



УДК 551.551.2

Исследование оптической турбулентности в условиях сильно устойчивой термической стратификации атмосферы

П. Г. Ковадло (kovadlo2006@rambler.ru)

А. Ю. Шиховцев (artempochta2009@rambler.ru)

Аннотация. Представлены результаты исследований структуры турбулентности, проведенных в приземном слое атмосферы в условиях сильно устойчивой стратификации на горизонтальной трассе в месте расположения Саянской солнечной обсерватории. Данные оптических и микрометеорологических измерений показывают, что при числах Ричардсона, превышающих критическое значение, атмосферная турбулентность не подавляется полностью (что противоречит классическим представлениям теории турбулентности). Полученный результат находится в согласии с разрабатываемой теорией турбулентности С. С. Зилитинкевича [5], в которой при сверхкритических значениях числа Ричардсона выделяется режим «слабой» турбулентности. Установлено также, что в условиях больших вертикальных градиентов температуры и при малых скоростях ветра турбулентность на отдельных участках оптической трассы может достигать высокой интенсивности.

Ключевые слова: атмосферная турбулентность, оптическая турбулентность, устойчивая стратификация атмосферы.

Атмосферная турбулентность в условиях сильно устойчивой термической стратификации атмосферы

В физике атмосферы представляют интерес не только вопросы формирования, но и существования турбулентности в условиях средней и сильной температурной устойчивости воздуха. Со времен Ричардсона считалось, что при сильной температурной устойчивости, когда градиентное число Ричардсона превышает некоторое критическое значение Ri_c , в стационарных однородных потоках турбулентность не может поддерживаться за счет сдвига скорости. По-другому говоря, турбулентность при числах Ричардсона, превышающих Ri_c , вырождается, и течение станет ламинарным. При этом за значение критического числа Ричардсона Ri_c обычно принимается величина 0,25.

Значение критического числа Ричардсона Ri_c оценивалось многими исследователями, главным образом исходя из теоретических соображений. В результате было показано, что Ri_c зависит от соотношения между коэффициентами турбулентного обмена вязкости K_v и температуропроводности K_T . На основании этой зависимости для устойчиво статифицирован-

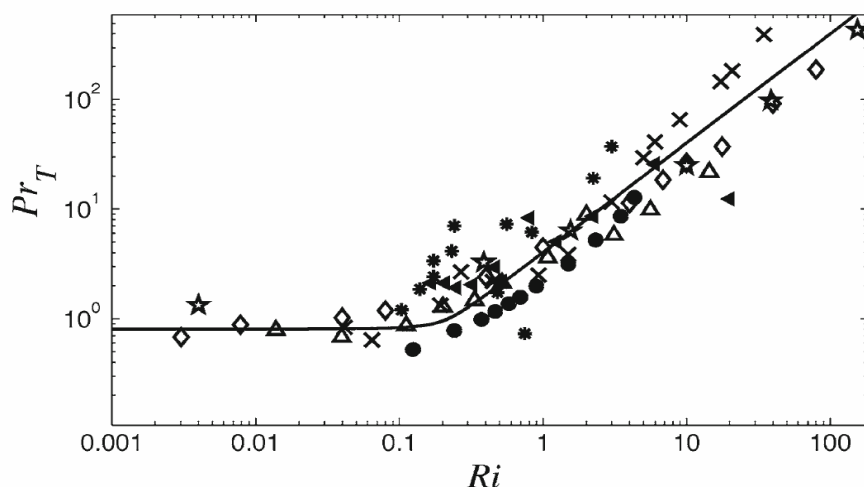
ного течения был введен критерий существования турбулентности – потоковое (динамическое) число Ричардсона, определяемое отношением градиентного числа Ричардсона Ri и турбулентного числа Прандтля Pr_T : $Ri_n = Ri / Pr_T$, где $Pr_T \sim K_v / K_T$. С физической стороны потоковое число Ричардсона определяет относительную роль термической конвекции в порождении турбулентной энергии по сравнению с динамическими факторами (передачей энергии от осредненного движения) [3]. Градиентное же число Ричардсона характеризует отношение работы, совершаемой архимедовой силой в атмосфере, к работе сил турбулентного трения.

Рассмотрим подробнее коэффициенты K_v и K_T для разных типов стратификации атмосферы. Данные экспериментальных исследований, выполненных в приземном слое атмосферы, показывают, что соотношение коэффициентов K_v и K_T существенно зависит от типа термической стратификации атмосферы.

Исходя из классических представлений теории турбулентности для безразлично стратифицированных сред, обычно полагается, что переносимая субстанция (в данном случае температура) пассивна, а величина коэффициента турбулентного обмена не зависит от рода субстанции, а значит, $K_v = K_T$. Поэтому для безразличной стратификации можно считать, что коэффициент турбулентного обмена полностью характеризуется турбулентным масштабом скорости v' : $K_v \sim K_T \sim v'r$, где r – характерный масштаб вихря. Тогда из анализа уравнения баланса турбулентной кинетической энергии [3] следует, что стационарная (незатухающая) турбулентность возможна лишь тогда, когда $Ri < K_v / K_T$ или при $K_v = K_T$ $Ri < 1$. По-другому говоря, критическое значение числа Ричардсона Ri_c должно быть меньше 1.

Для устойчивой стратификации атмосферы на рис. 1 показаны зависимости $Pr_T \sim K_v / K_T$ от Ri , полученные по данным разных исследователей [6–12]. По оси абсцисс отложены значения числа Ричардсона, по оси ординат – значения турбулентного числа Прандтля.

Из анализа рис. 1 следует, что в условиях слабо устойчивой стратификации атмосферы ($Ri < 0,25$) соотношение между K_v и K_T ($Pr_T \sim K_v / K_T$) близко к 1, а в условиях сильной устойчивости это соотношение K_v / K_T по величине становится больше 1. Это означает, что турбулентность может существовать и при очень больших числах Ричардсона. Как указывается в работе [5], есть основания предполагать, что значение Ri_c может стремиться к бесконечности. Согласно последним результатам моделирования методом больших вихрей (LES simulation) и данным прямого численного моделирования (DNS simulation) турбулентность может поддерживаться энергией сдвига скорости потока практически при любом значении числа Ричардсона Ri , в том числе и при сильно устойчивой стратификации, до $Ri \sim 100$ [5].



По данным атмосферных исследований		
Маркеры		Авторы
◄	Наклоненные треугольники	Kondo, 1978
*	Снежинки	Bertin, 1997
По данным лабораторных исследований		
×	Крестики	Rehmann, 2004
◊	Ромбы	Ohya, 2001
●	Круги	Strang, 2001
По данным прямого численного моделирования (DNS)		
★	Звезды	Stretch, 2001
По данным моделирования методом крупных вихрей (LES)		
△	Треугольники	Esau, 2009
—	Непрерывная линия	Зилитинкевич [12]

Рис. 1. Зависимость турбулентного числа Прандтля от градиентного числа Ричардсона

Таким образом, экспериментальные и теоретические исследования подтверждают, что в энергетическом смысле нет определенного критического значения числа Ричардсона, устанавливающего границу перехода из турбулентного режима течения в ламинарный режим. В этой связи в численном моделировании атмосферы и гидросферы для решения проблемы существования турбулентности в условиях сильной устойчивости (иначе говоря, «турбулентного отсекаания» при числах Ri , превышающих критическое значение Ri_c) искусственно вводятся корректирующие полуэмпирические коэффициенты, зависящие от числа Ri .

Новая теория турбулентности предложена в работе [5], которая описывает принципиально разные режимы атмосферных течений: режим сильной турбулентности при $Ri \ll 1$ и $Pr_T \approx const$, характерный для пограничного слоя атмосферы, и слабой турбулентности при $Ri > 1$, характерный для

свободной атмосферы. Для режима слабой турбулентности число R_T линейно увеличивается с ростом числа Ri . В этой теории уравнение баланса кинетической энергии турбулентности дополняется уравнениями баланса потенциальной энергии турбулентности и баланса турбулентного потока тепла. Учет потенциальной энергии турбулентности приводит к тому, что в уравнении суммарной энергии турбулентности поток плавучести «выпадает». А при рассмотрении уравнения баланса турбулентного потока тепла появляется слагаемое, ответственное за дополнительный положительный поток тепла, который противодействует основному отрицательному потоку тепла, возникающему в устойчивой атмосфере. При таком подходе турбулентность не вырождается при усилении устойчивой стратификации до значений $Ri \sim 100$. Это позволяет не привлекать дополнительные корректирующие полуэмпирические гипотезы, снимающие ограничение на существование турбулентности в условиях $Ri > 1$.

В условиях сильной термической устойчивости атмосферы представляют интерес свойства оптической турбулентности, прежде всего ее максимальная интенсивность и пространственная структура. Оптическая турбулентность является причиной искажений, возникающих при распространении электромагнитных волн в неоднородной по своим параметрам (плотности, температуре и т. д.) земной атмосфере, и определяется набором турбулентных неоднородностей показателя преломления воздуха n по лучу зрения. При этом, если считать, что пульсации давления малы, то дисперсию пульсаций показателя преломления воздуха можно определить соотношением

$$\sigma_n^2 = \left(\frac{AP}{\bar{T}^2} \right)^2 \sigma_T^2, \text{ где } A - \text{эмпирический размерный коэффициент, } P - \text{атмосферное давление, } \bar{T} - \text{средняя температура воздуха, } \sigma_T^2 - \text{дисперсия пульсаций температуры воздуха. Для стационарных условий, когда температура и давление не изменяются, } \sigma_n^2 \sim \sigma_T^2.$$

Экспериментальные исследования пульсаций углов прихода света в плоскости апертуры телескопа, которые являются интегральной характеристикой набора неоднородностей показателя преломления воздуха вдоль луча зрения [4], в условиях сильной устойчивости атмосферы были выполнены 23 января 1974 г. и 24 апреля 1974 г. на горизонтальной ровной трассе, протяженностью 1 км, на площадке Саянской солнечной обсерватории. Наблюдения проводились при ясной, маловетреной погоде в условиях сильно устойчивой стратификации приземного слоя воздуха в ночное время на высоте 2 м над подстилающей поверхностью. В этих экспериментах на расстоянии 1 км от телескопа (диаметром 150 мм и фокусным расстоянием 2 м) с фотоэлектрическим регистратором дрожания изображения звезд (ФЭРДИЗ-2) на жестком штативе устанавливалась диафрагмированная до 1 мм лампа накаливания, как схематически показано на рис. 2 (нижняя часть рисунка). Точность измерения углов прихода света датчика составляла 0,2 угл. с. Измерения метеорологических характеристик выполнялись на мачте высотой 27 м,

установленной в 20 м от телескопа. Точность отсчета измерений средней температуры составляла $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, средней скорости ветра – $0,1\text{ м/с}$, пульсаций температуры – $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$, пульсаций скорости ветра – $0,1\text{ м/с}$. Датчики располагались на 7 уровнях, начиная с $0,5\text{ м}$.

Степень устойчивости атмосферы характеризовалась градиентным числом Ричардсона $Ri = \frac{g}{\theta} \frac{1}{\beta^2} \frac{d\theta}{dz}$, где g , θ , β – ускорение свободного па-

дения, потенциальная температура и вертикальный градиент горизонтальной скорости соответственно. Наблюдения пульсаций углов прихода света показали, что в условиях сильной устойчивости атмосферы ($Ri > 0,25$) турбулентность не вырождается полностью, воздушный поток слабо турбулирован, характерные пульсации углов прихода света вдоль трассы распространения составляют около $0,5$ угл. с. В отдельных случаях при сильной устойчивости наблюдается значительное увеличение пульсаций углов прихода света. Пример такого сценария продемонстрирован в виде фрагмента реализации в верхней части рис. 2. По оси абсцисс показан временной масштаб реализации, по оси ординат – пульсации углов прихода света. Поскольку уловить момент появления такого рода «пакетов» трудно, то все реализации получены с осреднением 1 с , продолжительность каждой реализации – 30 мин .

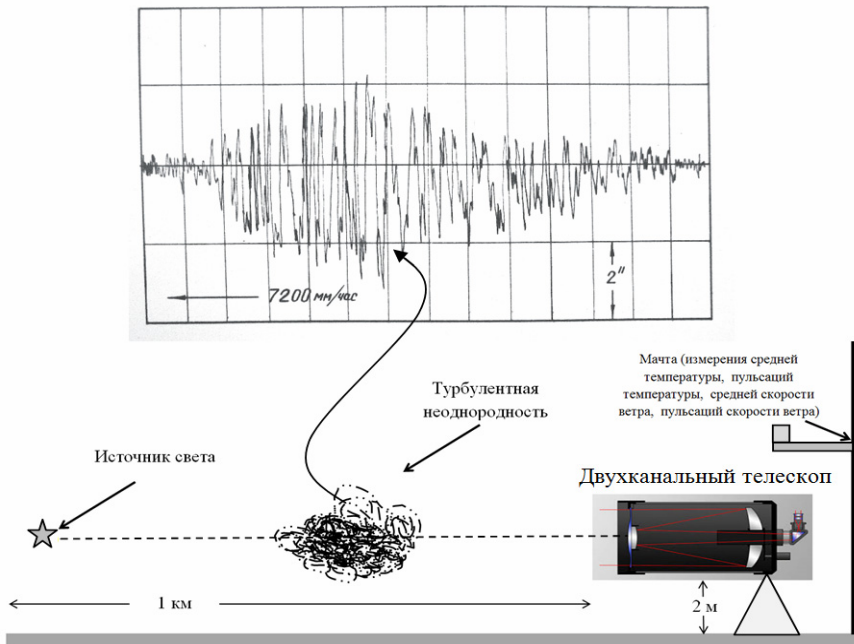


Рис. 2. Фрагмент реализации «пакета» пульсаций углов прихода света в условиях сильной устойчивости на высоте 2 м

Вероятно, увеличение пульсаций углов прихода света связано с формированием локальных турбулентных неоднородностей вдоль трассы распространения светового луча (см. рис. 2). Отметим, что датчики на метеорологической мачте регистрировали в это время очень маленький уровень пульсаций температуры и скорости ветра.

На рисунке 3, *а* для 24 апреля 1974 г. показаны временные зависимости числа Ричардсона Ri в слое 1–16 м, максимального среднего квадратического отклонения скорости ветра $\sigma_{v_{max}}$ и температуры $\sigma_{T_{max}}$, полученные на уровне 24 м. На рисунке 3, *б* для 24 апреля 1974 г. показаны временные зависимости числа Ричардсона Ri в нижнем слое 1–4 м и максимальные средние квадратические отклонения скорости ветра $\sigma_{v_{max}}$ и температуры $\sigma_{T_{max}}$ на уровне 2 м. На рисунке 3, *в* и *г* представлены аналогичные зависимости для 23 января 1974 г. соответственно.

Анализ рис. 2 и 3, *а* – *г* показывает, что в приземном слое атмосферы в условиях устойчивой стратификации, когда вертикальный градиент температуры в слое 1–4 м изменялся от 3,3 до 22,7 °/100 м, а в слое 1–16 м от 0,8 до 13,3 °/100 м, однородность турбулентности на горизонтальной трассе нарушается. Наблюдаемые значения вертикального градиента температуры (dT/dz), характеризующие сильную термическую устойчивость воздуха, по величине много больше сухоадиабатического градиента температуры $\gamma_a = -dT/dz = 0,98$ °/100 м. Вместе с тем число Ричардсона Ri достигало величины 2,8. Согласно классическим представлениям теории турбулентности при такой устойчивости большие отрицательные силы плавучести должны полностью подавлять турбулентность. Тем не менее в условиях сильной устойчивости, как показывают наблюдения, атмосферные течения имеют турбулентный режим. В отдельные моменты времени при $Ri > 0,25$ пульсации углов прихода на оптической трассе могут увеличиваться в несколько раз от фоновых значений. При этом заметим, что турбулентность сосредоточена в отдельных высокоинтенсивных «пакетах», которые окружены сравнительно менее энергичными крупными атмосферными неоднородностями. Амплитуда пульсаций углов прихода света в таких «пакетах» зависит от пространственной базы измерений и может достигать 10 угловых секунд и более. При этом на других участках трассы пульсации углов прихода света могут быть очень слабо выражены.

В условиях сильно устойчивой атмосферы максимальная атмосферная возмущенность в приземном слое атмосферы, определяемая отношением максимального среднеквадратического отклонения пульсаций скорости ветра к средней скорости $\sigma_{v_{max}}/\bar{V}$, в условиях сильной устойчивости достигает 1,6 (рис. 4, *а* и *б*), в то время как в свободной атмосфере эта величина меньше 1.

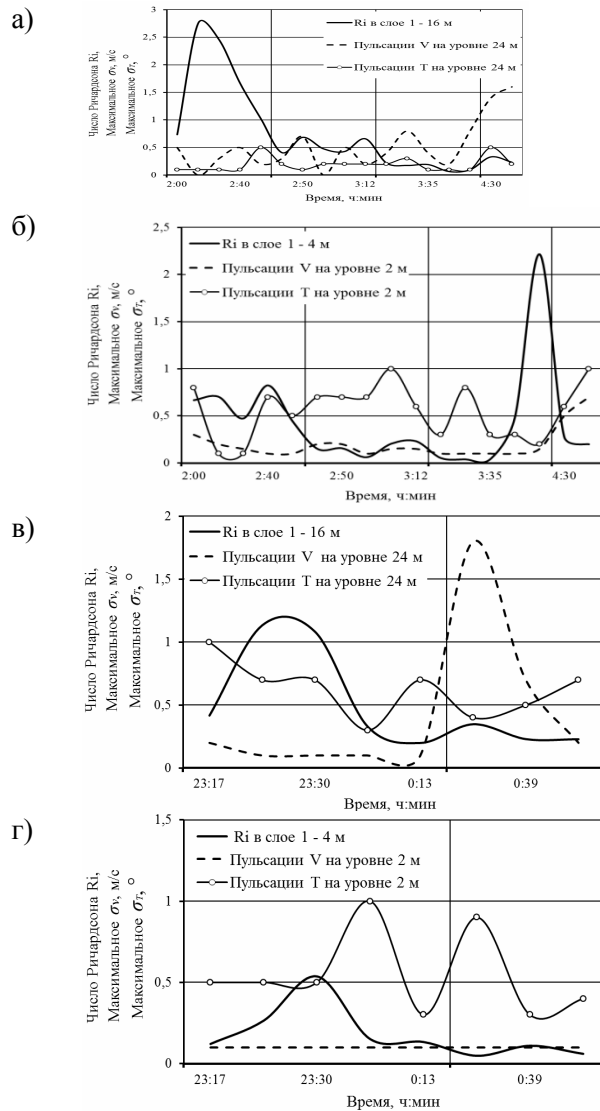


Рис. 3. Временные зависимости числа Ричардсона Ri , максимального среднего квадратического отклонения скорости ветра $\sigma_{v_{\max}}$ и среднего квадратического отклонения температуры $\sigma_{T_{\max}}$: а) значения Ri получены в слое 1–16 м, $\sigma_{v_{\max}}$ и $\sigma_{T_{\max}}$ оценены на уровне 24 м для 24 апреля 1974 г.; б) значения Ri получены в слое 1–4 м, $\sigma_{v_{\max}}$ и $\sigma_{T_{\max}}$ на уровне 2 м для 24 апреля 1974 г.; в) значения Ri получены в слое 1–16 м, $\sigma_{v_{\max}}$ и $\sigma_{T_{\max}}$ оценены на уровне 24 м для 23 января 1974 г.; г) значения Ri получены в слое 1–4 м, $\sigma_{v_{\max}}$ и $\sigma_{T_{\max}}$ на уровне 2 м для 23 января 1974 г.

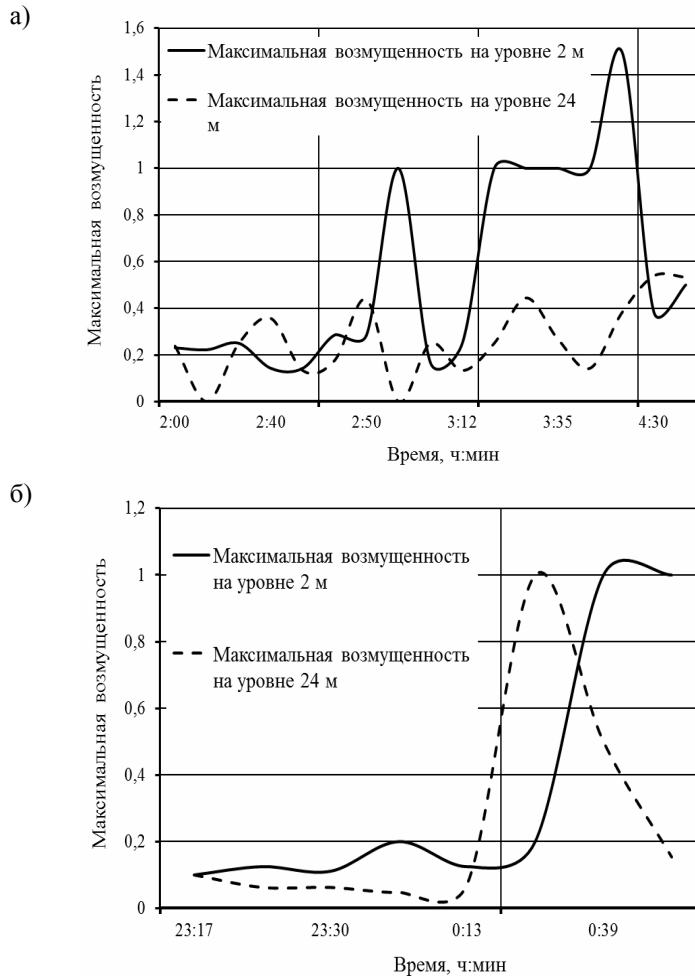


Рис. 4. Временные зависимости максимальной атмосферной возмущенности на разных высотных уровнях приземного слоя атмосферы для 24 апреля 1974 г. (а) и 23 января 1974 г. (б)

При этом отношение среднеквадратического отклонения пульсаций скорости ветра к средней скорости ветра σ_v / \bar{V} в приземном слое атмосферы достигает 0,5–0,6, в то время как в свободной атмосфере отношение σ_v / \bar{V} с высотой слабо изменяется от 0,27 до 0,31 [2]. Для изучения оптических свойств земной атмосферы также представляет интерес исследование формы энергетических спектров пульсаций углов прихода света в устойчиво стратифицированной атмосфере, в том числе и для случаев появления на оптической трассе турбулентных «пакетов».

Энергетические спектры пульсаций углов прихода света при устойчивой стратификации

В [1] были исследованы энергетические спектры пульсаций углов прихода света по ряду эмпирических данных, полученных на горизонтальной трассе протяженностью 1 км. Отметим, что максимум энергетических спектров пульсаций температуры, скорости ветра и углов прихода света в приземном слое атмосферы при безразличной стратификации отмечается на частотах 0,01–0,02 Гц. При средних скоростях ветра 1–2 м/с эти частоты соответствуют пространственным масштабам от 50 до 200 м. Таким образом, горизонтальная трасса протяженностью 1 км охватывает широкий интервал микрометеорологического диапазона, включая микрометеорологический максимум и низкочастотную область спектра атмосферных неоднородностей, лежащую левее от максимума.

Рассчитанные спектры пульсаций углов прихода света показаны на рис. 5 в частотном диапазоне от 0,0028 до 0,6 Гц.

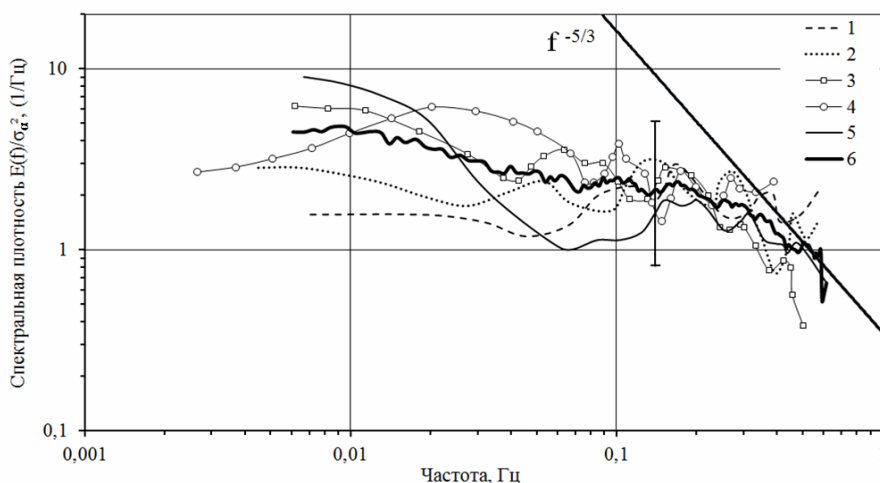


Рис. 5. Энергетические спектры пульсаций углов прихода света при устойчивой стратификации

Энергетические спектры пульсаций углов прихода света, показанные линиями 1–5 (см. рис. 5), соответствуют отдельным реализациям, линией 6 обозначен осреднённый энергетический спектр пульсаций углов прихода света. Вертикальным отрезком показаны 90%-ные доверительные границы. В билогарифмических координатах по оси абсцисс отложены частоты, по оси ординат – нормированные значения спектральной плотности пульсаций углов прихода света $E(f)/\sigma_\alpha^2$, где σ_α^2 – дисперсия пульсаций углов прихода света, f – частота.

Анализ рис. 5 показывает, что нормированная спектральная плотность энергии атмосферных неоднородностей распределена для $f < 0,3$ Гц практически равномерно. Это значит, что в приземном слое атмосферы при устойчивой стратификации энергия низкочастотных компонент меньше энергии высокочастотных неоднородностей. «Выполаживание» энергетических спектров, вероятно, объясняется тем, что энергетические потери атмосферных неоднородностей растут с увеличением масштаба турбулентности в силу того, что каждый атмосферный вихрь перемещает частицы воздуха на расстояние, равное своему размеру. Поэтому при таких условиях можно говорить, что хорошо выраженная турбулентность может возникать и существовать только в виде локализованных неоднородных участков пространства – «пакетах» на фоне общей слабо турбулированной среды.

Несмотря на локальный характер существования турбулентности, инерционный диапазон ($E(f) / \sigma_a^2 \sim f^{-5/3}$) наблюдается при $f > 0,3$ Гц. Поскольку начальная чувствительность датчиков ветра составляет 0,1 м/с, оказывается, что масштаб внешних границ инерционного диапазона не превышает 0,3 м. Заметим, что теория оптической турбулентности построена в рамках инерционного диапазона. При этом размер апертуры современных телескопов оказывается значительно больше, чем масштаб внешней границы инерционного диапазона.

Результаты

Проведенные в месте расположения Саянской солнечной обсерватории микрометеорологические и оптические наблюдения на горизонтальной трассе длиной 1 км на высоте 2 м в приземном слое атмосферы при сильной устойчивости позволили количественно оценить характеристики фоновых и максимальных значений пульсаций температуры, скорости ветра и углов прихода света. Получено, что при сверхкритических значениях числа Ричардсона атмосферная турбулентность не подавляется. В то же время из представлений классической теории турбулентности известно, что в устойчиво стратифицированной атмосфере турбулентность подавляется и полностью вырождается при числах Ричардсона, больших критического значения Ri_c . В разрабатываемой теории Зилитинкевича [5] в течениях при сверхкритических значениях числа Ричардсона турбулентность не вырождается полностью, а переходит в режим слабой турбулентности.

При этом, как показывают данные измерений, при малых скоростях ветра и больших градиентах температуры на отдельных участках трассы (пространства) могут развиваться и достигать высокой интенсивности атмосферные турбулентные неоднородности. Измеренные в эти моменты на горизонтальной трассе протяженностью 1 км пульсации углов прихода света могут принимать значения до 10 угл. с и более. Большие величины пульсаций углов прихода света в условиях сильной устойчивости при малых скоростях ветра обусловлены существованием локальных образований мелко-масштабной турбулентности на отдельных участках трассы. В связи с этим

измерения характеристик турбулентности в сильно устойчивой атмосфере целесообразно выполнять на достаточно протяженной базе, например исследуя неоднородности показателя преломления с помощью светового луча, распространяющегося на горизонтальной трассе заданной длины. Это позволяет получать более объективную информацию о пространственном распределении и интенсивности локальных турбулентных зон в условиях возникающей атмосферной турбулентности.

Спектральный анализ пульсаций углов прихода света, измеренных на трассе протяженностью 1 км при сильной устойчивости, позволяет заключить, что для частот $f < 0,3$ Гц энергия атмосферных неоднородностей распределена практически равномерно. Возможность существования инерционного интервала имеется только в диапазоне частот $f > 0,3$ Гц. В таких условиях в отдельные моменты времени можно ожидать существенного увеличения уровня оптической мелкомасштабной турбулентности атмосферы и, соответственно, снижения разрешения изображений космических объектов в телескопах наземного базирования.

Список литературы

1. Ковадло П. Г. Исследование механизма флуктуаций угла прихода света в приземном слое атмосферы : дис. ... канд. физ.-мат. наук / П. Г. Ковадло. – Л., 1976. – 135 с.
2. Ковадло П. Г. Распределение энергии атмосферных течений над территорией России / П. Г. Ковадло, О. С. Кочеткова // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. – 2010. – Т. 3, № 1. – С. 30–38.
3. Монин А. С. Статистическая гидромеханика. Теория турбулентности / А. С. Монин, А. М. Яглом. – СПб. : Гидрометеиздат, 1992. – Т. 1. – 695 с.
4. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере / В. И. Татарский. – М. : Наука. – 1967. – 548 с.
5. A hierarchy of energy- and flux-budget (EFB) turbulence closure models for stably-stratified geophysical flows [Electronic resource] / S. S. Zilitinkevich [et al.] // *Boundary-Layer Meteorol.* – 2012. – doi: 10.1007/s10546-012-9768-8.
6. Bertin F. Energy dissipation rates, eddy diffusivity, and the Prandtl number: An in situ experimental approach and its consequences on radar estimate of turbulent parameters radio science / F. Bertin, J. Barat, R. Wilson // *J. Radio Sci.* – 1997. – Vol. 32, N 2. – P. 791–804.
7. Esau I. Large-eddy simulations of geophysical turbulent flows with applications to planetary boundary layer research / I. Esau // *Proceedings of 5th conference on computational mechanics «MekIT'09»*, Trondheim, 26–27 May. 2009, Tapir Academic Press. – 2009. – P. 7–37.
8. Kondo J. Heat and momentum transfers under strong stability in the atmospheric surface layer / J. Kondo, O. Kanechika, N. Yasuda // *J. Atmos. Sci.* – 1978. – Vol. 35. – P. 1012–1021.
9. Ohya Y. Wind-tunnel study of atmospheric stable boundary layers over a rough surface / Y. Ohya // *J. Bound.-Layer Meteor.* – 2001. – Vol. 98. – P. 57–82.
10. Rehmann C. R. Mean potential energy change in stratified grid turbulence / C. R. Rehmann, J. R. Koseff // *Dynamics of Atmospheres and Oceans.* – 2004. – Vol. 37, N 4. – P. 271–294.

11. Strang E. Vertical Mixing and Transports through a Stratified Shear Layer / E. J. Strang, H. J. S. Fernando // J. Phys. Oceanogr. – 2001. – Vol. 31. – P. 2026–2048.

12. Transient mixing events in stably stratified turbulence / D. D. Stretch [et al] // 14th Australasian fluid mechanics conference, Adelaide, Australia, 10–14 December 2001. – 2001. – P. 625–628.

The Investigation of Optical Turbulence for Highly Stably-Stratified of the Atmosphere

P. G. Kovadlo, A. Yu. Shikhovtsev

Abstract. The results of investigations of turbulence structure conducted in surface layer of atmosphere along a horizontal track located at the Sayan Solar Observatory site for a very stably-stratified atmosphere are shown. Data obtained from optical and micrometeorological measurements show that atmospheric turbulence does not degenerate when Richardson numbers exceed the critical value of Ri_c (contrary to the classical ideas of the theory of turbulence). The result obtained is in agreement with new S. S. Zilitinkevich's theory of turbulence wherein regime of «weak» turbulence is distinguished at supercritical values of the Richardson number [12]. It is shown also that turbulence located in individual regions of optical path under conditions of large vertical temperature gradients and small wind speed can reach high intensity.

Keywords: atmospheric turbulence, optical turbulence, stably-stratified atmosphere.

Ковадло Павел Гаврилович
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, профессор
Институт солнечно-земной физики
СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а
тел.: (3952) 56-45-78
Иркутский государственный университет
664033, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1

Kovadlo Pavel Gavrilovich
Doctor of Sciences (Physics and
Mathematics), Senior Researcher,
Professor
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS
126-a, Lermontov st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 56-45-78
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664033

Шиховцев Артем Юрьевич
младший научный сотрудник
Институт солнечно-земной физики
СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126 а
тел.: (3952) 56-45-78

Shikhovtsev Artem Yurevich
Junior Research Scientist
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS
126 a, Lermontov st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 56-45-78