметра ОНЗА и вихревой активности на уровне 150 гПа, лежащем несколько выше тропопаузы, в январе и июле.

Видно, что максимальные значения локализованы над Северной Атлантикой в Северном полуша-

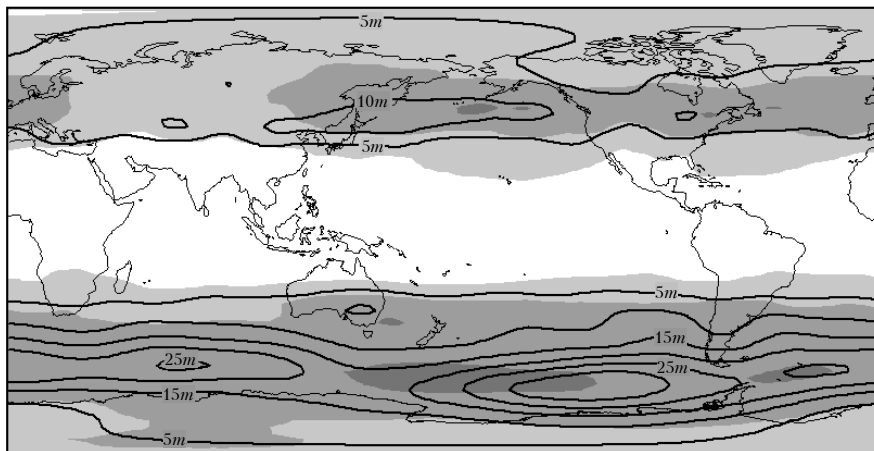
рии и на юге Тихого океана в Южном полушарии. Эти области примерно соответствуют широте полярно-фронтального струйного течения. Над востоком Евразии и востоком Северной Америки оптическая нестабильность несколько понижена, вероятно, вследствие более низких скоростей струйного течения и пониженной волновой активности над однородной холодной поверхностью континента.

На уровне 20 гПа (рис. 3) максимальные значения ОНЗА уже почти равномерно заполняют всю полярную область с локальным максимумом над северо-востоком Евразии и минимумом над Гренландией и Шпицбергом. Локальный максимум, видимо, связан с преимущественной локализацией стратосферных потеплений. Объяснить появление минимума оптической нестабильности сложнее. Климатическое распределение температуры на этом уровне (в статье не приведено) показывает температурный минимум в районе Шпицбергена, что должно способствовать увеличению оптической нестабильности. Однако в этом районе достаточно сложное распределение имеет и вихревая активность, вероятно, компенсирующая влияние температурного фактора. В целом же однородность распределений (см. рис. 3) указывает на то, что полярный стратосферный вихрь представляет собой локализованный объект, в пределах которого все метеопараметры изменяются синхронно. Иными словами, в нижней стратосфере распределение вихревой активности и ОНЗА определяются уже колебанием всего полярного вихря.

Январь. Уровень 150 гПа



Июль. Уровень 150 гПа

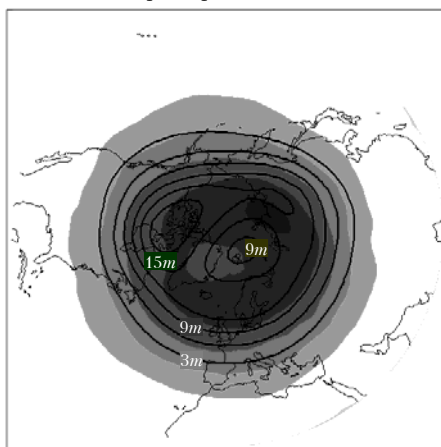


$p = 1/100\ 000$

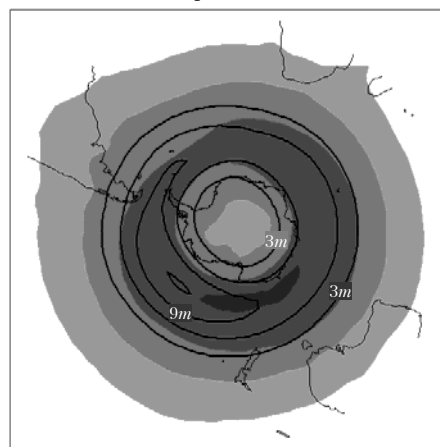
0 3р 6р 9р 12р 15р

Рис. 2. Распределения ОНЗА и вихревой активности в январе и июле на уровне 150 гПа. Изолинии – распределение вихревого индекса с дискретностью 5m (5m, 10m, 15m...), $m = 1000\text{ м}^2$. Сплошной фон – распределение ОНЗА в условных единицах

Январь. Уровень 20 гПа



Июль. Уровень 20 гПа



$p = 1/100\ 000$

0 3р 6р 9р 12р 15р

Рис. 3. Распределения ОНЗА и вихревой активности в январе и июле на уровне 20 гПа. Изолинии – распределение вихревого индекса с дискретностью 3m (3m, 6m, 9m...), $m = 10000\text{ м}^2$

Таким образом, в целом подтверждаются наши исходные предпосылки. Факторы, влияющие на оптическую нестабильность атмосферы в умеренных широтах, можно систематизировать следующим образом: нижняя тропосфера — вихревая активность и горизонтальные градиенты температуры (адвекция); верхняя тропосфера — волны Россби в зонах повышенной бароклинности и вертикальные движения; нижняя стратосфера — крупномасштабная низкочастотная изменчивость и вертикальные движения.

Связь между вариациями оптической нестабильности и вихревой активности атмосферы

Теперь перейдем к следующей задаче исследования — изучению вариаций оптической нестабильности. Для упрощения задачи ограничимся рассмотрением связи ОНЗА с вихревой активностью только на одном уровне — в нижней тропосфере. Этот слой воздуха особенно важен, так как дает основной вклад в качество изображений, а его исследование затруднено необходимостью учета дополнительных факторов — орографии, влияющей на пространственное распределение горизонтальных градиентов температуры, различий в свойствах синоптических образований и общей циркуляции атмосферы умеренных и тропических широт. Так как эти факторы по-разному меняются со временем, поле коэффициентов корреляции между изменениями во времени

ОНЗА и вихревой активности имеет достаточно сложную пространственную структуру. Это хорошо видно из рис. 4, а, б, на котором представлены распределения коэффициентов корреляции межгодовых изменений среднемесячных значений ОНЗА и вихревой активности в январе и июле.

Несмотря на близкую пространственную структуру ОНЗА и вихревой активности в умеренных и высоких широтах, более высокой оказывается корреляция между этими величинами в тропиках и субтропиках, вдали от областей больших горизонтальных контрастов температуры. Коэффициенты корреляции имеют значения в интервале 0,5–0,7 на юге Азии, в Африке и в Южной Америке. Вероятно, это связано с тем, что в указанных регионах колебания температуры определяются в большей степени уже не адвекцией, зависящей не только от вихревой активности, но и от распределения горизонтальных градиентов температуры, а конвекцией и связанными с вертикальными движениями факторами нагрева и охлаждения. В отличие от горизонтального поля температуры, меняющегося со временем почти независимо от изменений вихревой активности, конвективные факторы нагрева и охлаждения тесно связаны с изменениями вихревой активности, что и определяет высокий уровень статистической связи между ОНЗА и вариациями вихревой активности.

Этот результат, на наш взгляд, достаточно важен, поскольку позволяет в исследовании временной динамики ОНЗА ограничиться анализом одного фактора — вихревой активности, причем в областях,

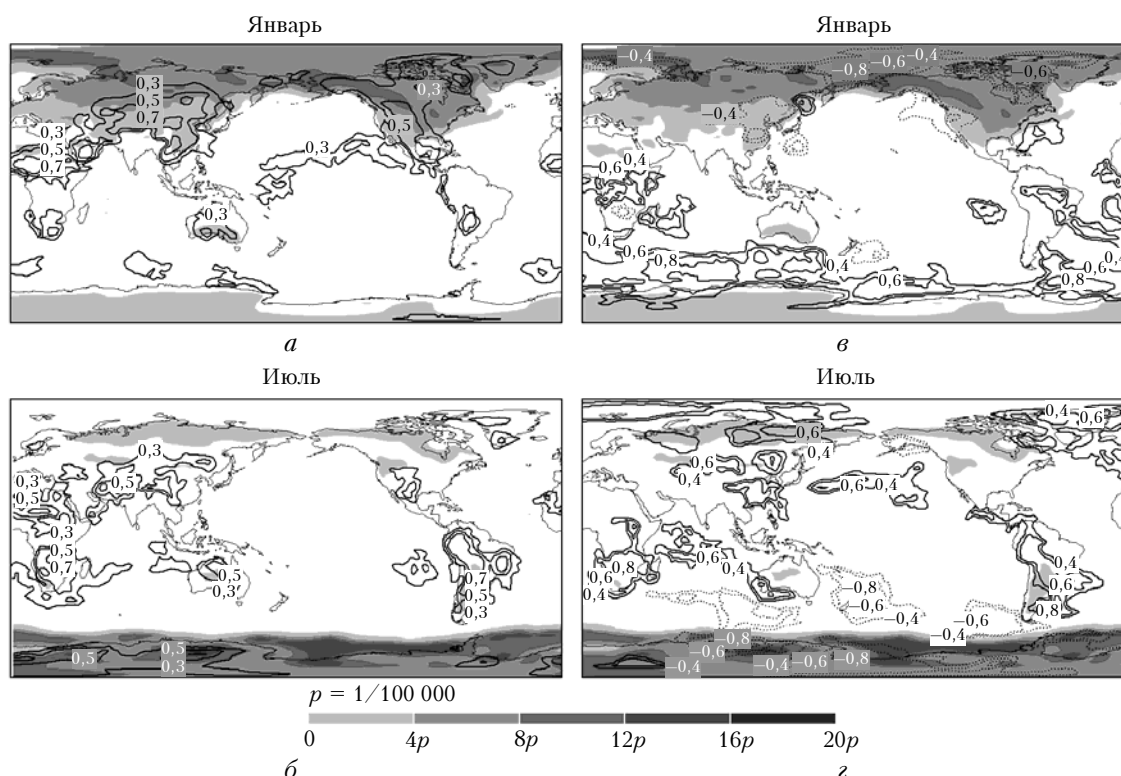


Рис. 4. Распределения коэффициентов корреляции межгодовых вариаций среднемесячных значений ОНЗА с изменениями вихревой активности (а, б) и линейно возрастающей функции (в, з) в январе и июле за период с 1950 по 2006 г. Сплошной фон — распределение параметра ОНЗА на уровне земли

наиболее интересных с точки зрения астрономических наблюдений, — тропиках и субтропиках обоих полушарий. Использование вихревого индекса тем более удобно, что относительно его свойств выполнено большое количество исследований и, что самое главное, этот параметр можно пытаться связать с характеристиками общей циркуляции атмосферы.

Долговременные изменения оптической нестабильности атмосферы

Перейдем теперь к анализу общих тенденций изменений ОНЗА и вихревой активности. Анализ долговременных изменений вихревой активности в нижней тропосфере выполнен в работах [5]. Было обнаружено, что в среднем в Южном полушарии вихревая активность выше, чем в Северном полушарии, и быстро возрастает, начиная с середины 70-х гг. Заметим, что в Южном полушарии возрастает и амплитуда стационарных волн [6]. Объяснения этому факту пока нет. Пока все эти изменения происходят в высоких широтах, вдали от пунктов размещения основных обсерваторий.

В изменениях ОНЗА мы также попытались выделить трендовую составляющую. С этой целью были построены распределения коэффициентов корреляции вариаций ОНЗА в узлах сетки в январе и июле с изменением линейно возрастающей функции (рис. 4, *в*, *г*). Такой способ оценки достаточно приближителен, однако нагляден и позволяет оценивать общие тенденции в динамике величин на всем земном шаре. Видно, что в январе в Южном полушарии области положительных трендов расположены, главным образом, в Индийском и Атлантическом секторах Циркумантарктической депрессии. Оптическая нестабильность понижается в высоких широтах Северного полушария — в полярных областях Канады и в районе Чукотки. Эти области, однако, не представляют большого интереса, так как находятся в районах с высоким климатическим уровнем ОНЗА вдали от крупных обсерваторий. В июле области положительных тенденций в Южном полушарии оказываются смещенными в более низкие широты — в Южную Африку, центр Индийского океана и Южную Америку. Можно предположить, что происходящее в настоящее время ухудшение астроклиматических условий на обсерваториях Южной Америки является следствием этих тенденций. Карты, представленные на рис. 4, *а*, *б*, показывают, что долговременные изменения ОНЗА в этом регионе обусловлены главным образом изменениями вихревой активности. Изменения самой вихревой активности, возможно, обусловлены изменениями общей циркуляции атмосферы, в частности, углублением Циркумантарктической депрессии и переносом части массы воздуха в тропики и субтропики [7].

Заключение

В работе проведено исследование климатического распределения и долговременных изменений од-

ной из важных характеристик астроклимата — оптической нестабильности атмосферы. Рассматривался один из основных факторов, влияющих на ОНЗА, — вихревая активность атмосферы. В нижней и средней тропосфере наряду с вихревой активностью и волнами Россби уровень оптической нестабильности зависит от горизонтальных контрастов температуры в области полярного фронта и на границе «океан — континент». В верхней тропосфере и тропиках колебания температуры носят уже не адвективный характер и связаны с изменениями температуры при вертикальных движениях. В нижней стратосфере изменения ОНЗА обусловлены колебаниями полярного вихря и адиабатическими изменениями температуры.

В приземном слое вариации ОНЗА и вихревой активности наиболее тесно связаны в тропиках и субтропиках — на юге Азии, в Африке и в Южной Америке. Это позволяет в исследовании временной динамики ОНЗА в этих районах ограничиться анализом только одного фактора — вихревой активности, причем в областях, наиболее интересных для астрономических наблюдений, — тропиках и субтропиках обоих полушарий. В Южном полушарии в зимний период некоторые перспективные с точки зрения астроклимата районы (Южная Африка, Южная Америка) оказываются в области положительных тенденций изменений ОНЗА. Возможно, долговременные изменения вихревой активности и оптической нестабильности в этих регионах обусловлены изменениями общей циркуляции атмосферы, в частности углублением Циркумантарктической депрессии.

1. *Татарский В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
2. *Ковадло П.Г.* Оценка оптической нестабильности атмосферы над территорией СНГ по данным аэрологических наблюдений // *Оптика атмосф. и океана.* 1998. Т. 11. № 9. С. 921–930.
3. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Wollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetma A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1996. V. 77. N 3. P. 437–471.
4. *Wallace J.M., Hsu H.N.* Low frequency fluctuations in zonal indices and stationary wave configurations // *J. Atmos. Sci.* 1983. V. 40. N 9. P. 2211–2219.
5. *Девятова Е.В., Ковадло П.Г., Мордвинов В.И.* Долговременные вариации вихревой активности атмосферы // *Солнечно-земная физика.* 2008. Вып. 12 (в печати).
6. *Мордвинов В.И., Латышева И.В., Караханян А.А., Иванова А.С.* Долговременные изменения характеристик «быстрых» и «медленных» атмосферных процессов в Северном и Южном полушариях // *Геогр. и природ. ресурсы.* 2003. № 3. С. 156–159.
7. *Девятова Е.В., Мордвинов В.И., Иванова А.С., Латышева И.В.* Связь межгодовых вариаций приземного давления в Азии с явлением Эль-Ниньо и изменениями циркуляции в Южном полушарии // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18. №. 8. С. 688–693.

E.V. Devyatova, P.G. Kovadlo, V.I. Mordvinov. **Spatial structure and long-term variations of optical instability of the atmosphere by NCEP/NCAR Reanalysis data.**

The investigation of the climatic distribution and long-time variations of the atmospheric optical instability and eddy activity was performed with the use of the NCEP/NCAR Reanalysis data. In the low and middle atmosphere the optical instability depends on the eddy activity and horizontal temperature gradients in the polar front area, as well as on the «ocean – continent» border. In the upper atmosphere and in the tropic regions the temperature variations are associated with temperature changes in the vertical motions. In the low stratosphere the variations of the Polar vortex and adiabatic temperature changes affect the optical instability. In the low troposphere the optical instability and eddy activity variations have the closest correlation in the subtropics and tropics – on the south of Asia, in the Africa and Southern America. In the Southern Hemisphere in the wintertime the several regions, interesting for the astroclimate (Southern Africa, Southern America), are in the area of the optical instability increase. Possibly, the atmospheric general circulation changes due to the Circumantarctic depression deepening, affecting the optical instability and eddy activity changes in these regions.