

УДК 551.510.61

П.Г. Ковadlo

ВКЛАД ОТДЕЛЬНЫХ СЛОЕВ АТМОСФЕРЫ В ОПТИЧЕСКУЮ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ НАД РАЗНЫМИ РЕГИОНАМИ СНГ ПО ДАННЫМ АЭРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Исследованы крупномасштабные характеристики оптической неустойчивости земной атмосферы (ОНЗА) до высоты 30,5 км, рассчитанные по сетевым аэрологическим данным для территории СНГ. Оценен вклад пограничного слоя и свободной атмосферы в ОНЗА над разными регионами в течение года. Определена средняя продолжительность оптически спокойных периодов атмосферы. Установлено, что над территорией Якутии и Дальнего Востока колебания ОНЗА имеют двойной цикл в году.

Астроклиматические исследования мест для установки телескопов высокого разрешения предполагают в первую очередь оценку оптической неустойчивости земной атмосферы (ОНЗА) и отдельных ее слоев. Под ОНЗА обычно понимается степень развитости неоднородностей показателя преломления по лучу зрения. Неустойчивость атмосферы определяется с помощью телескопов, имеющих высокую чувствительность. Кроме этого, отдельные слои воздуха оцениваются комплексно с применением высотных метеорологических мачт, содаров, шаровозондов, самолетов-лабораторий и т.д. В большинстве своем такие эксперименты ограничены во времени и привязаны к одному и реже к нескольким пунктам. Нам представляется целесообразным дополнить и обобщить результаты этих работ исследованием более крупномасштабных фоновых характеристик оптической неустойчивости, полученных по сетевым аэрологическим данным.

Для определения ОНЗА над территорией СНГ использованы 10-летние данные 50 аэрологических станций о среднеквадратических значениях межсуточных разностей температуры, средней температуры воздуха и атмосферного давления на 15 стандартных барических уровнях от поверхности до 10 гПа (~30,5 км) [1]. На каждом уровне определен процентный вклад рассчитанных среднеквадратических отклонений показателя преломления относительно средней суммы для всех уровней. Определен также средний вертикальный профиль этих отклонений для всех станций, который характеризует ОНЗА над всей территорией СНГ и является своего рода масштабом для этой территории [2].

Вклад в ОНЗА отдельных слоев атмосферы явно не равнозначен для большой территории. Усредненные оценки показывают, что оптическая активность наиболее турбулизированного пограничного слоя (ПС до высоты ~3 км) соразмерима с верхним слоем, называемым свободной атмосферой (СА). Здесь СА рассматривается как слой от ~3 до ~30,5 км. Часто

при исследованиях сравнивают оптическую неустойчивость СА и ПС для заданной территории. Это дает возможность выявить регионы с низким уровнем оптической неустойчивости СА и ПС в отдельные сезоны года.

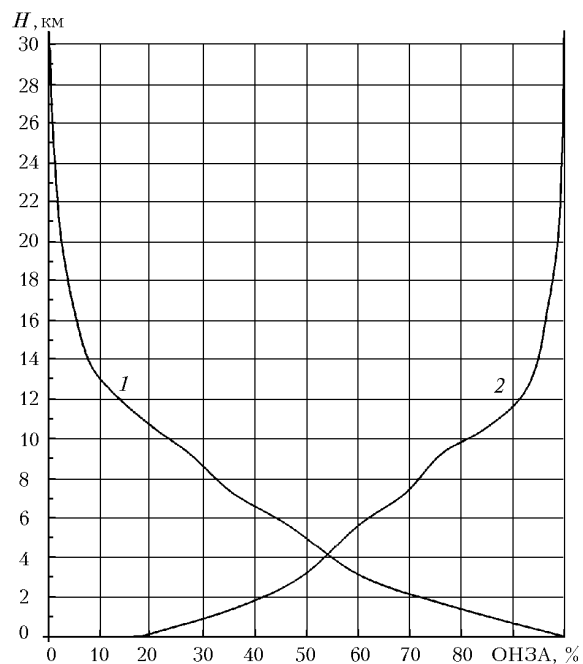


Рис. 1. Средний годовой вклад в оптическую неустойчивость атмосферы разных слоев воздуха по аэрологическим данным 50 станций за 10 лет

На рис. 1 показан средний годовой вклад в оптическую неустойчивость атмосферы разных слоев воздуха, усредненный по 50 станциям за 10 лет. Кривая 1 отражает вклад нижних слоев относительно верхних, кривая 2 — верхних слоев относительно нижних. Вклад СА и ПС составляет соответственно 51 и 49%. Для отдельных станций это соотношение имеет значительный разброс и зависит от сезона года. Например, для ст. «Ленинград» зимой соотноше-

ние составляет 75 к 57%, летом – 45 к 35; ст. «Якутск» – 56 к 45 и 39 к 35% соответственно и т.д. По рисунку можно оценить средний вклад слоя, например толщиной 1 км, на любой высоте в пределах 30,5 км для заданной территории. Так, нижний километровый слой дает ~18%, следующий километровый слой ~10%. Для того чтобы «снизить» действие оптических неоднородностей, например, на 95%, надо подняться на высоту ~16 км и т.д.

При сравнительной оценке вкладов СА и ПС, на наш взгляд, следует отдавать предпочтение пункту с более низким значением оптической нестабильности СА. К таковым относятся ст. «Алдан» – 34% в феврале, «Ташкент» – 37 в мае, «Душанбе» – 37,3 в октябре, «Алма-Ата» – 37,8 в сентябре и «Ашхабад» – 37,1% в октябре. Отметим, что в эти же месяцы на перечисленных станциях оптическая активность ПС также мала.

Вопросу оценки вклада СА и ПС в ОНЗА посвящен ряд зарубежных и отечественных работ. В обсерватории Ла Пальма [3] по наблюдениям с монитором качества изображения Солнца, по измерениям пульсаций температуры на мачте и привязных баллонах вклад СА оценен на 41%, ПС – 56%. Кроме того, был определен вклад в ОНЗА приземного слоя – 3%. Авторы данной работы пришли к выводу, что вклад свободной атмосферы приблизительно такой же, как на Мауна-Кеа и Ла Силья. Пограничный слой более турбулизирован, чем на Ла Силья.

В [4, 5] по наблюдениям звезд с интерферометром сдвига и сцидаром показано, что вклады пограничного слоя (0 – 3 км) и свободной атмосферы (> 3 км) в турбулентный оптический фактор $\left(\int_0^{\infty} C_n(h)dh\right)$ примерно

одинаковы. Вопрос определения высоты, на которой находятся атмосферные слои, вносящие наибольший вклад в дрожание изображений, исследовался в ряде отечественных работ. В [6] приведены факты, что причиной дрожания изображений звезд являются низкие слои тропосферы. По наблюдениям Солнца, Луны и звезд в [7–9] показано, что для Пулково днем оптически активные слои атмосферы располагаются на высотах от 200 м до 2,5 км, в ряде случаев на высотах до 8,5 км, ночью – от 600 м до 6,5 км. В отдельные ночи наблюдались на высоте 9 км. В это же время в [10] по результатам кинематографирования Солнца приведено наиболее вероятное значение высоты оптически активных слоев, не превышающее 70 м. В [11] по наблюдениям дрожания звездных изображений эффективная толща оптических неоднородностей не превышает 500 м. Такая же высота дана в [12].

В более поздних работах высоты эффективных оптически нестабильных слоев возросли и фактически стали совпадать с оценкой ОНЗА, приведенной на рис. 1. В [13] по дрожанию звездных изображений оценен вертикальный профиль Cn^2 . В зависимости от Cn^2 у поверхности земли пограничный слой толщиной 1 км вносит 84, 75 и 50%, откуда следует, что

вышележащие слои атмосферы дают соответственно 16, 25 и 50%. Приведенные в этой работе значения Cn^2 показывают, что при улучшении качества изображения звезд основной вклад начинают вносить слои атмосферы, лежащие выше 1 км. Отметим, что по нашим данным на ближайшей к Ужгороду ст. «Львов» в летний период атмосфера оптически достаточно стабильна, вклад СА с уменьшением ОНЗА также увеличивается. Это характерно почти для всех станций.

В работе [14] по большому количеству наблюдений дрожания звездных изображений с прибором ФЭП показано, что качество изображения определяется в основном слоями выше 0,5 км. По измерениям дрожания звезд на Ассы-Тургенском плато ($H=2700$ м) вклад приземного слоя толщиной 25 м составляет 11 – 18% [15].

Необходимо отметить, что численные оценки в цитируемых работах хотя и имеют значительный разброс, однако в большинстве своем укладываются в пределы наших данных. Надо также иметь в виду, что выводы, практически, во всех работах сделаны по относительно коротким рядам продолжительностью от нескольких дней и редко до года и более.

Оптическая нестабильность пограничного слоя и свободной атмосферы определяется, в известном смысле, разными факторами. Турбулентность пограничного слоя формируется непосредственно под влиянием подстилающей поверхности и внешних термодинамических факторов [16]. Турбулентность в свободной атмосфере – под действием только термодинамических факторов. В связи с этим оптическая нестабильность ПС более изменчивая величина, чем СА.

В [17] сделана попытка на основании данных измерений Cn^2 с помощью радиозондов найти минимальную высоту над уровнем моря, ниже которой нельзя строить обсерватории. По нашим оценкам, подъем на изолированные вершины в среднем дает улучшение 10 – 20% на 1 км, что согласуется с оценками в [17, 18]. Однако для того чтобы найти оптимальную высоту, знаний об оптической нестабильности ПС недостаточно. Необходимы также оценки оптической нестабильности СА. Из качественных рассуждений в [19] следует, что оптическая нестабильность СА задает как бы «фон» качества изображения, который мало меняется от места к месту. Это соответствует действительности в пределах только небольшой территории, хотя сезонное изменение оптической нестабильности может быть значительным и в этом случае.

Вклад атмосферы в искажение изображений с ростом высоты уменьшается, и в [20] по результатам оптических наблюдений определено, что выше 9 км он составляет 12 – 28%. Возвращаясь к рис. 1, где кривая 2 показывает средний годовой вклад в оптическую нестабильность верхних слоев атмосферы относительно нижних, видим, что указанный в [20] интервал соответствует приведенным данным.

В работах [21, 22] по микротемпературным радиозондовым наблюдениям установили, что турбулентность в свободной атмосфере очень похожа в разных местах измерений (на обсерваториях Сократо Пик, Канарских о-вах и др.). На основании этого авторы сделали предположение, что влияние турбулентности свободной атмосферы на качество изображения одинаково на всем земном шаре. По имеющимся у нас данным с этим полностью нельзя согласиться, по крайней мере, по двум причинам. Во-первых, оптическая нестабильность СА имеет сезонные изменения, во всяком случае, в средних широтах, которые здесь составляют по нашим данным 15–20%. Во-вторых, по величине нестабильности СА изменяется от станции к станции и разность может достигать в некоторые сезоны года от 20 до 30%.

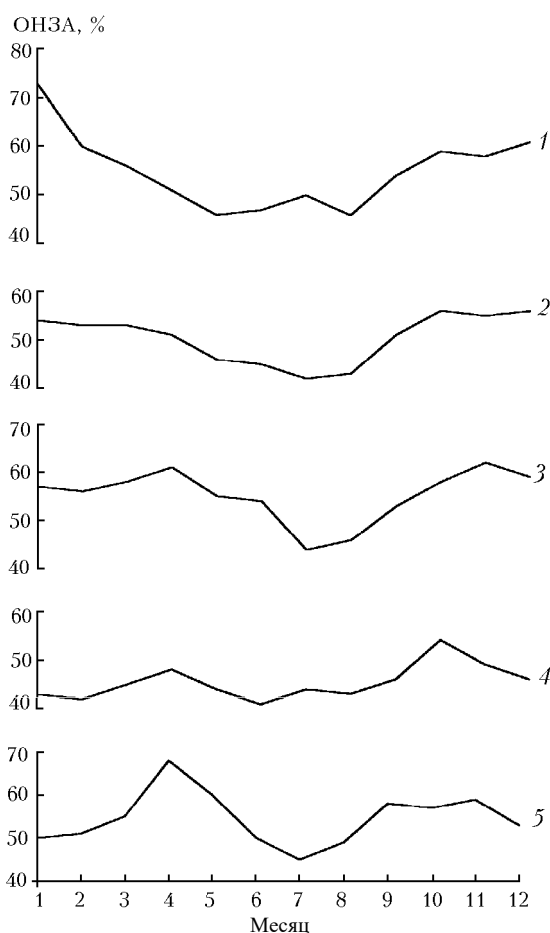


Рис. 2. Внутригодовые изменения оптической нестабильности слоя $3 \div 30,5$ км над разными регионами: 1 – Западное побережье; 2 – Центрально-Европейская территория; 3 – Западно-Сибирская равнина; 4 – Якутия; 5 – Восточное побережье

Следует также отметить, что в летний сезон над всей территорией СНГ изменения оптической нестабильности СА наименьшие (5–10%), за исключением ст. «Архангельск», на которой отличие составляет 19%. Кроме этого, в отдельных регионах малы сезонные изменения, например над Южным Казахста-

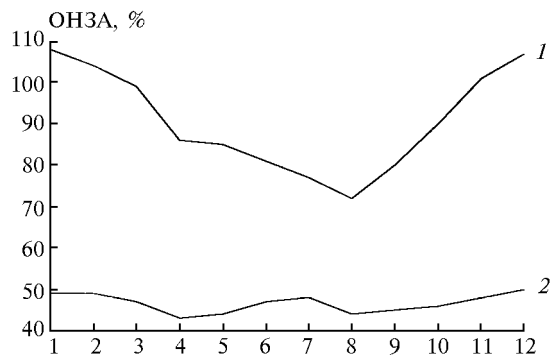
ном и Средней Азией, над побережьем Северного Ледовитого океана. В частности, на ст. «Мыс Челюскин», «Оленек» и других сезонные изменения составляют единицы процентов. Поскольку вопрос оптической структуры неоднородностей является важным для астроклиматических концепций, целесообразно рассмотреть его более подробно.

На рис. 2 показаны внутригодовые изменения оптической нестабильности СА над регионами от западного побережья (кривая 1) до восточного (кривая 5). Основные особенности проявляются в амплитуде и периодичности колебаний оптической нестабильности. Станции, расположенные на побережье, имеют бóльшую амплитуду колебаний (22–27%), чем континентальные (12–19%), и бóльшую по величине (средняя за год) оптическую нестабильность. Определенный интерес представляет появление двойного цикла (второй гармоники) в годовом изменении оптической нестабильности над Якутией (кривая 4) и Восточным побережьем (кривая 5). Причем вторая гармоника уже отчетливо заметна над Западно-Сибирской равниной (кривая 3). Двойной цикл внутригодовых колебаний прослеживается до тропопаузы ($H \sim 12$ км).

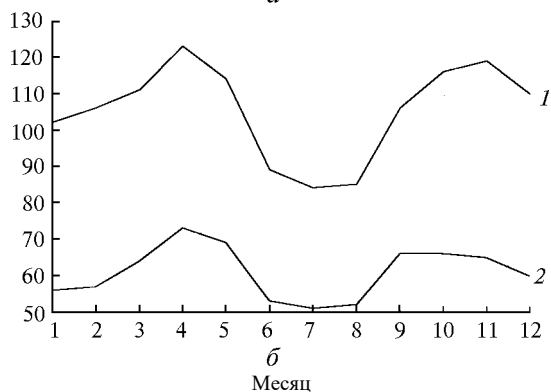
На рис. 3 приведены внутригодовые изменения оптической нестабильности по всему слою (0–30,5 км) в соответствии с рис. 2 над Западным побережьем, Центрально-Европейской частью России, Западно-Сибирской равниной, Якутией и Восточным побережьем (обозначены соответственно цифрами 1–5). Здесь колебания имеют большую амплитуду и, соответственно, выражены более четко.

Двойная годовая цикличность наиболее вероятно обусловлена стабилизирующим действием азиатского антициклона в зимний сезон [23]. По высоте его действие прослеживается до тропопаузы.

Оптически более спокойный период наблюдается в июле не только на западных станциях. Если взять, например, 90%-й уровень ОНЗА (на рис. 3 обозначен штриховыми линиями), т.е. уровень на 10% лучше среднего для выбранной территории, то наибольший период – 7,5 мес наблюдается над Якутией, 3,8 мес над Центрально-Европейской частью России, 2,6 мес над Дальним Востоком, 3 – над Западным побережьем и 2 – над Западно-Сибирской равниной. Отметим одну особенность. В июле над Центрально-Европейской территорией оптическая нестабильность равна 68% от средней, т.е. это наиболее оптически спокойная атмосфера из приведенных на рис. 3 регионов. Возможно, это обстоятельство позволило «на земле» вблизи г. Вольска получить пробные снимки Солнца с высоким разрешением, мало уступающие по качеству изображения стратосферным снимкам, полученным на Пулковском солнечном стратосферном телескопе (из устного доклада доктора физико-математических наук В.Н. Карпинского ГАО РАН Пулково, 1990 г.).

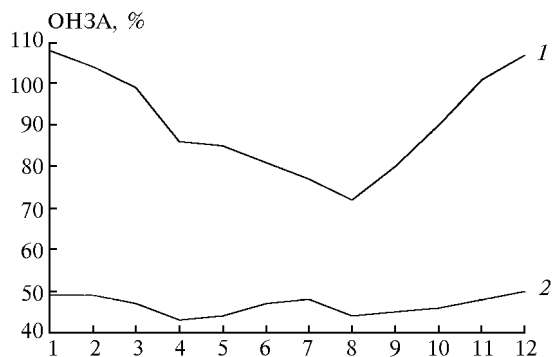


а

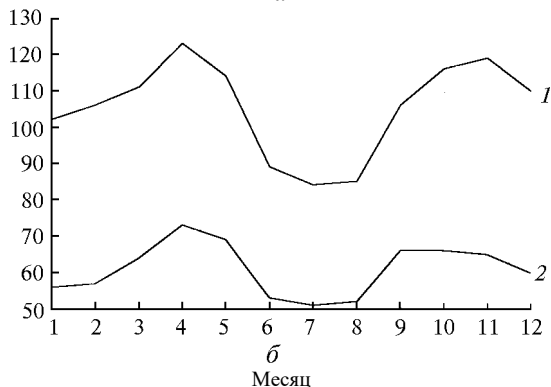


б
Месяц

Рис. 3. Внутригодовые изменения ОНЗА над разными регионами: 1 – Западное побережье; 2 – Центрально-Европейская территория; 3 – Западно-Сибирская равнина; 4 – Якутия; 5 – Восточное побережье



а



б
Месяц

Рис. 4. Внутригодовые изменения ОНЗА в слоях: 1 – 0 ÷ 30,5 км и 2 – 3 ÷ 30,5 км над островными станциями: а – Северо-Западная часть России; б – Дальневосточная часть России

На рис. 4 для сравнения показано внутригодовое изменение оптической нестабильности над островными станциями «Баренцбург», о. Хейса, о. Беринга, о. Симушир и «Южно-Сахалинск». Отметим, что над западными островами, находящимися близко к полюсу, атмосфера более спокойна, особенно слой СА. Это обстоятельство должно быть принято во внимание при отборе перспективных мест для строительства полярной астрономической станции.

Отдельно остановимся на регионе Средней Азии, Южного Казахстана и Кавказа. Здесь (рис. 5) оптическая нестабильность в течение года по сравнению с другими рассматриваемыми регионами наименьшая, а лучшее время – август. Свободная атмосфера вносит в ОНЗА от 35 до 45%. Продолжительность 90% уровня составляет 12 мес. По наблюдениям на Памирском солнечном телескопе [24], установленном на перевале Шорбулак, показано, что зимой (в декабре) качество изображения резко ухудшается и продолжительность периодов с разрешением лучше угловой секунды уменьшается до 0,14%, тогда как летом продолжительность достигает 20%. Эти оценки качественно согласуются с изменениями ОНЗА над регионом Средней Азии, которые составляют в зимний период ~80% и летом ~60%.

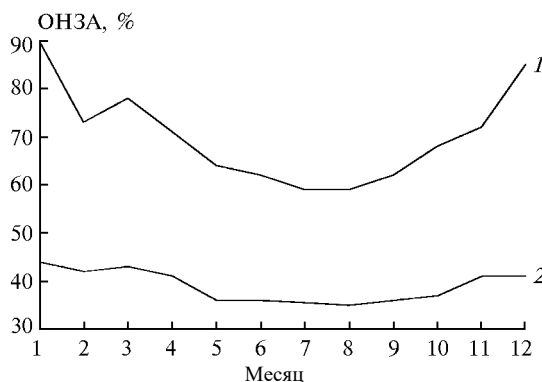


Рис. 5. Внутригодовые изменения ОНЗА в слоях: 1 – 0 ÷ 30,5 км и 2 – 3 ÷ 30,5 км над территорией Средней Азии, Южного Казахстана и Кавказа

Практически над всей рассматриваемой территорией, за исключением Западного побережья, в летний период ОНЗА наблюдается ниже уровня 80%. Однако продолжительность такого периода больше всего над Центрально-Европейской территорией и Якутией. На это следует обращать внимание при составлении поисковых астроклиматических программ.

1. *Новый аэрологический справочник свободной атмосферы над СССР*. Том 1; 11. М.: Гидрометеиздат, 1980.
2. *Ковадло П.Г.* // 3-й Межреспубликанский симпозиум «Оптика атмосферы и океана». (Тезисы докл.). Томск, 1996. С. 41–42.
3. *Vernin S., Minoz-Tunon C.* // *Astron. And Astrophys.* 1992. V. 257. N 2. P. 811–816.
4. *Roddier C., Vernin J.* // *Appl. Opt.* 1977. V. 16. N 8. P. 2252–2256.
5. *Barletti R., Ceppatelli G., Paterno L. et al.* // *JOSA.* 1976. V. 66. N 12. P. 1380–1383.

6. Кучеров Н.И. // Труды совещания по исследованию мерцания звезд. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1953. С. 183–202.
7. Демидова А.Н. // Атмосферная оптика. М.: Наука, 1968. С. 8–12.
8. Демидова А.Н. // Солнечные данные. Бюлл. N 2. М.: Наука, 1976. С. 102–105.
9. Быстрова Н.В., Демидова А.Н. // Известия ГАО в Пулковке. 1961. Т. 22. Вып. 4. N 169. С. 89–98.
10. Ильясов У.И. // Солнечные данные. Бюлл. N 1. Л.: Наука, 1973. С. 92–96.
11. Колчинский И.Т. Оптическая нестабильность земной атмосферы по наблюдениям звезд. Киев: Наукова думка, 1967. 230 с.
12. Каллистратова М.А. // Атмосферная оптика. М.: Наука, 1968. С. 12–22.
13. Климик В.Ц., Мотрунич И.И., Швалагин И.В. // Атмосферная нестабильность и адаптивный телескоп. М.: Наука, 1988. С. 120–122.
14. Гурьянов А.С., Каллистратова М.А., Кутырев А.С., Петенко И.В., Щеглов П.В., Токовинин А.А. // Astron. And Astrophys. 1992. V. 262. N 1. P. 373–381.
15. Демченко Б.И., Мычелкин Э.Г. // Новая техника в астрономии. Вып. 6. Л.: Наука, 1979. С. 175–182.
16. Обухов А.М. Турбулентность и динамика атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 414 с.
17. Coulman C.E. // Techn. Rept. LEST Foundot. 1987. N 28. P. 205–211.
18. Васильев О.Б. // Атмосферная оптика. М.: Наука, 1974. С. 31–34.
19. Хецелиус В.Г. // Астроклимат и эффективность телескопа. Л.: Наука, 1984. С. 142–150.
20. Bufton J.L. // Appl. Optics. 1973. V. 12. N 8. P. 1785–1793.
21. Barletti R., Ceppatelli G., Paterno L. // Astron. and Astrophys. 1974. V. 6. N 54. P. 649–659.
22. Loos G.C., Hogge C.B. // Appl. Opt. 1979. V. 15. N 18. P. 2654–2661.
23. Максимов И.В., Карклин В.П. // Известия ВГО. 1969. Т. 101. Вып. 4. С. 320–330.
24. Абдусаматов Х.И., Златопольский А.Г., Комиссаров Г.В., Лакишин Н.Н. // АЦ N 1466. 1986. С. 1–3.

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск

Поступила в редакцию
3 августа 1998 г.

P.G. Kovadlo. The Contribution of Individual Atmospheric Layers to Optical Instability over Various Regions of the NIS Countries as Deduced from Aerology Data.

This paper investigates large-scale characteristics of optical instability of the Earth's atmosphere up to 30.5 km altitude calculated from network aerology data for the NIS (New Independent States) territory. The contribution of the boundary layer and the free atmosphere to optical instability is estimated over different regions during one year. The mean duration of optically quiet periods in the atmosphere is determined. It is found, that over the territory of Yakutia and the Far East the optical instability fluctuations have a double annual cycle.