

1. Сезонный и суточный ход интенсивности принимаемой волны.
2. Беспорядочные, случайного характера изменения уровня и фазы принимаемого сигнала.
3. **Флуктуации поля в пункте приема могут возникнуть только в случае, если под действием каких-то причин изменяются во времени и пространстве свойства среды распространения.**

Естественно предположить, что под влиянием этих причин изменяется поглощение радиоволн, а следовательно, и напряженность поля в точке приема. Несомненно, такие причины имеют место.

Дождь. Радиоволны короче 5 см испытывают в дожде сильное поглощение. Поле в месте приема под влиянием дождя сильно уменьшается. Однако такие метеорологические процессы как дождь обладают большой инерционностью и вызывать быстрые флуктуации не могут.

- Флуктуации вызываются:
 - а) изменениями во времени свойств среды;
 - б) многолучевостью в процессе распространения.

Зеркало неподвижное: в зависимости от разности хода

5-10

прямого и отраженного лучей $\Delta r = AMB - AB$

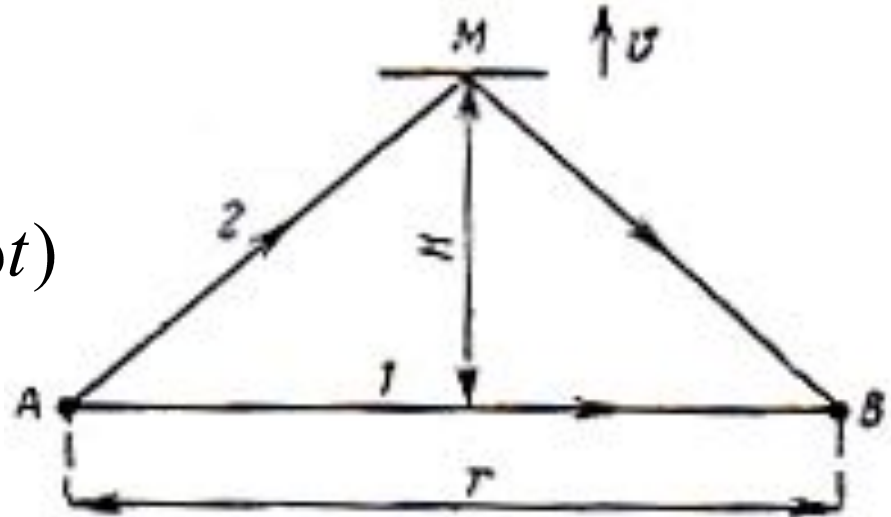
результатирующая амплитуда приобретает фиксированное, не меняющееся во времени значение.

Луч 1 создает в точке B поле

$$E_1 = \exp(i\omega t)$$

а луч 2 – поле

$$E_2 = \exp\left[i\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r\right)\right]$$



Результирующее поле выражается формулой

$$E_m = \sqrt{E_{m1}^2 + E_{m2}^2 + 2E_{m1}E_{m2} \cos \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r}$$

$$\cos \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r \rightarrow -1 \quad E_m \rightarrow E_{m1} - E_{m2}$$

$$\cos \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r \rightarrow +1 \quad E_m \rightarrow E_{m1} + E_{m2}$$

Зеркало M не неподвижно, а совершает некоторые беспорядочные колебания со скоростью v , направленной по вертикали. Восходящие и нисходящие потоки воздуха. Воображаемое зеркало как бы увлекается этими потоками, то есть некоторое время поднимается, потом опускается, потом опять поднимается и так далее.

Чтобы результирующее поле прошло весь цикл изменений от максимума через минимум и снова до максимума, зеркало M должно по вертикали пройти путь

$$\Delta r = 2\sqrt{\left(\frac{r}{2}\right)^2 + H^2} - r$$

$$r \gg H \quad \Delta r \approx \frac{2H^2}{r}$$

Допустим, что в течение сравнительно короткого промежутка времени скорость передвижения зеркала M постоянна и равна v . Следовательно, за время Δt разность хода лучей изменяется на величину

$$\delta(\Delta r) = \frac{2(H + v\Delta t)^2}{r} - \frac{2H^2}{r} \approx \frac{4Hv\Delta t}{r}$$

Чтобы произошел полный цикл изменения результирующего поля,
необходимо

5-12

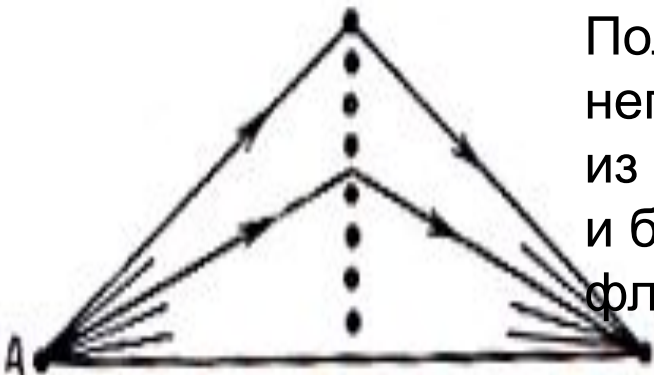
$$\delta(\Delta r) = \lambda.$$

$$v = \frac{r\lambda}{4H\Delta t}$$

Пусть $v = 0.6 \text{ м/с}$.

Положим скорость вертикального перемещения воздушных масс 30 м/с .
Тогда в одну секунду произойдет 50 полных циклов изменения
амплитуды результирующего поля - средняя частота замираний составит
50 Гц.

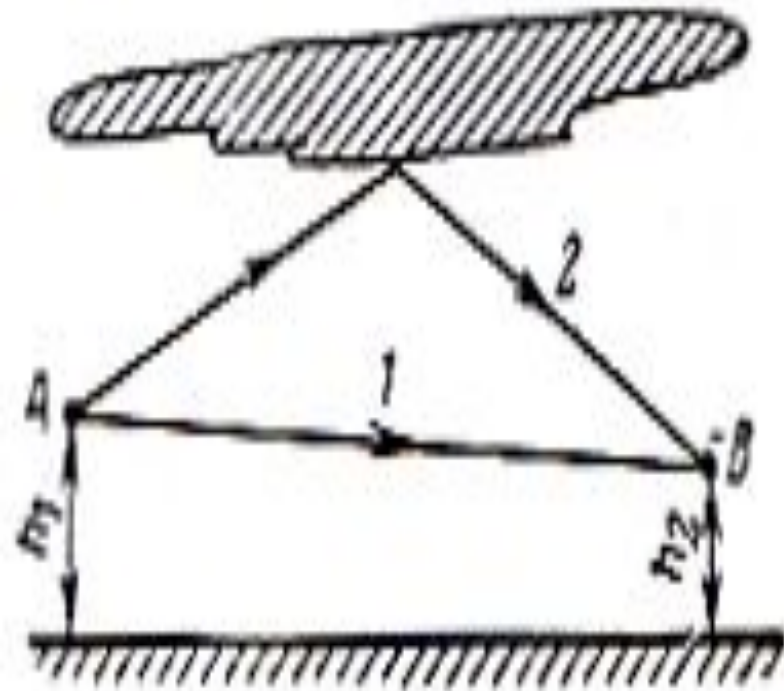
В реальных условиях в пункт приема приходит не два, а несколько лучей,
при этом разности хода непрерывно меняются, создавая более сложные
хаотические вариации результирующего поля.



Поле в точке приема может создаваться и
непрерывным множеством лучей, поле каждого
из которых бесконечно мало, а фазы непрерывно
и беспорядочно меняются. Это также приводит к
флуктуациям амплитуды и фазы результирующего
поля.

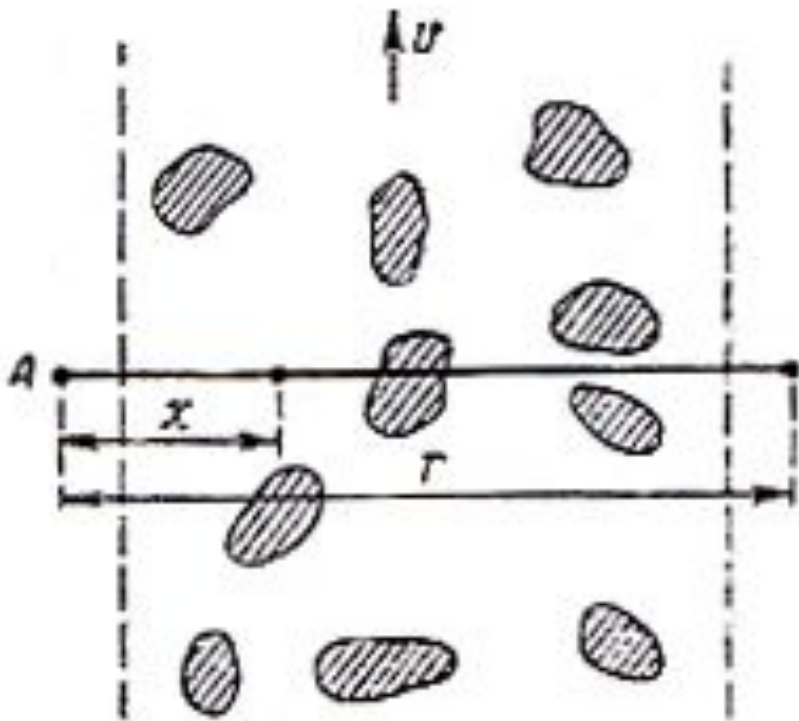
Вывод: для возникновения быстрых флуктуаций результирующего поля необходимо одновременное соблюдение двух условий: наличия многолучевости и изменение свойств среды, в которой происходит распространение радиоволн (подъем или опускание воздушных масс, приводящие к изменению положения отражающих волны областей атмосферы - дискретная многолучевость - и турбулентные процессы в атмосфере, приводящие к изменению местоположения очагов рассеяния и интенсивности рассеянного излучения - непрерывная многолучевость).

В тропосфере имеют место течения воздушных масс (ветры, вертикальные потоки, завихрения), что делает тропосферу неоднородной в смысле ее диэлектрической проницаемости. Очень часто в тропосфере формируются инверсионные слои, области резкого перепада диэлектрической проницаемости, от которых могут отражаться радиоволны. Эти области постоянно меняют конфигурацию.



Другой случай распространения – когда инверсионные слои отсутствуют, а энергия волны распространяется по прямому пути.

5-14

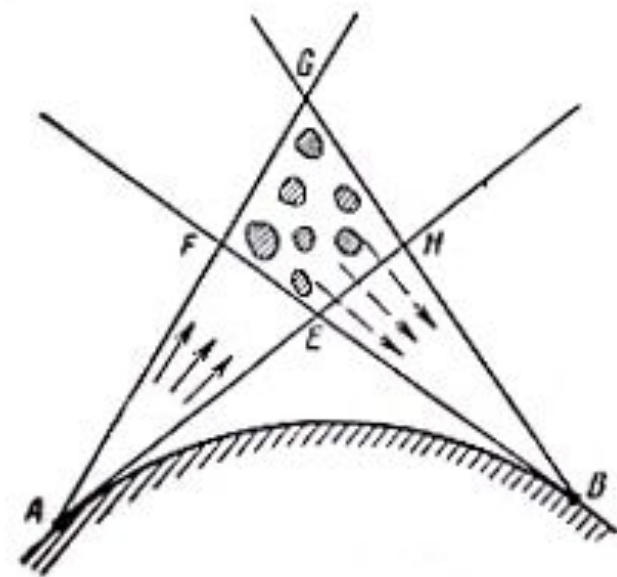
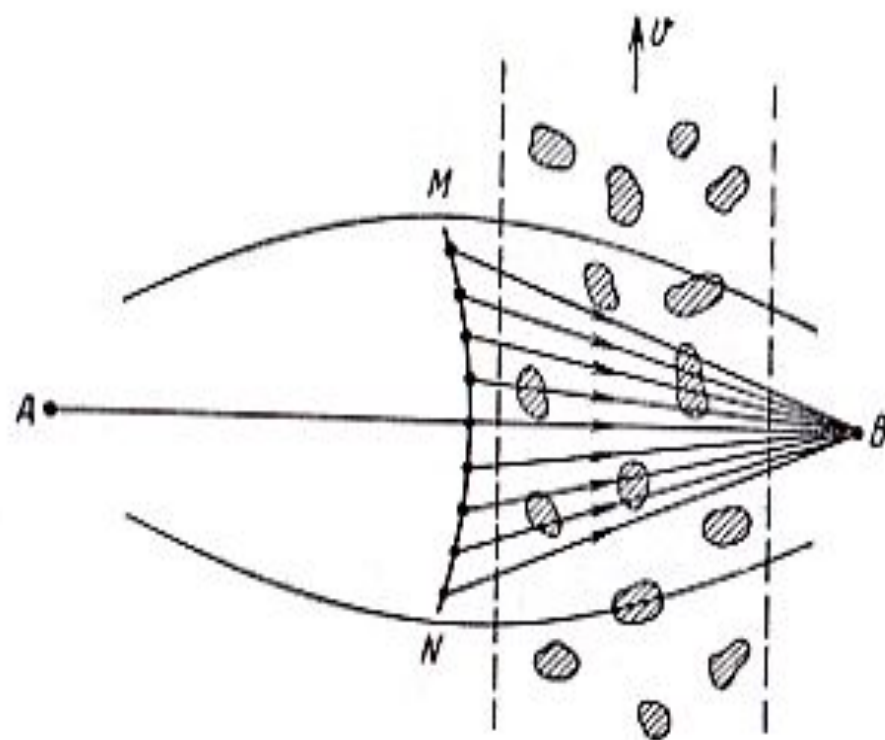


Отдельные неоднородности перемещаются под действием ветра в поперечном к трассе направлении. На пути волны постоянно оказываются всё новые и новые неоднородности, причем разных форм. В них показатель преломления отличается от показателя преломления для окружающей среды на миллионные доли единицы. Амплитуда сигнала сколько-нибудь заметно измениться не может. Меняется только фаза.

Набег фазы на трассе определится выражением:

$$\varphi_B = \frac{\omega}{c} \int_0^r n(x) dx$$

Вывод: под действием поперечного ветра при изменяющемся во времени распределении показателя преломления вдоль трассы возникают флуктуации фазы



Непрерывно перемещающиеся источники рассеяния в виде тропосферных неоднородностей, находящихся в объеме рассеяния, создают в пункте приема поля с непрерывно изменяющимися амплитудами и фазами. Результат интерференции этих элементарных лучей будет представлять собой флуктуирующий сигнал.

Флуктуации параметров излучения в турбулентной атмосфере

Если отражающий слой будет совершать некоторые движения вверх и вниз, будет меняться разность фаз прямого и отражённого лучей в точке приема.

Незначительные вариации длины пути радиоволны не могут сколь-нибудь значительно повлиять на величину испытываемого в процессе распространения поглощения. Следовательно, амплитуду волны в точке приема можно считать постоянной и напряженность поля в точке приема будет выражаться формулой:

$$E = E_m \exp i[\omega t - \varphi(t)]$$

Здесь $\varphi(t)$ - случайная величина.

Это позволяет рассматривать приходящий в точку приема сигнал как случайным образом модулированный по фазе.

По определению, мгновенная скорость изменения фазы характеризует мгновенное же значение частоты:

$$\Delta\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} \qquad \varphi = \int_0^t \Delta\omega dt$$

Амплитуда запишется в виде:

5-17

$$E = E_m \exp \left\{ i \left[\omega t - \int_0^t \Delta \omega (t) dt \right] \right\}$$

$$\omega_{\text{МГН}} = \frac{d}{dt} \left[\omega t - \int_0^t \Delta \omega (t) dt \right] = \omega - \Delta \omega (t).$$

- флуктуации длины пути распространяющегося луча можно по желанию толковать либо как случайные флуктуации фазы, либо как случайные флуктуации частоты принимаемого сигнала.

Поле в точке приема в условиях многолучевости будет представлять сумму полей постоянных амплитуд и случайным образом меняющихся фаз. При этом амплитуды интерферирующих лучей не всегда будут постоянными. Если лучей очень много, суммирование заменяют интегрированием.



При сравнительно медленной скорости движения воздушного потока оно носит упорядоченный характер. В каждой точке пространства скорость является однозначной функцией координат и времени.

Если скорость движения газа или жидкости такова, что число Рейнольдса

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu}$$

превосходит некоторое критическое значение, движение теряет устойчивость и приобретает беспорядочный вихревой характер - скорость в данной точке пространства из детерминированной превращается в случайную. Здесь в знаменателе стоит динамическая вязкость потока. Она связана с кинематической вязкостью соотношением:

$$Re = \frac{\rho v \cdot l}{\eta}$$

Здесь v - характерная скорость движения в м/с; η - кинематическая вязкость, кг/м.сек; ρ - плотность, кг/м³; l - характерный масштаб потока.

- По своему физическому смыслу число Рейнольдса представляет **отношение сил инерции единицы объема к силам вязкости**, 6-25 приложенным к границе этого объема.
- ***Закон Колмогорова-Обухова для флуктуаций поля скоростей***
- Для анализа явления распространения радиоволн нужно связать характер изменений параметров среды с локальным поведением показателя преломления
- Исходными пунктами теоретических построений в этой области служат фундаментальные исследования А.Н.Колмогорова, создавшего теорию локально-изотропной турбулентности, отражающую основные закономерности реальных движений воздушных масс в тропосфере.
- Основными положениями, принятыми для построения теории и определяющими, таким образом, границы ее применимости, являются предположения о локальной однородности поля скоростей, представленного случайными компонентами, и его изотропности.
- Локальная однородность = закон распределения случайных величин в рассматриваемой локализованной области не зависит от координат, времени и разности случайных величин (скоростей), измеренной в двух точках пространства.
- Изотропность требует дополнительного предположения об инвариантности законов распределения по отношению к вращению и зеркальным отображениям исходной системы координатных осей.

В приближении локально-изотропной турбулентности вторые моменты случайных величин (скоростей движения элементов среды) однозначно выражаются через элементы вязкости среды, средней рассеиваемой энергии и некоторую универсальную функцию, которая в случае больших расстояний (по сравнению с масштабом наиболее мелких пульсаций) пропорциональна расстоянию в степени две трети.

Строго эта задача решается на основе уравнения Навье-Стокса:

$$\rho_m \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \left(\vec{V} \text{ grad} \right) \vec{V} - \mu \nabla^2 \vec{V} + \text{grad } p \right] = 0$$

где ρ_m - плотность среды, \vec{V} - скорость движения элемента среды,
 μ - коэффициент вязкости, p - давление в среде.

После некоторых преобразований его можно представить в виде

$$\frac{\partial \varpi}{\partial t} + \text{div}(\vec{V} \varpi) = -\mu (\text{rot } \vec{V})^2 - (\vec{V} \text{ grad } p) + \mu \text{div}[\vec{V} \text{ rot } \vec{V}]$$

ϖ - плотность кинетической энергии, то есть энергия в единице объема

$$\overline{\omega} = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad 6-27$$

$$\frac{\partial \overline{\omega}}{\partial t} + \text{div}(V \overline{\omega}) = -\mu(\text{rot}V)^2 - (V \text{grad}p) + \mu \text{div}[V \text{rot}V]$$

- Уравнение характеризует баланс энергии при турбулентном движении.
- Левая его часть представляет величину изменения энергии единицы объема, а правая характеризует физические процессы, которые вызывают эти изменения. Первый член правой части определяет потери энергии внутри объема, вызываемые вязкостью среды, второй характеризует работу, совершаемую градиентом давления, третий выражает энергию, сообщаемую силами сдвига на поверхности элемента объема среды, обладающей вязкостью.
- На основании этого баланса оценим порядок величин различных компонент энергии, характеризующих движение тропосферного воздуха.

Введем величину L как размер турбулентной неоднородности (вихря) и сопоставим с ней изменение скорости ΔV как флуктуирующую величину внутри объема L^3 . Если через $\langle V \rangle$ обозначить усредненное по объему L^3 значение скорости, то

$$\langle (\Delta V_L)^2 \rangle = \langle (V_L - \bar{V}_L)^2 \rangle$$

Здесь мы определили $\langle (\Delta V_L)^2 \rangle$ как дисперсию случайной величины V , считая среду изотропной.

Динамика неоднородностей представляет собой картину передачи

энергии от возникших в условиях турбулентного движения вихрей

наибольшего размера L_0 , получивших энергию, определяемую силами

давления $(V \text{ grad } p)$ вихрям меньших размеров вплоть до наименьшей величины

, после чего энергия движения переходит в тепловую. $\Delta 0$

Считаем этот процесс стационарным: ни в каком из участков
величины L , характеризующих размеры вихрей

6-29

$$L_0 > L > \lambda_0$$

не происходит накопления энергии, получаемой от вихрей
больших размеров.

При этих условиях мощность, подводимая к вихрю размера L ,
должна определяться величиной

$$\operatorname{div}(\omega_L \mathbf{V}_L) = S_L$$

Эту величину можно оценить, введя понятие о “времени жизни” вихря
размера L :

$$\tau_L \approx \frac{1}{2} \frac{L}{\Delta V_L}$$

то есть среднее время, за которое частицы со
скоростью ΔV_L выйдут за пределы области
 L .

ΔV_L

Полагая, что через время T вихрь размера L распадется на более мелкие вихри, определим величину S_L как отношение кинетической энергии вихря ко времени T

$$S_L \approx \frac{\varpi_L}{t_L} = \frac{2\varpi_L \Delta V_L}{L}$$

Подставив выражение для кинетической энергии

$$\varpi = \frac{1}{2} \rho (\Delta V_L)^2$$

найдем

$$S_L = \frac{\rho (\Delta V_L)^3}{L}$$

В условиях стационарности эта величина будет постоянна внутри всего интервала от наиболее крупных до наиболее мелких вихрей 6-31

$$S_L = \frac{\rho(\Delta V_L)^3}{L} = \text{const.}$$

Это означает, что накопления энергии в неоднородностях одного размера не происходит. В противном случае энергия накапливалась бы в некоторых неоднородностях, а это привело бы к нарастанию их удельного содержания в атмосфере, что противоречит принятому предположению о структурной стационарности.

$$(\Delta V_L)^2 \sim L^{2/3}$$

-фундаментальное соотношение, связывающее скорость хаотического движения с пространственными размерами.

Число Рейнольдса уменьшается с уменьшением L и становится близким к единице при $L \rightarrow L_0$. 6-32

Если число Рейнольдса велико, существует развитая турбулентность.

При малых числах Рейнольдса вязкость поглощает энергию движений и вихревое движение не развивается.

Первоначальный запас мощности, очевидно, сообщен внешними силами вихрям наибольшего размера .

В силу стационарности эта величина равна энергии, передаваемой за единицу времени вихрям меньшего размера вплоть до размеров λ_0 , после чего происходит диссипация энергии вследствие действия сил вязкости.

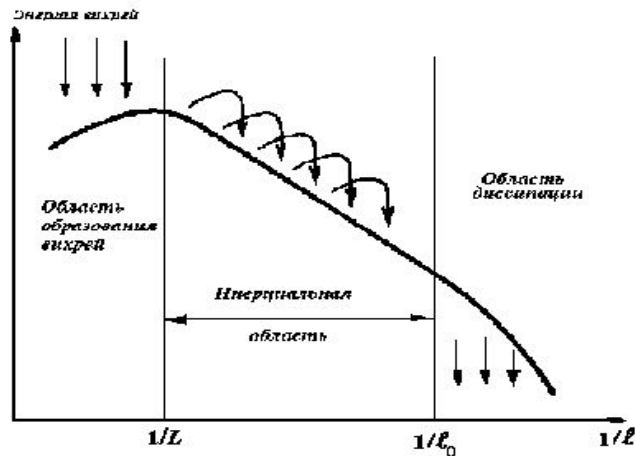
Флуктуации диэлектрической проницаемости тропосферы могут рассматриваться как подчиняющиеся (в условиях довольно идеализированного рассмотрения) “закону 2/3”.

Пусть существует некоторое течение воздушных масс. При трении о неоднородности рельефа создаются вихревые движения, для которых энергия отнимается у потока. Постепенно они разбиваются на более мелкие.

Минимальный размер неоднородностей в тропосфере не превышает 1 мм. При дальнейшем измельчении происходит диссипация энергии вихрей в тепло. Таким образом, в атмосфере мы имеем набор неоднородностей размерами

6-33

$$L_0 \geq \lambda \geq \lambda_0$$



Интервал размеров, в котором поток энергии постоянен, называется инерциальным интервалом

6-34

$$L_0 \geq \lambda \geq \lambda_0$$

Закон Колмогорова – Обухова:

$$D_n(\lambda) = C_n^2 \lambda^{2/3}.$$

Структурная характеристика флуктуаций показателя преломления воздуха

$$10^{-10} \geq C_n^2 \geq 10^{-22} \text{ см}^{-2/3}$$

Эта величина определяет интенсивность флуктуаций показателя преломления атмосферы и в сильной степени зависит от метеорологического состояния трассы и рельефа местности.

Слабой турбулизированности соответствует величина C_n^2 порядка $10^{-22} - 10^{-17}$. 6-35

Величины C_n^2 порядка $10^{-16} - 10^{-14}$ соответствуют умеренной возмущенности.

В случае C_n^2 порядка $10^{-13} - 10^{-10}$ в атмосфере развивается так называемая сильная турбулентность, приводящая к Кардинальным изменениям структуры волнового фронта и возникновению на нем так называемых дислокаций.

Закону "двух третей" соответствует трехмерный пространственный спектр неоднородностей показателя преломления вида

$$\Phi_n(\vec{\kappa}) = 0.033C_n^2\kappa^{-11/3}$$

- Переход от пространственных характеристик излучения к временным. Гипотеза "замороженной" турбулентности. 6-36
- Скорость движения любого достаточно малого элемента среды можно представить в виде суммы:

$$V = V_0 + V_1$$

V_0 - усредненная скорость

V_1 - турбулентная скорость или скорость хаотического

движения.

Если за время $|V_1/V_0| \ll 1$

$\tau = \rho/V_{\perp}$ - время, необходимое для перемещения среды между

приемными элементами, разнесенными на расстояние ρ . За это время пространственное распределение параметров среды в системе

координат, движущейся со скоростью V_0 , не претерпевает существенных изменений.

Иными словами, турбулентными движениями в среде на временных
расстояниях

6-37

$$\tau \leq \rho / V_{\perp}$$

можно пренебречь.

Если предположить, что продольная компонента скорости ветра оказывает пренебрежимо малое влияние на спектр временных флуктуаций поля, то для статистически однородных сред между временным и пространственным коэффициентами корреляциями флуктуаций поля существует весьма простая зависимость :

$$b(\tau) = b(\rho)$$

Допущение о малости декорреляции за счет влияния продольной компоненты скорости переноса возможно при условии выполнения неравенства

$$V_{\parallel} / V_{\perp} \ll \sqrt{L / \lambda}$$