



УДК 551.5

## Исследование крупномасштабных астроклиматических характеристик

П. Г. Ковадло ([kovadlo2006@rambler.ru](mailto:kovadlo2006@rambler.ru))

О. С. Кочеткова ([olgak@iszf.irk.ru](mailto:olgak@iszf.irk.ru))

А. Ю. Шиховцев ([artempochta2009@rambler.ru](mailto:artempochta2009@rambler.ru))

**Аннотация.** По метеорологическим данным рассчитаны значения флуктуаций показателя преломления воздуха, которые являются показателем оптической нестабильности земной атмосферы. Расчеты выполнены для стандартных барических уровней атмосферы в зимний и летний периоды и представлены в виде распределений по поверхности планеты. Полученные результаты дали возможность выделить перспективные территории для проведения астрономических наблюдений, а также сравнить астроклиматические условия работы крупнейших обсерваторий мира.

**Ключевые слова:** астроклимат, оптическая нестабильность земной атмосферы, флуктуации показателя преломления.

### Введение

Основной величиной, определяющей условия эффективных астрономических наблюдений, является оптическая нестабильность земной атмосферы (ОНЗА), которую можно характеризовать среднеквадратическим отклонением флуктуаций показателя преломления воздуха ( $\sigma N$ ), распределенным в пространстве. Для расчета  $\sigma N$  требуются данные с высоким временным разрешением, характеризующие мелкомасштабную турбулентность. Однако в силу того, что такие измерения требуют больших затрат, они проводятся нерегулярно и только для отдельных пунктов. В результате этого до сих пор не имеется глобальной картины астрономических условий для наблюдений, которая существенно сэкономила бы время и усилия, затрачиваемые на поиск перспективных мест для строительства новых телескопов.

Для климатических оценок ОНЗА на предварительном этапе целесообразно использовать данные сетевых метеорологических наблюдений, предполагая, что высокочастотные колебаниями  $\sigma N$  определяются низкочастотными. Даже фоновые представления о распределении  $\sigma N$  в атмосфере по отдельным территориям и по земному шару, окажут существенную помощь при планировании поиска перспективных мест для астрономических наблюдений.

В работе представлены результаты расчетов и схемы распределений  $\sigma N$  для разных барических уровней в атмосфере. Расчеты выполнены на основе многолетних архивных и справочных данных метеорологических наблюдений в масштабах всей планеты.

### Используемые данные и методика расчетов

Методика расчета флуктуаций показателя преломления на стандартных изобарических поверхностях приведена в работе П. Г. Ковадло [4]. В данной работе расчеты проводились на основе данных архива NCEP/NCAR Reanalysis [5] и климатического справочника [2]. Флуктуации показателя преломления для каждой аэрологической станций или узла сетки размером  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  рассчитывались на основных барических уровнях за период с 1950 по 2009 г. по формуле [3, с. 396]:

$$\sigma N = \frac{A \cdot P}{T^2} \cdot \sigma T, \quad (1)$$

где  $A$  – размерный эмпирический коэффициент, зависящий от длины световой волны и для зеленой линии равный 80 К/мб,  $P$  – среднемесячное значение давления (мб),  $T$  – среднемесячное значение температуры (К),  $\sigma T$  – среднеквадратическое отклонение температуры (К). Далее, рассчитанные значения  $\sigma N$  усреднялись за два трехмесячных интервала года: декабрь – февраль и июнь – август.

Предварительные исследования рядов прямых измерений «seeing» (угла турбуленции) и рядов флуктуаций показателя преломления, рассчитанных по сетевым радиозондовым метеорологическим параметрам, показали их высокую синхронизацию на длительных периодах с коэффициентом корреляции 0,6–0,95. Пример приведен на рис. 1, где показаны средние многолетние сезонные изменения флуктуаций «seeing», полученные на ст. Новосибирск на телескопе АЗТ-7 ( $d = 20$  см) фотографическим способом [1, с. 98–111]. Жирная линия (ось справа) представляет собой интегральные средние сезонные значения  $\sigma N$  в относительных единицах, рассчитанные по аэрологическим данным [2] в 20 км слое атмосферы. Тонкие линии обозначают среднюю сезонную динамику «seeing» в угловых секундах на разных зенитных расстояниях.

Подобная синхронность в изменениях крупномасштабной и мелкомасштабной турбулентности позволяет надеяться на определенные успехи в разработке методики их взаимной оценки, в том числе и в соответствующем спектральном диапазоне оптической турбулентности.

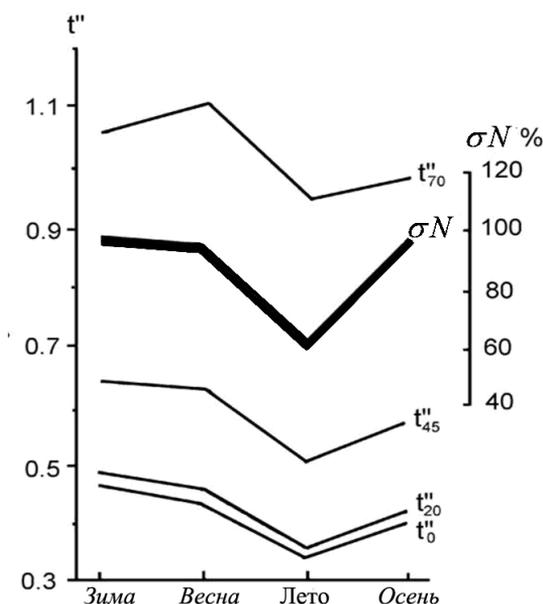


Рис. 1. Сезонные изменения флуктуаций показателя преломления

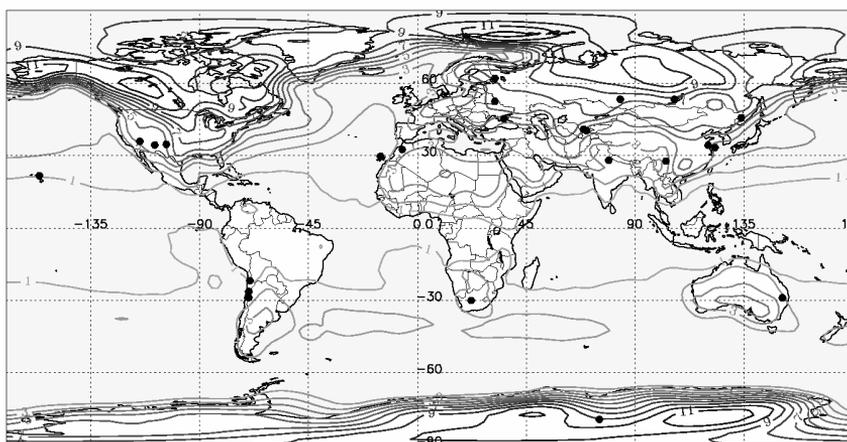
## Результаты

В рамках данного исследования нами была построена схема глобального распределения  $\sigma N$  на стандартных барических уровнях, начиная с 1000 гПа, которая позволила оценить в единой шкале астроклиматические условия существующих обсерваторий и выделить наиболее перспективные пункты для организации и проведения астрономических наблюдений.

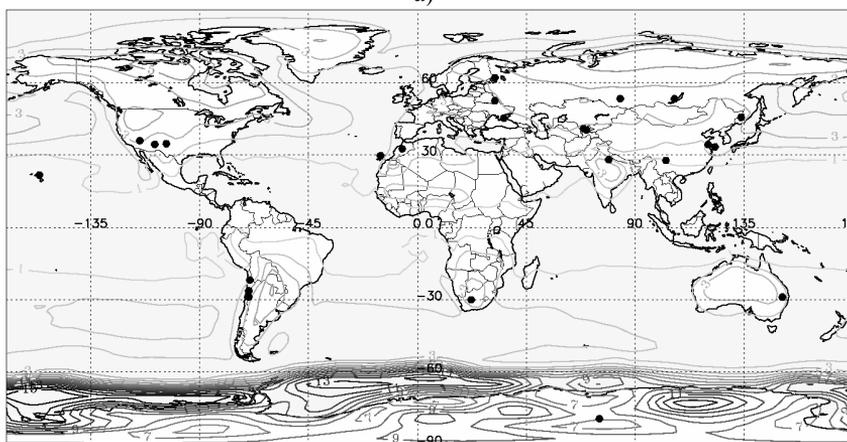
На рис. 2, а, б приведены результаты расчета  $\sigma N$  в виде схем распределения этой величины, ассимилированные на уровень 1000 гПа (на схемах рельеф исключен) за период 1950–2009 гг. Изолинии на этих и последующих схемах показаны в безразмерных единицах показателя преломления  $N$ . Плотность почернения изолиний пропорциональна значению  $\sigma N$ , изолинии для данного уровня проведены через 0,5. Черными точками обозначены крупные астрономические обсерватории и оптические телескопы.

На рисунке 2, а, б четко видна зависимость  $\sigma N$  в высоких и умеренных широтах от сезона года и подстилающей поверхности. Для «зимнего» полушария максимальные значения  $\sigma N$  наблюдаются над побережьями континентов и внутриконтинентальными областями, минимальные – над океанами. Однако в зоне от  $30^\circ$  с. ш. до  $30^\circ$  ю. ш. подобной картины не наблюдается, в этой области значения  $\sigma N$  «не чувствуют» рельеф. Этот факт свидетельствует о том, что вклад рельефа в общий уровень оптической турбулентности зависит от конкретного региона, в частности от широты места.

На рис. 3, а, б показаны результаты расчета  $\sigma N$  на уровне 700 гПа (высота  $\sim 3$  км) за период 1950–2009 гг.



а)



б)

Рис. 2. Распределение  $\sigma_N$  на уровне 1000 гПа: а) декабрь – февраль, б) июнь – август

На этих схемах (рис. 3) горные образования выше 3 км не учитывались. Для большей части территории земного шара уровень 700 гПа характеризует нижнюю часть свободной атмосферы. Однако этот уровень определяется влиянием процессов происходящих в пограничном слое. Наименьшие значения  $\sigma_N$  отмечаются в  $\pm 30$  градусной зоне. В период июнь – август в низких широтах эта зона с минимальными значениями расширяется к северу, в декабре–феврале она сжимается только с северной стороны, не расширяясь к югу. Минимальные значения  $\sigma_N$  в рассматриваемые периоды года локализованы над северной частью Южной Америки и Центральной Америкой, над центральной Африкой и Океанией.

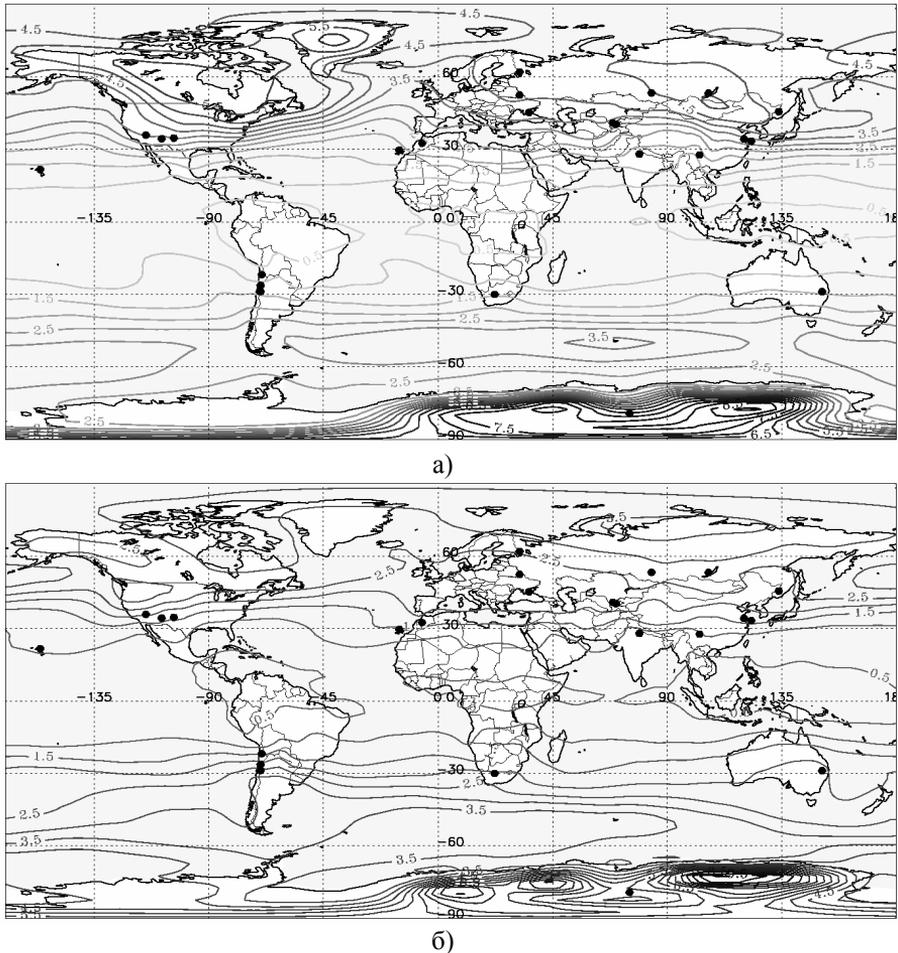


Рис. 3. Распределение  $\sigma N$  на уровне 700 гПа: а) декабрь – февраль, б) июнь – август

Максимальные значения  $\sigma N$  наблюдаются на северо-востоке антарктического материка в оба периода года и в июне–августе достигают 10 единиц. В северном полушарии максимальные значения распределяются над территорией Канады и Гренландией в декабре–феврале и значения  $\sigma N$  достигают 6 единиц. Отметим, что в средних широтах Северного полушария, где располагаются все российские обсерватории,  $\sigma N$  изменяется от 2,5 до 4,5 единиц в декабре–феврале и от 1 до 3 в июне–августе. Наиболее низкие значения в июне–августе наблюдаются на территории южных частей Алтая, Восточной Сибири и Дальнего Востока.

На рис. 3 также видно, что современные обсерватории и крупные телескопы в целом расположены в местах, характеризующихся малыми значениями  $\sigma N$ . Это является несомненным достижением астроклиматологии.

Далее, распределение значений  $\sigma N$  показано в свободной атмосфере на уровне 300 гПа (высота  $\sim 9$  км), который находится под тропопаузой. На этом уровне наблюдаются наиболее высокие скорости ветра и, соответственно, повышенная турбулиизация. Схемы распределения на рис. 4, а, б рассчитаны за 2005–2009 гг.

На рис. 4 видно, что распределение  $\sigma N$  в отличие от нижних уровней (1000, 700 гПа) имеет менее выраженную зависимость от подстилающей поверхности, изолинии в основном ориентированы в зональном направлении. Однако выделяются локализованные области максимумов; в декабре–феврале – над северной частью Канады и Гренландии, западной частью Тихого океана и южной частью Индокитайского полуострова. В июне–августе – над восточной частью Азиатского континента, включая Японские острова и южную часть Австралийского континента. Минимальные значения  $\sigma N$  отмечаются в июне–августе в широтной полосе от  $15^\circ$  с. ш. до  $15^\circ$  ю. ш. Отметим, что сезонные изменения на этом уровне выражены слабее, чем на нижних уровнях.

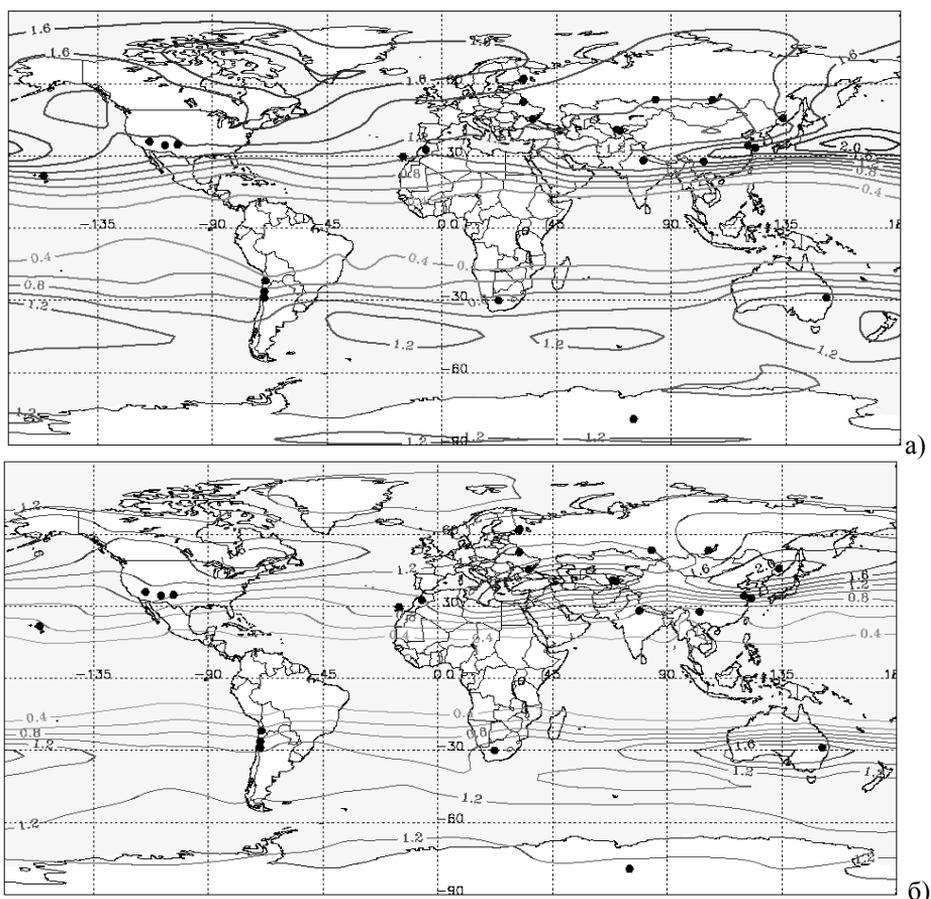


Рис. 4. Распределение  $\sigma N$  на уровне 300 гПа: а) декабрь – февраль, б) июнь – август

Рассчитанные схемы распределения  $\sigma N$  характеризуют уровень оптической турбулентности больших временных масштабов. Для конкретных пунктов значения  $\sigma N$  могут значительно отличаться от приведенных средних значений из-за действия локальных факторов; особенно это касается горных регионов.

Для более детального изучения астроклиматических условий крупнейших обсерваторий мира были рассчитаны  $\sigma N$  для пунктов, обозначенных на картах точками. Оказалось, что величина  $\sigma N$  варьирует в зависимости от выбранного барического уровня и ни для одной из выбранных обсерваторий не отмечается экстремальных значений на всех уровнях. Однако несмотря на это, все же можно выделить обсерватории с наименьшими значениями  $\sigma N$ . Минимальные значения  $\sigma N$  наблюдаются в декабре–феврале на обсерваториях ESO Cerro Paranal (Чили,  $24^{\circ}37'$  ю. ш.,  $70^{\circ}24'$  ю. ш.), RIDGE A (Антарктида,  $81^{\circ}5'$  ю. ш.,  $73^{\circ}5'$  в. д.), Mauna Kea (Гавайи,  $19^{\circ}49'$  с. ш.,  $155^{\circ}28'$  в. д.); в июне–августе на обсерваториях Yunnan (Китай,  $25^{\circ}44'$  с. ш.,  $102^{\circ}01'$  в. д.) и Mauna Kea.

Для понимания вертикальной структуры  $\sigma N$  (рис. 5) было построено осредненное вертикальное распределение величины показателя преломления за период 1950–2009 гг. по 23 обсерваториям, отмеченным точками на выше приведенных схемах. По оси абсцисс отложены значения  $\sigma N$  на основных барических уровнях, по оси ординат – высота.

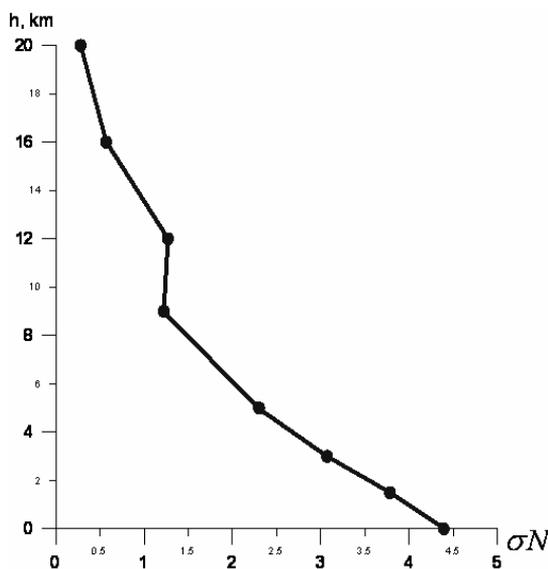


Рис. 5. Вертикальный профиль флуктуаций показателя преломления

В целом с увеличением высоты флуктуации показателя преломления уменьшаются, что обусловлено уменьшением плотности воздуха и удалением от подстилающей поверхности, являющейся источником турбулентности. Однако в слое от 9 до 12 км  $\sigma N$  претерпевает увеличение, это связано с тем, что под тропопаузой воздушные потоки сильно турбулизированы.

## Заключение

Использование предлагаемой методики численного районирования дало возможность в пределах всей территории земного шара представить крупномасштабную картину распределения оптической нестабильности и выделить регионы с наименьшими значениями флуктуаций показателя преломления. Кроме всего, методика дает дополнительные возможности при планировании большого количества мероприятий, выходящих далеко за рамки интересов астрономов. Например, создание мировой сети станций инфразвукового мониторинга, с минимально возможным уровнем помех, разработка оптимальных коротковолновых трасс радиосвязи и др.

## Список литературы

1. *Афанасьева Е. М.* О качестве изображения звезд в Новосибирске по наблюдениям 1961–1963 гг. / Е. М. Афанасьева. – Новосибирск : Наука, 1967.
2. Новый аэроклиматический справочник свободной атмосферы над СССР. Т. 2: Характеристики температуры воздуха, кн. 1 / под ред. И. Г. Гутермана. – М. : Гидрометеоздат, 1980. – 150 с.
3. *Татарский В. И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере / В. И. Татарский. – М. : Наука, 1967. – 548 с.
4. *Kovadlo P. G.* Some characteristics of the yearly mean variation of scattered solar radiation during clear sky conditions over the CIS territory and optical instability of atmosphere // *Geophysics & Astronomy*. – 2007. – Vol. 3. – P. 75–79.
5. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project / E. Kalnay [et al.] // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* – 1996. – Vol. 77. – P. 437–471.

## The investigation of large-scale astroclimatical characteristics

P. G. Kovadlo, O. S. Kochetkova, A. J. Shihovcev

**Abstract.** Using meteorological data the fluctuations of the refractive index of air was calculated, which are a measure of optical instability of the earth's atmosphere. The calculations are performed for standard pressure levels of the atmosphere in winter and summer periods and presented as a distribution on the surface of the planet. The results obtained gave the possibility to allocate areas perspectives for astronomical observations, as well as to compare astroclimatical conditions of the largest observatories in the world.

**Key words:** Astroclimate, the optical instability of the earth's atmosphere, the fluctuations of the refractive index.

*Ковадло Павел Гаврилович*  
доктор физико-математических наук  
Иркутский государственный университет  
664033, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
профессор, ведущий научный сотрудник  
Институт солнечно-земной физики СО  
РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126 а  
ведущий научный сотрудник  
тел. (3952) 52-10-94

*Кочеткова Ольга Сергеевна*  
аспирант  
Институт солнечно-земной физики СО  
РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова 126 а  
тел. (3952) 42-76-05

*Шиховцев Артем Юрьевич*  
студент 5-го курса  
Иркутский государственный университет  
664033, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
тел. (3952)52-10-89