

Флуктуации скорости звука в пограничном слое атмосферы при устойчивой стратификации

В.П.Юшков

Физический факультет МГУ

yushkov@phys.msu.ru +7 (916) 125-9036



Аннотация

Рассматривается связь флуктуаций потенциальной температуры и скорости звука σ_c^2 в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое (АПС) с кинетической энергией вихревых турбулентных флуктуаций E_T и скоростью их диссипации ε_v . Проведённые расчёты ковариаций флуктуаций скорости звука и вертикальной компоненты скорости ветра показывают, что в устойчиво стратифицированном пограничном слое наблюдается предельный переход к состоянию в котором турбулентный поток тепла и поток импульса связаны без каких-либо эмпирических коэффициентов. Предполагается, что этому состоянию соответствует вырожденная функция распределения флуктуаций скорости звука. Предложен критерий характеризующий это состояние сильно устойчивой стратификации. На основе понятия потенциально доступной энергии турбулентности, связанной с адиабатическими флуктуациями давления, рассмотрен баланс флуктуаций силы градиента давления и силы плавучести.

Турбулентный поток тепла и импульса в АПС:

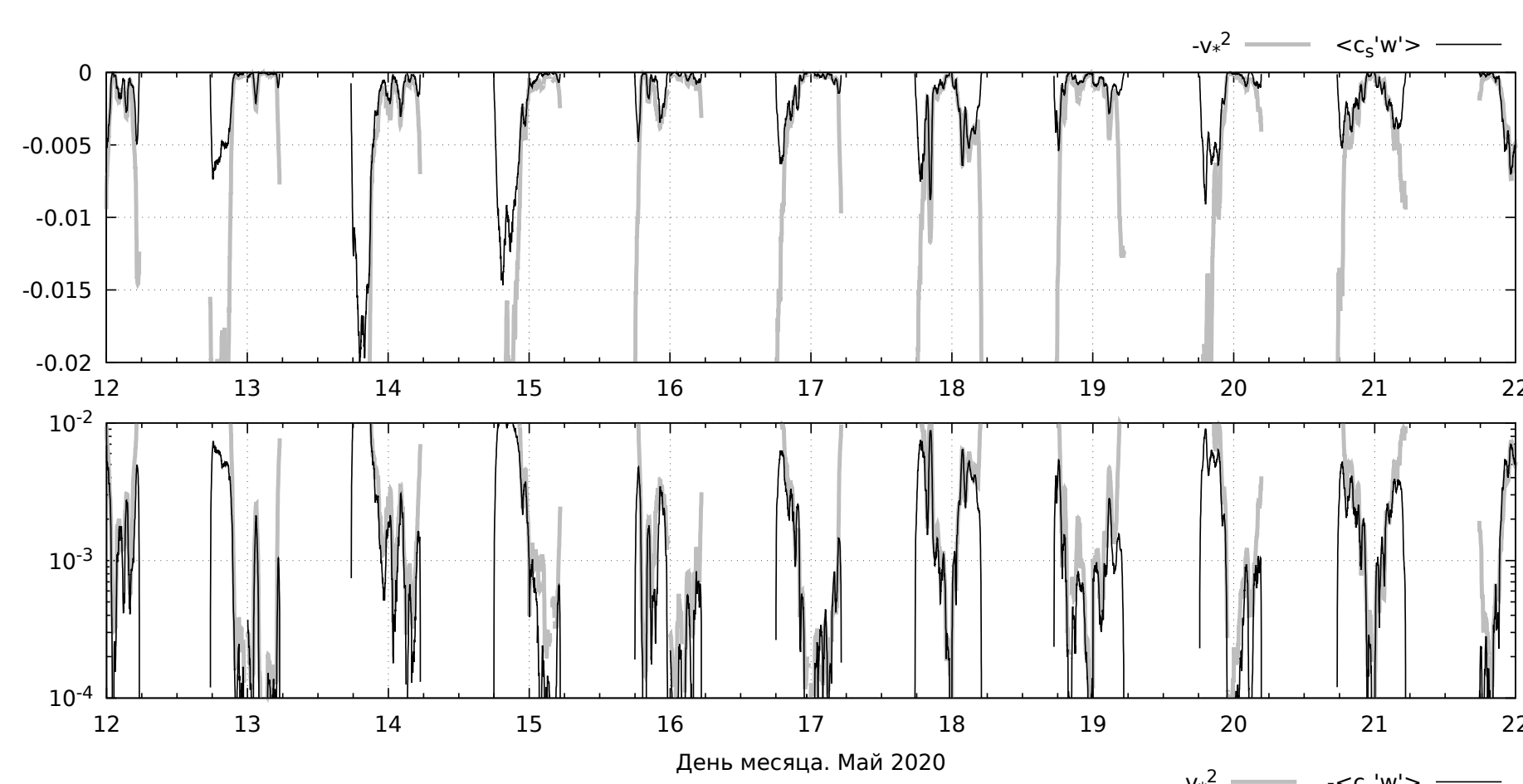
$$c_s^2 = \frac{C_P}{C_V} R_\mu T = \frac{C_P}{C_V} R_\mu (\bar{T} + T') = (\bar{c}_s + c'_s)^2,$$

$$\frac{C_P}{C_V} R_\mu T' \approx 2c'_s c_s, \quad \sigma_c^2 = 0.1 \frac{C_P}{\bar{T}} \sigma_T^2,$$

$$\bar{\rho} C_P \langle T' w' \rangle = 5 \bar{\rho} c_s \langle c'_s w' \rangle$$

$$-g \frac{\langle \rho' w' \rangle}{\bar{\rho}} = g \frac{\langle \theta' w' \rangle}{\bar{\theta}} = \frac{2g}{c_s} \langle c'_s w' \rangle$$

Сопоставление “потока тепла” ($\langle c'_s w' \rangle < 0$) и “потока импульса” ($\langle u' w' \rangle = -v_*^2$) при устойчивой стратификации:



Примеры синхронного изменения турбулентных потоков в приземном слое атмосферы по измерениям над ровной поверхностью в Cabauw (Нидерланды) в линейной (а) и логарифмической (б) шкале. м²/с². Май 2020 г. Высота 3 м (AGL)

Генерация адиабатических флуктуаций в АПС:

$$\delta = \frac{\sigma_p^a}{\bar{\rho} R_\mu \sigma_T} = \frac{\sigma_a c_s}{R_\mu \bar{T} 2 \sigma_c / c_s} = 0.7 \frac{\sigma_a}{\sigma_c} \ll 1$$

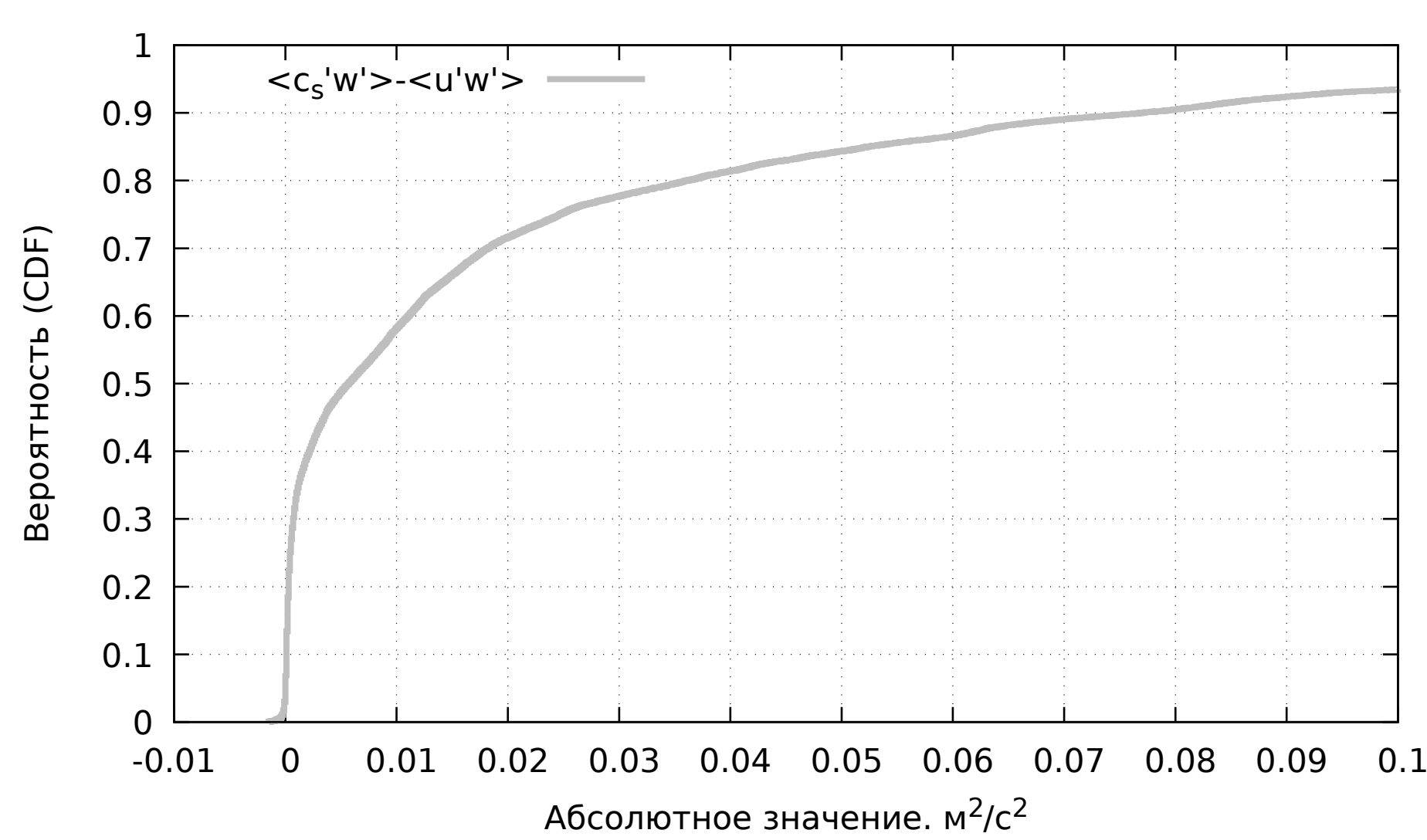
$$\frac{dS}{dt} = \gamma \Delta S + \dot{Q}/T \quad : \quad \gamma \gg \eta = \left(\frac{4}{3}\nu + \xi\right) + \left(\frac{C_P}{C_V} - 1\right)\chi$$

$$\varepsilon_c = 0.1 \frac{C_P}{\bar{T}} N_O = \gamma \int_0^\infty \kappa^2 \Phi_c(\kappa) d\kappa$$

$$\langle \rho T \frac{dS}{dt} \rangle = \langle \rho c_s^2 \frac{d\Lambda}{dt} \rangle = \frac{C_P}{C_V} \langle p \frac{d\Lambda}{dt} \rangle = \bar{\rho} \varepsilon_a$$

$$\varepsilon_a = \eta \int_0^\infty \kappa^2 \Phi_a(\kappa) d\kappa \ll \varepsilon_c \sim \varepsilon'_v \quad \text{в АПС}$$

Эмпирическая функция распределения разницы величин $\langle c'_s w' \rangle - \langle u' w' \rangle$:



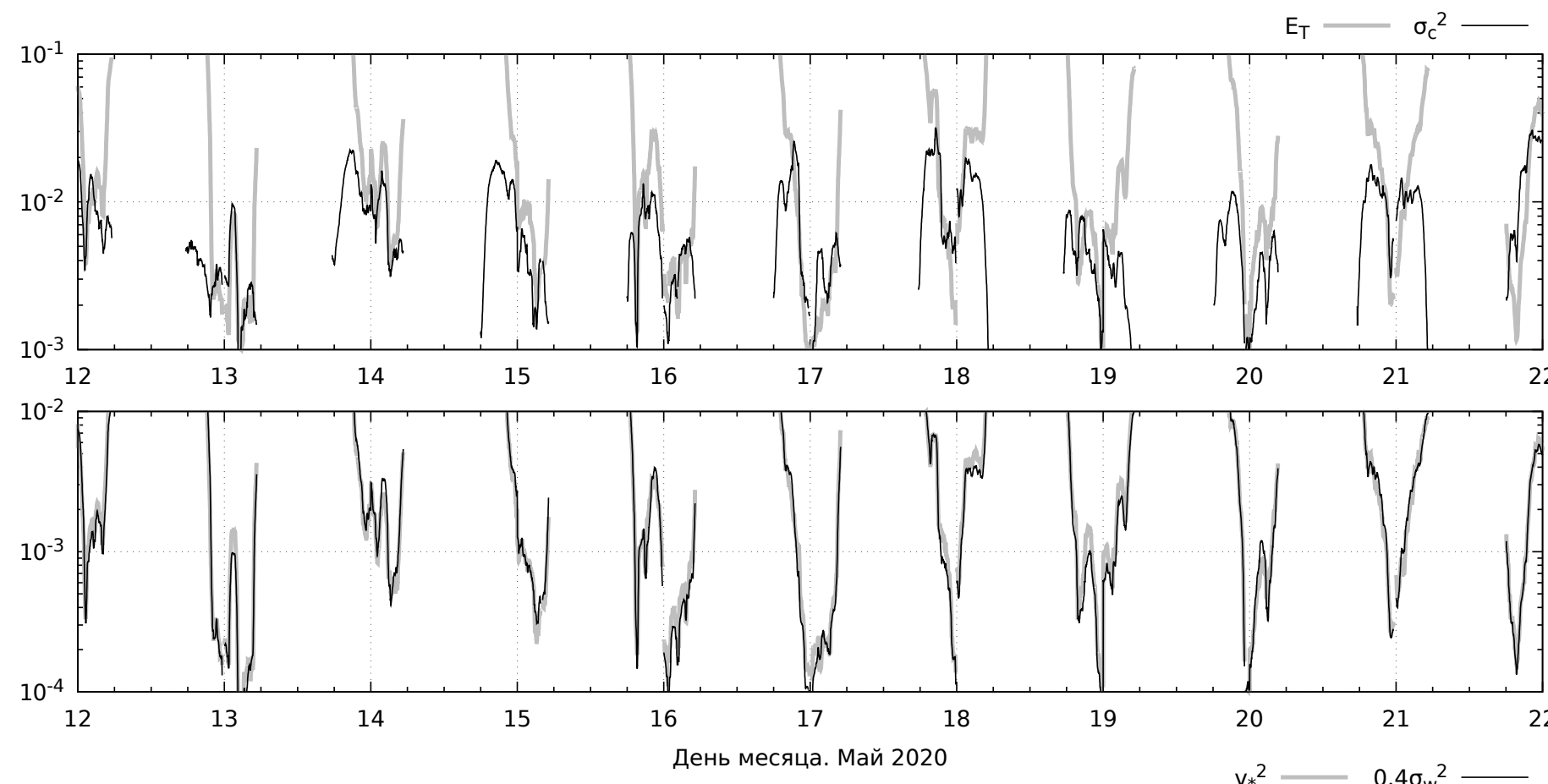
Эмпирическая функция распределения по расчётам в условиях устойчивой стратификации ($\langle c'_s w' \rangle < 0$) за месяц измерений. Cabauw (Нидерланды), май 2020 г., высота — 3 м

Анизотропия турбулентных флуктуаций в АПС:

$$E_P = \frac{1}{2} \frac{g^2}{N^2 \bar{\rho}} \langle \left(\frac{\rho'}{\bar{\rho}}\right)^2 \rangle, \quad \text{где} \quad N^2 = -\frac{g}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial z}$$

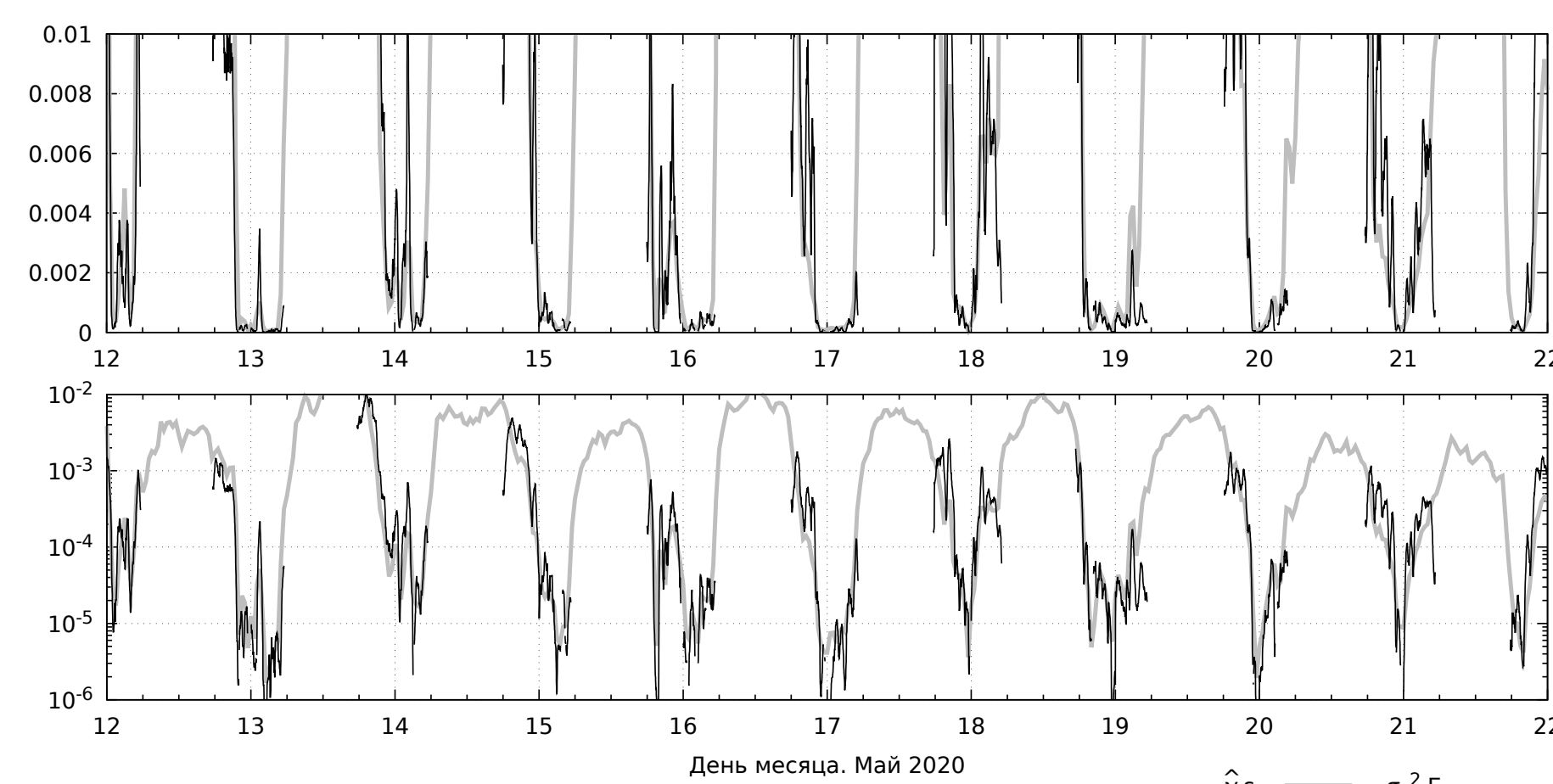
$$\langle (\rho' / \bar{\rho})^2 \rangle = \langle (2c'_s / c_s)^2 \rangle = 4\sigma_c^2 / c_s^2$$

$$E_T \approx \frac{\sigma_u^2 + \sigma_v^2}{2} \sim \sigma_u^2 \sim \sigma_c^2 > \sigma_w^2$$



Поведение кинетической энергии турбулентности E_T и дисперсии флуктуаций скорости звука σ_c^2 (а) в сопоставлении с потоком импульса v_* и дисперсии вертикальной компоненты скорости ветра σ_w^2 в условиях устойчивой стратификации. Cabauw (Нидерланды), май 2020 г., высота — 3 м.

Связь со скоростями диссипации:



Связь кинетической энергии турбулентности E_T и дисперсии флуктуаций скорости звука σ_c^2 со скоростью диссипации ε_v в условиях устойчивой стратификации, в линейной (а) и логарифмической (б) шкале. м⁴/с⁴. Параметр $\hat{\gamma} = 0.2$ м²/с. Cabauw.

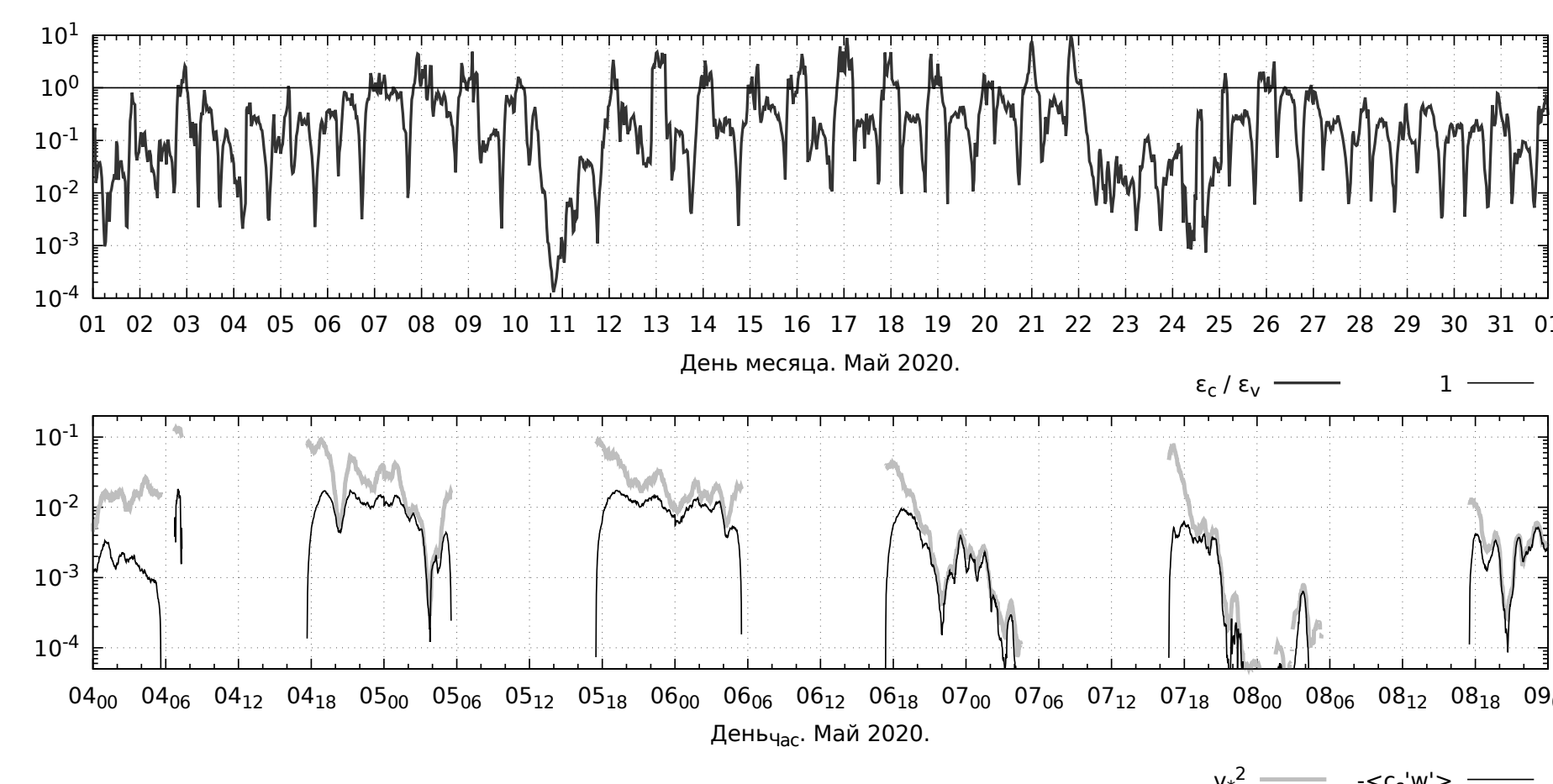
$$\langle \rho' \varepsilon'_v \rangle = \bar{\rho} \varepsilon_a \quad : \quad \varepsilon'_v = \varepsilon_v^+ - \varepsilon_v^- \sim \varepsilon_c \quad : \quad \varepsilon_c / \varepsilon_v \ll 1$$

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_v} = 4\pi^2 \frac{\sigma_c^3}{\sigma_v^3} \Rightarrow \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_v}\right)^{2/3} \rightarrow 1$$

$$2\pi\gamma\varepsilon_v = \sigma_c\sigma_v^3 \quad \gamma \frac{\varepsilon_v}{E_T} \rightarrow \sqrt[3]{4/\pi} \sigma_c^2$$

$$Re_\lambda = \frac{\sigma_v \lambda}{\nu} \sim \frac{4\sigma_v^2}{\sqrt{\nu\varepsilon_v}} \sim \frac{4\sigma_v^2}{\sqrt{\eta\varepsilon_c}} \sim \sqrt{\frac{\gamma}{\eta}} \frac{\sigma_v^2}{\sigma_c^2}$$

Связь скорости диссипации с генерацией флуктуаций скорости звука:



Временной ход отношения скорости выравнивания флуктуаций скорости звука ε_c и скорости диссипации кинетической энергии турбулентности ε_v за месяц измерений в Cabauw на высоте 3 м (а) Ниже показано детально соотношение потоков тепла и импульса на интервале времени 4–9 мая в сравнении с изменением превышения $\varepsilon_c / \varepsilon_v > 1$ (б)

Связь со спектральным разложением — композицией спектров

$$\Phi_c(\kappa) = \sum_n P_n \Phi_n(\kappa)$$

$$\Phi_n(\kappa) = \frac{1}{z} \frac{\gamma^2 \kappa}{e^{\gamma \kappa / \sigma_n} - 1}$$

$$\bar{E}_T = \sum_n P_n E_n^P, \quad \text{где} \quad E_n^P = \gamma \kappa_n c_s$$

$$\phi = \rho / \bar{\rho} = \psi^* \psi, \quad \psi = \sum_n C_n \psi_n(\mathbf{r}) e^{i\omega_n t}, \quad \sum_n C_n^2 = 1$$

$$\int \mathcal{R}_a(t - \tau) \psi_n(\tau) d\tau = \lambda_n \psi_n(t)$$

Резюме:

- при устойчивой стратификации в атмосферном пограничном слое наблюдается сближение поведения (временного изменения) кинетической энергии турбулентности и дисперсии флуктуаций скорости звука
- поток импульса, $\bar{\rho} v_*^2$, связывается с потоком тепла: $5 \bar{\rho} c_s \langle c'_s w' \rangle$
- средняя завихренность, обратно пропорциональная времени корреляции турбулентных вихрей, $\tau_v = \sigma_v^2 / 2 \varepsilon_v$, стремиться к пропорциональности с σ_c^2 .

Наблюдаемые закономерности можно объяснить анизотропией турбулентного перемешивания и учётом роли адиабатических флуктуаций в переносе энергии среднего течения по вертикали, а энергии флуктуаций — по спектру.