

# **Вихревые процессы и спиральность в атмосфере**

Чхетиани О.Г.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

[ochkheti@ifaran.ru](mailto:ochkheti@ifaran.ru)



Март 1996

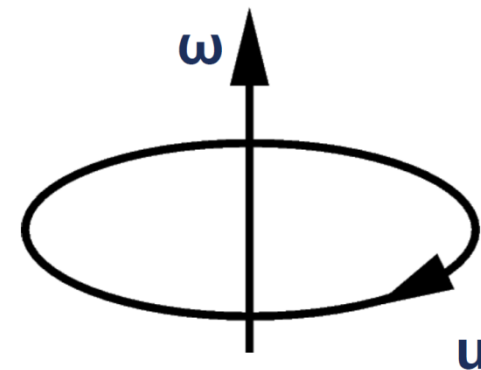
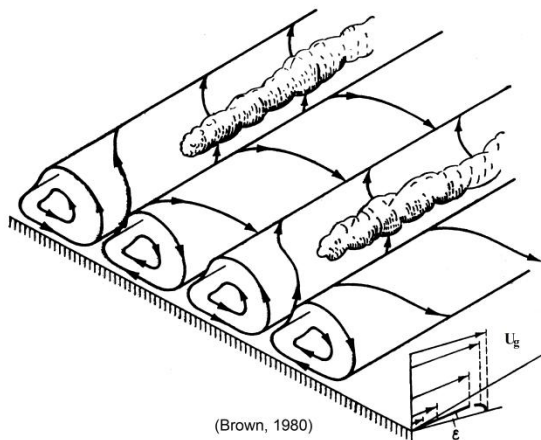
# Турбулентность, каскады, спиральность



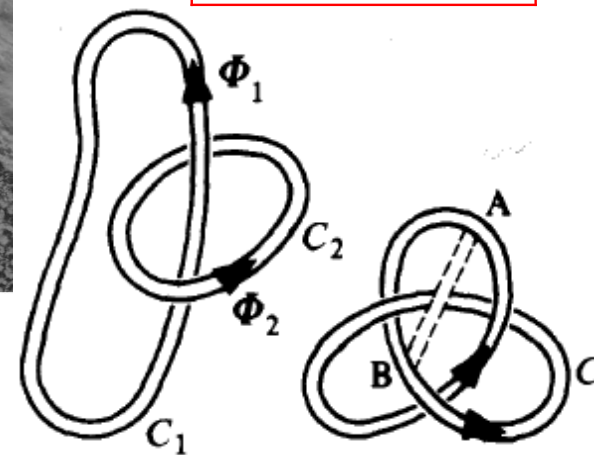
Baltic Sea



Ohotskoe Sea (Far East, Russia)



$$H = \int_V \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\omega} dV,$$
$$\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{v}.$$



Moreau (1961), Moffatt (1969)

**Редукция нелинейности**

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v} + \underline{[\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}]} = -\nabla \left( \frac{p}{\rho} + \frac{\mathbf{v}^2}{2} \right).$$

**Поток спиральности в экмановском пограничном слое**  
 Курганский (1989), Deusebio, Lindborg (2014)

$$S_z = -\iint_{\Sigma} f V_g^2 d\sigma$$

**Тензор потока вихря Новиков (1972)**

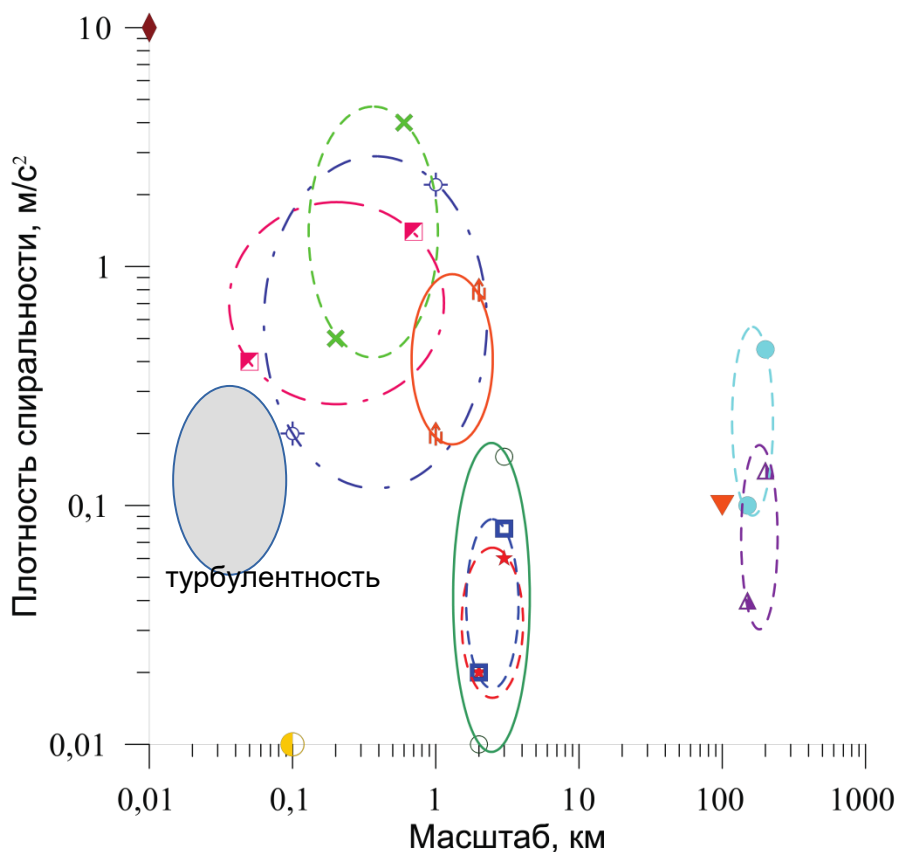
$$\langle v_i \Omega_j \rangle = \frac{\varepsilon_{ikl}}{4\pi} \int_V \frac{r_l}{r^3} \langle \Omega_k(\mathbf{x}') \Omega_j(\mathbf{x}) \rangle d^3 x'$$

$$\langle \Omega_i^2 \rangle = v^{-1} \langle \varepsilon \rangle \quad \text{В свободной конвекции} \quad \langle v_1 \Omega_2 \rangle = -\langle v_2 \Omega_1 \rangle.$$

**Если  $i = j$  - компоненты со спиральностью**



## Спиральность циркуляционных структур



Вазаева, Чхетиани, Курганский,  
Каллистратова (2021)

**Спектры:** Brissaud et al. 1973; Моисеев, Чхетиани (1996)

$$E(k) = c_e \bar{\varepsilon}^{2/3} k^{-5/3}, \quad H(k) = c_h \bar{\eta} \bar{\varepsilon}^{-1/3} k^{-5/3}, \quad \bar{\eta} = \nu \langle \boldsymbol{\omega} \cdot \nabla \times \boldsymbol{\omega} \rangle$$

$$\bar{\varepsilon} = \nu \langle \boldsymbol{\omega}^2 \rangle \quad E(k) = c_e \bar{\eta}^{2/3} k^{-7/3}, \quad H(k) = c_h \bar{\eta}^{2/3} k^{-4/3}.$$

**Точные соотношения для моментов, связь с диссипацией**

$$\langle \delta v_l(\mathbf{x} | \mathbf{r})^3 \rangle = -\frac{4}{5} \bar{\varepsilon} \cdot r$$

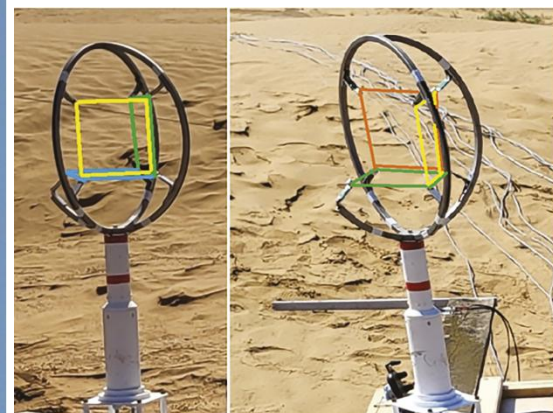
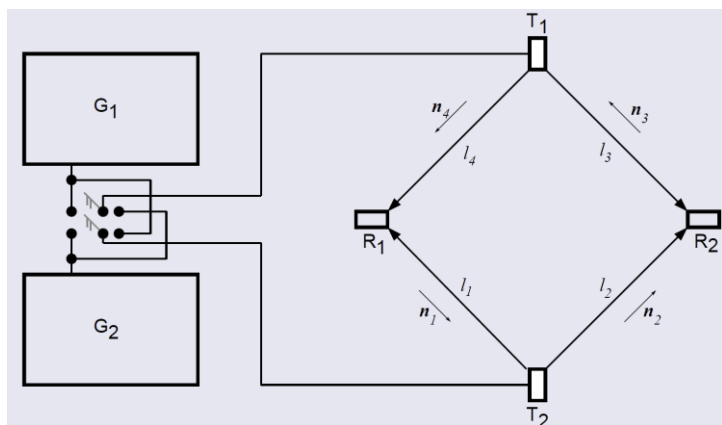
**Колмогоров (1941)**

$$\langle \delta v_l(\mathbf{x} | \mathbf{r}) [v_t(\mathbf{x} + \mathbf{r}) \times v_t(\mathbf{x})] \rangle = \frac{2}{15} \bar{\eta} \cdot r^2.$$

**Чхетиани (1996)**

**Как это увидеть\измерить? - нужно измерить вихрь**

Можно измерить циркуляцию по контуру: Бовшеверов и др. (1971), Копров и др. (1987), (1994)

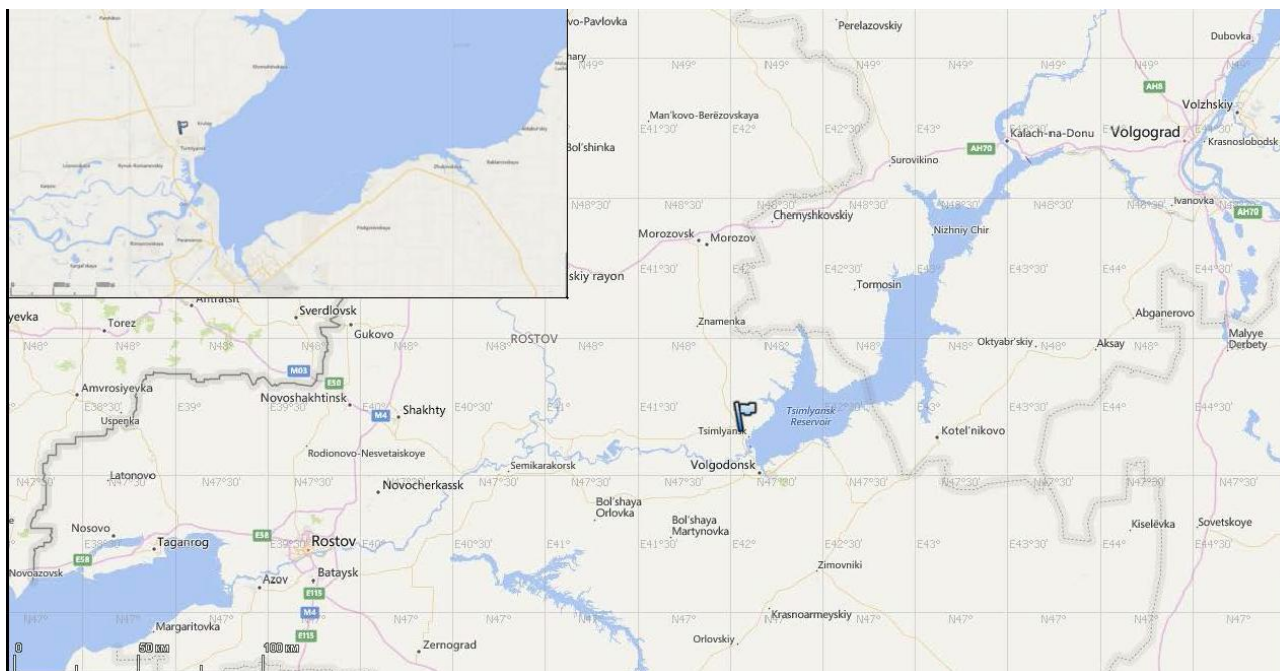
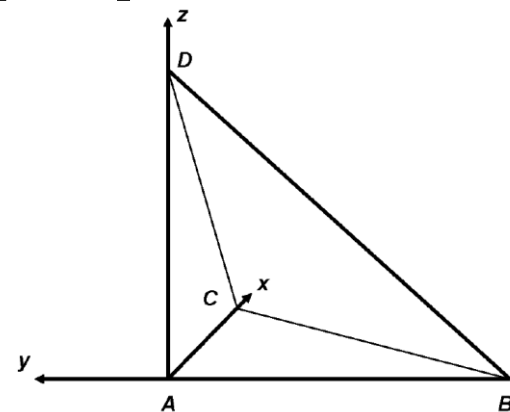


Циркулиметры, 2004, 2007 — Звенигород (ЗНС), 2020-2024 — Цимлянск, Калмыкия

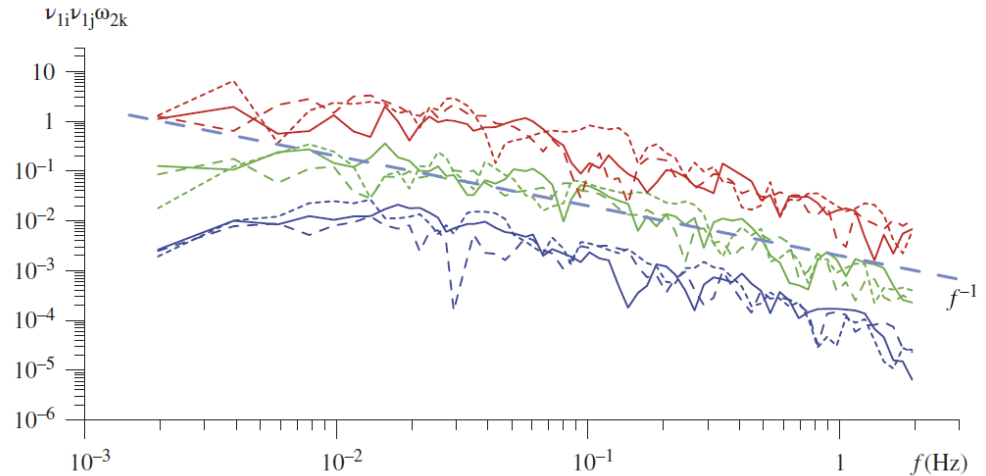
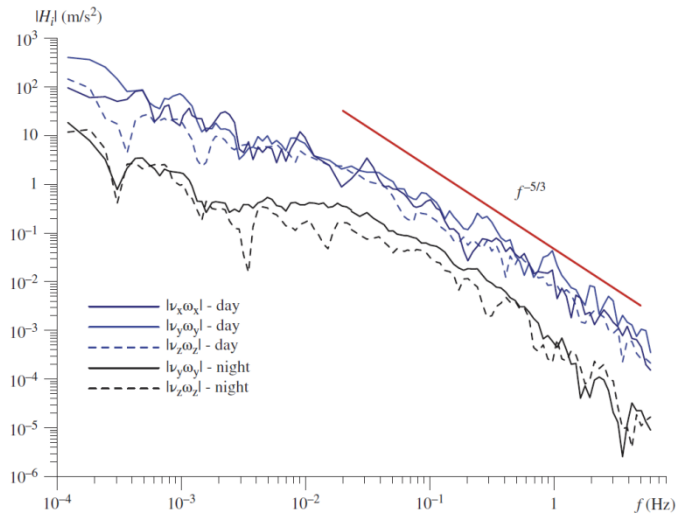


## Тетраэдр: 2012, 2014

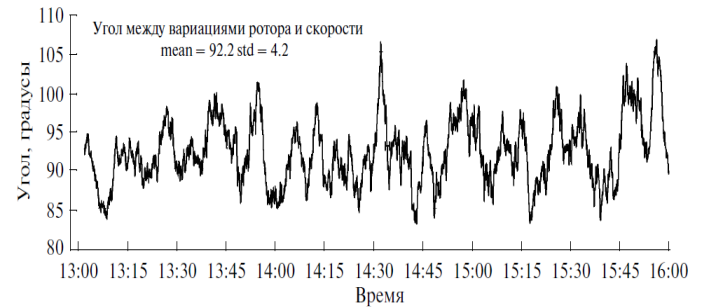
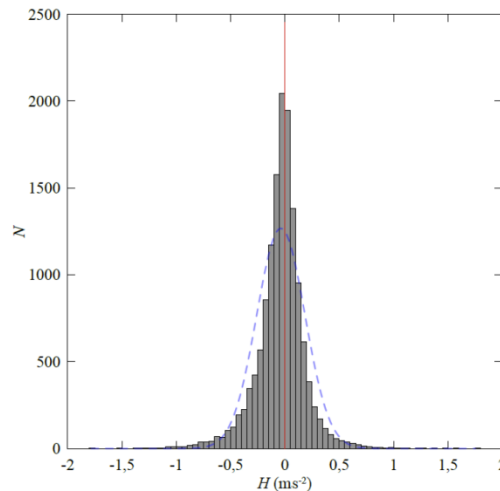
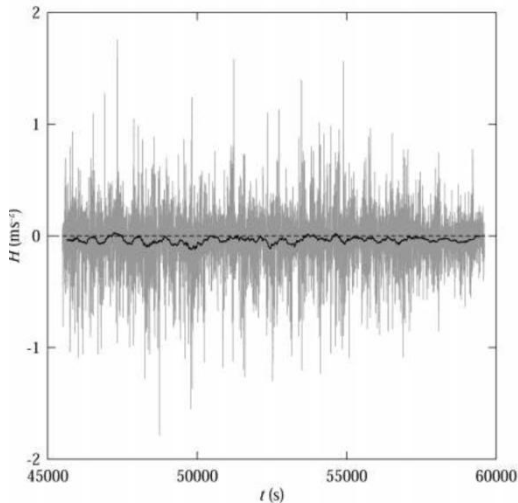
$$H_A = u_A \xi_A + v_A \eta_A + w_A \zeta_A \approx \frac{w_A u_B - u_A w_B}{L_{AD}} + \frac{v_A u_D - u_A v_D}{L_{AB}} + \frac{w_A v_C - v_A w_C}{L_{AC}}$$



## Спектры спиральности: Копров и др. (2005), Chkhetiani, Kurgansky (2024)



## Знакоопределенность: Chkhetiani et al. (2018), Копров и др. (2015)

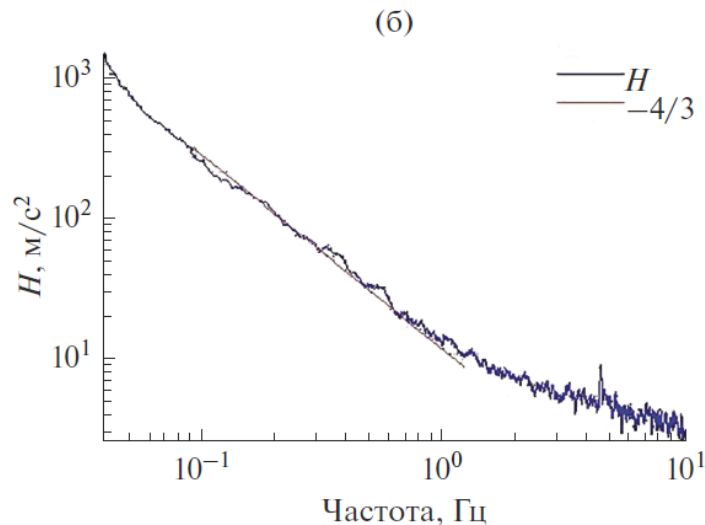
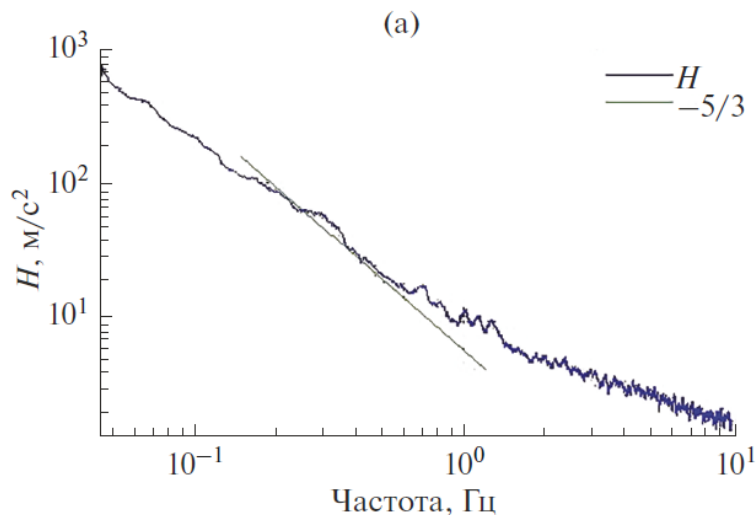


$$H = 2K\tau\Omega (\nabla \times \Omega) + 2\Omega_0\tau \frac{d\langle v_z^2 \rangle}{dz} + 2\beta g \langle \theta \omega_z \rangle \tau$$

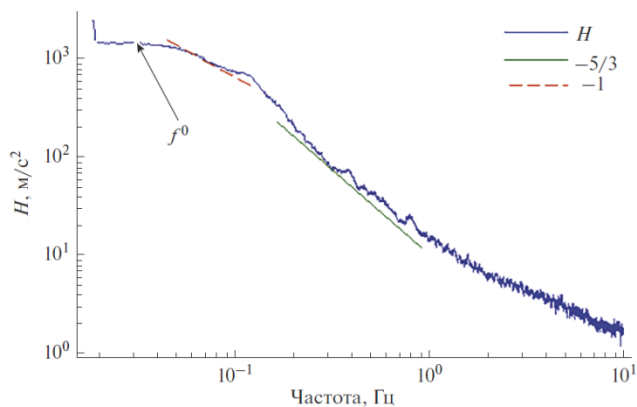
$$H \approx 3 \cdot 10^{-3} \div 2 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$$



Спектры спиральности: Соленая и др. (2023) а) 10.08.2022 ночь б) 11.08.22 день



12.08.22 ночь



$$\frac{\mathbf{u}_k \cdot \text{rot } \mathbf{u}_k}{\tau_k} \sim \beta g \theta_k \omega_{k3} \cdot \omega_{k3} \approx k u_k \quad \tau_k \sim (k u_k)^{-1} \quad \omega_{k3} \tau_k \approx a = \text{const} \quad \theta_k \sim N^{1/2} \varepsilon^{-1/6} k^{-1/3}$$

$$(\mathbf{u}_k \cdot \text{rot } \mathbf{u}_k)_i \sim \beta g a N^{1/2} \varepsilon^{-1/6} k^{-1/3}, \quad H(k) = \frac{d \mathbf{u}_k \cdot \text{rot } \mathbf{u}_k}{dk} \sim \beta g a N^{1/2} \varepsilon^{-1/6} k^{-4/3}$$

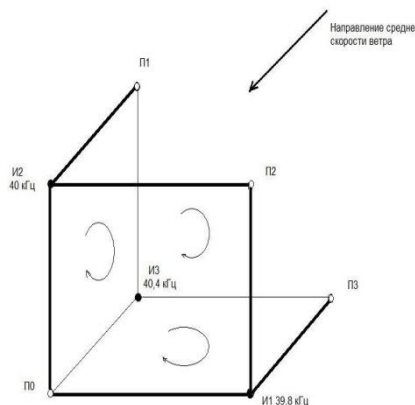
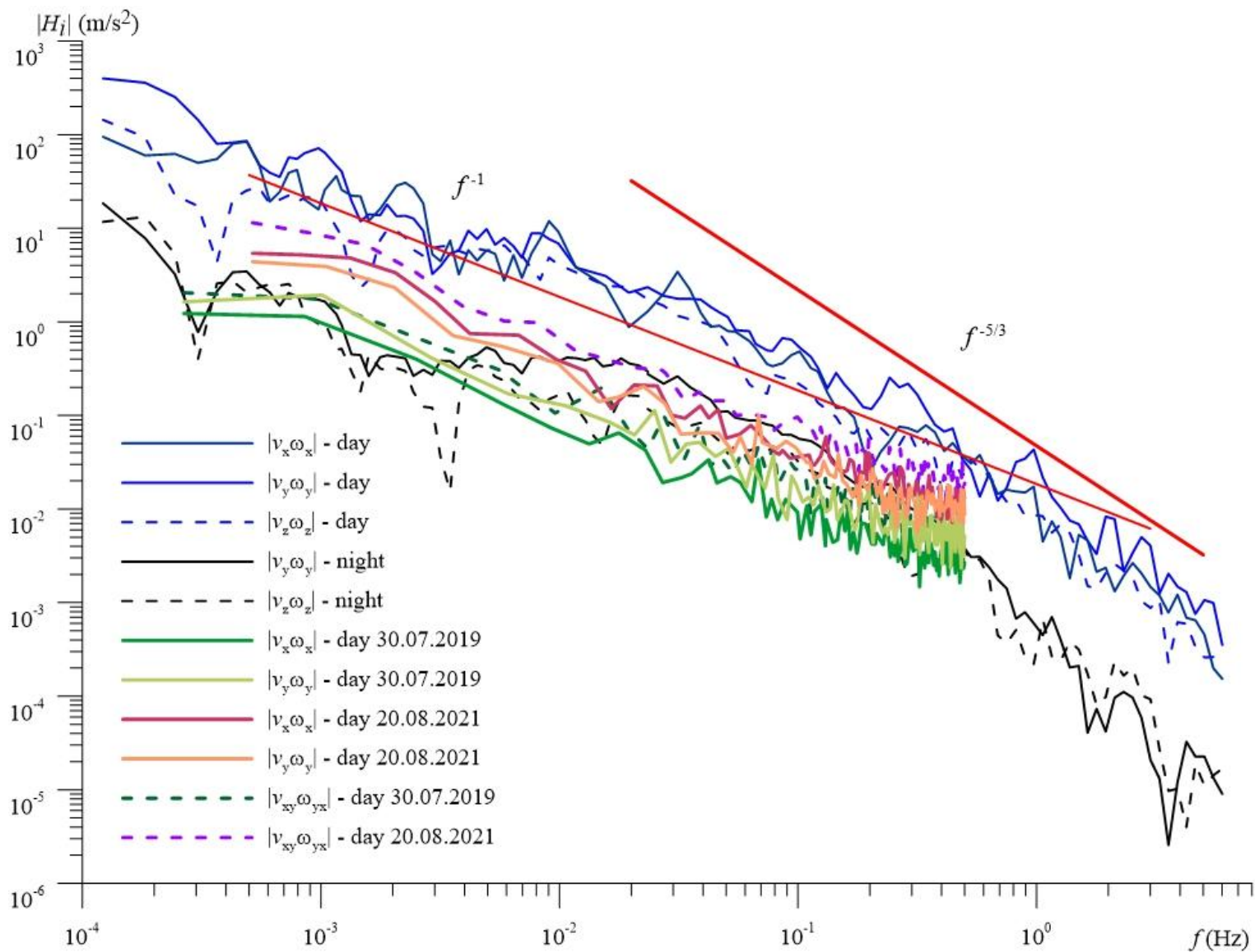


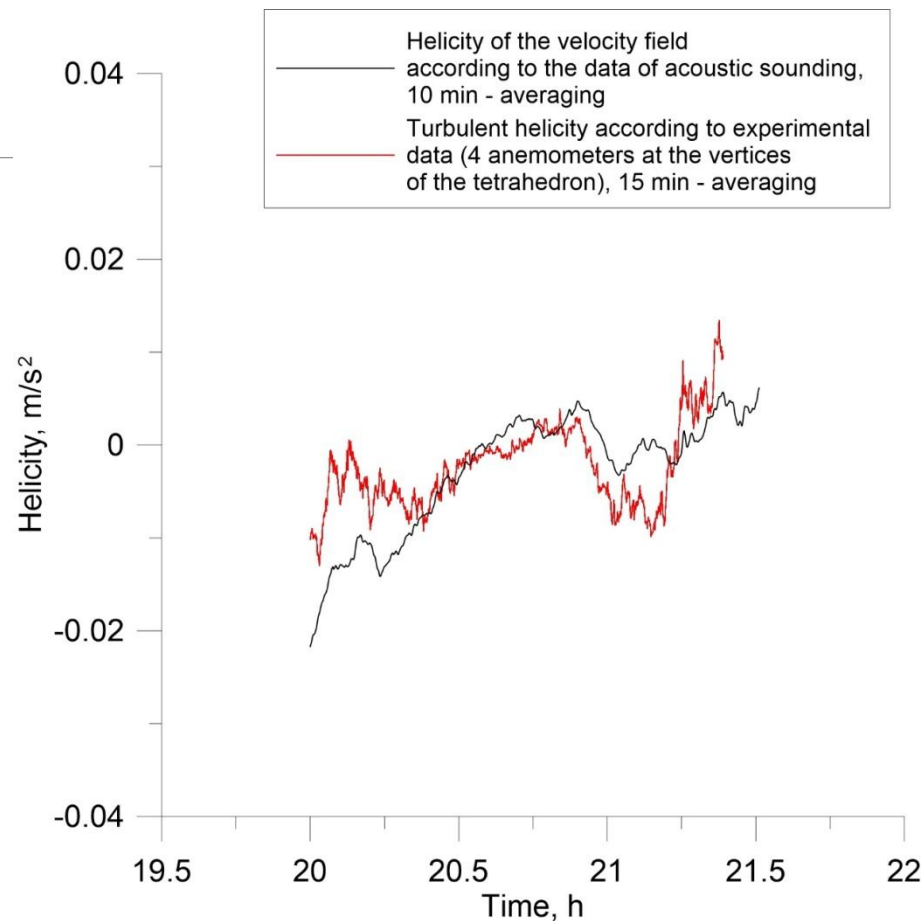
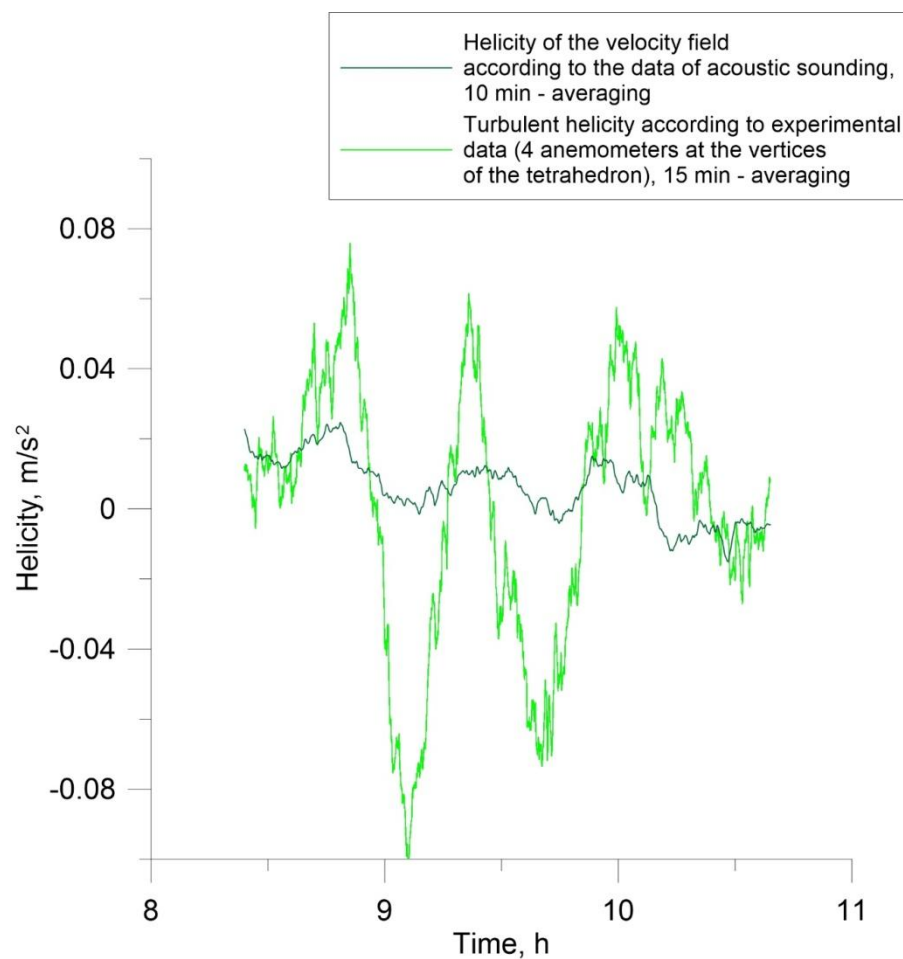
Схема 3-компонентного циркулиметра



# Спектры спиральности, содар (2019,2021) и циркулиметр (2004)



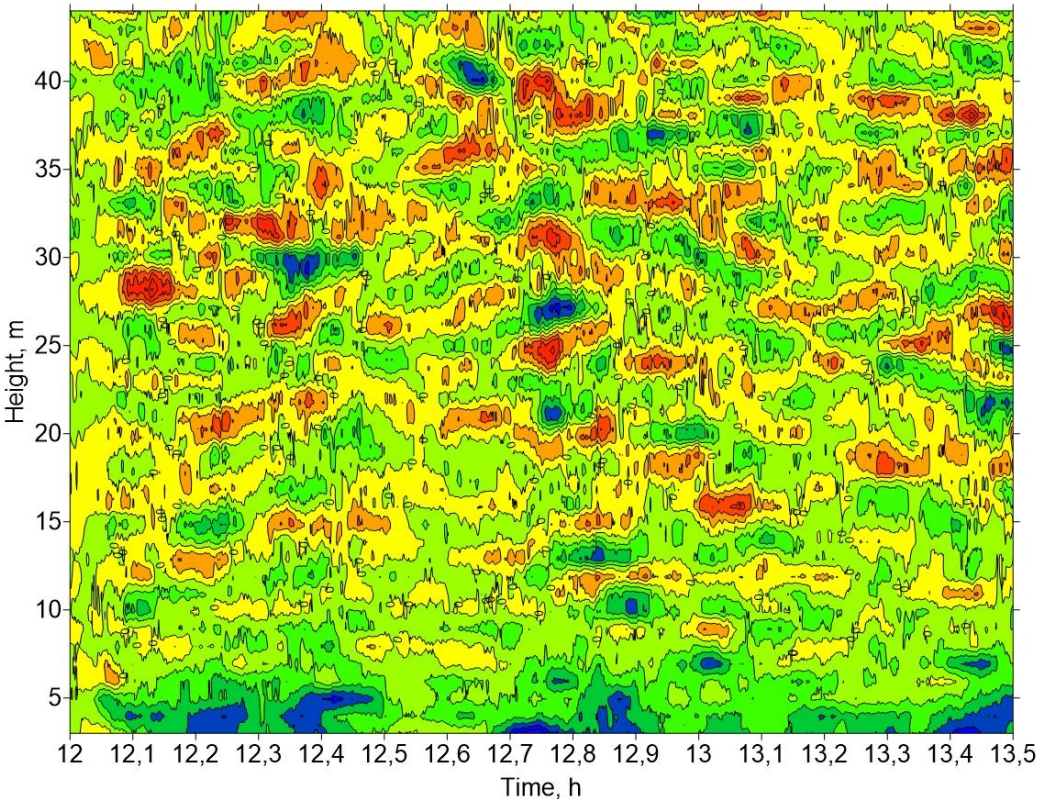
## Изменения спиральности содар\турбулентность – утро\вечер (Цимлянск, 2012)



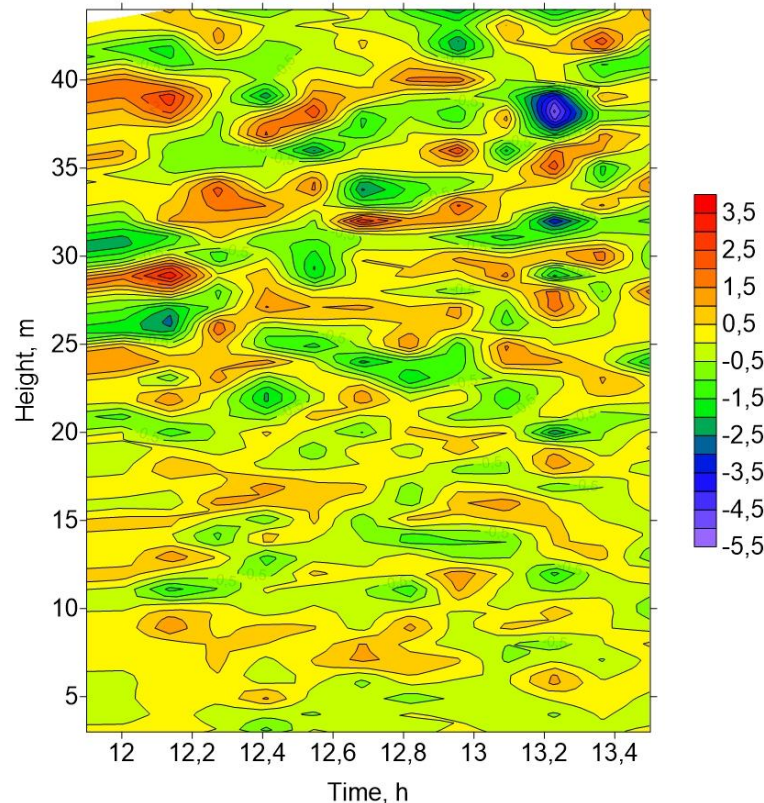


# Спиральность в субмезомасштабных структурах АПС (содар высокого разрешения)

a) 30.07.2019  
Helicity density,  $\text{m/s}^2$

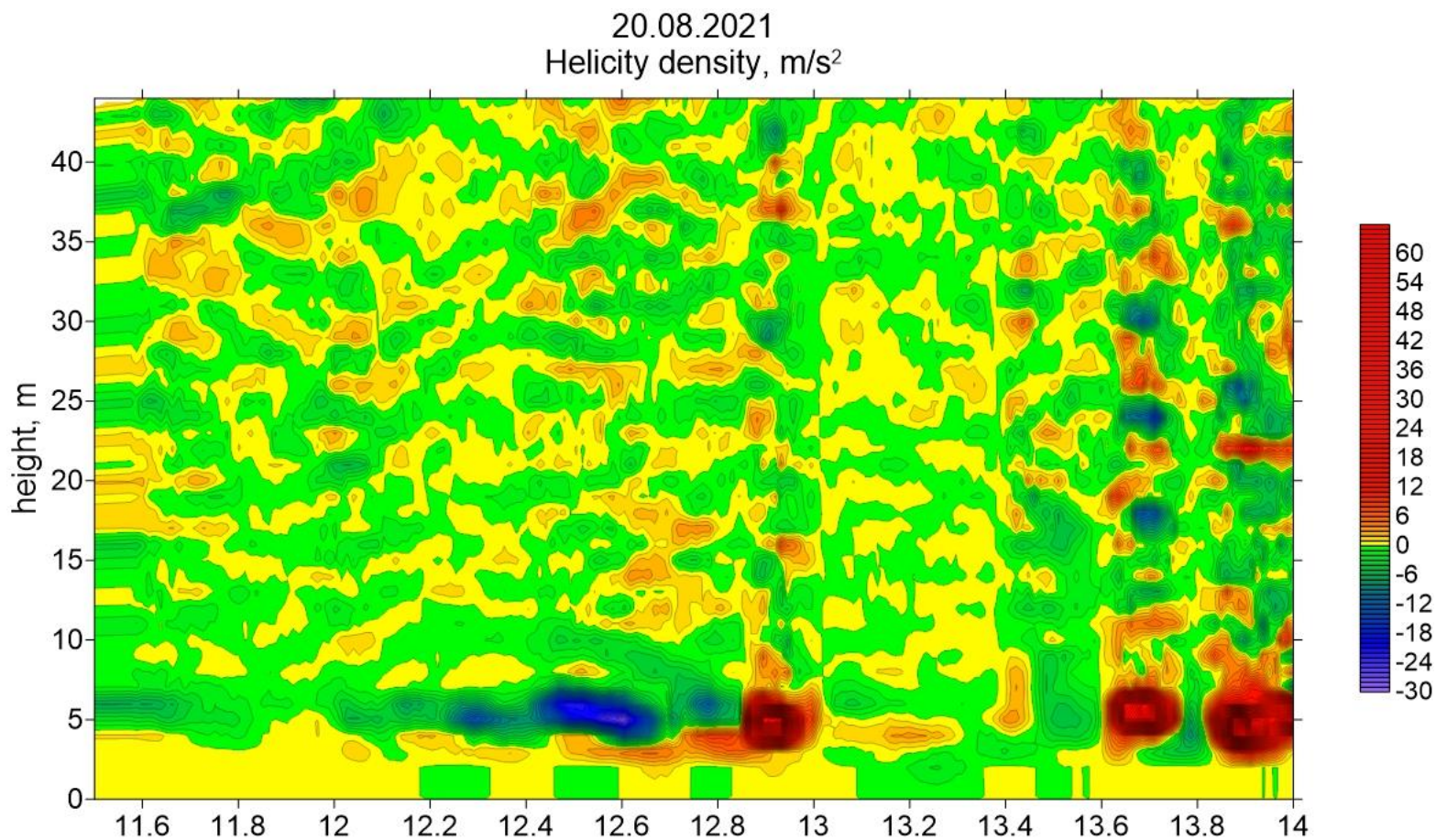


b) 26.07.2017  
Helicity density,  $\text{m/s}^2$





## Спиральность в субмезомасштабных структурах АПС (содар высокого разрешения)



Изменение эффективных вязкости и диффузии

$$\nu_T \approx \frac{2}{15} E \cdot \tau - \frac{1}{18} H^2 \cdot \tau^3,$$

$$D_T \approx \frac{2}{15} E \cdot \tau + \frac{1}{18} H^2 \cdot \tau^3,$$

Белян и др. 1992, 1994 Belian et al. , 1998 Долгинов 1989, Chkhetiani, Hnatch et al. 1998

Структура тензора рейнольдсовых напряжений

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \langle v_i v_j \rangle = \alpha \text{rot}_i \langle \mathbf{V} \rangle$$

Структура тензора рейнольдсовых напряжений при наличии, сжимаемости, многофазной и пузырьковой среды.

Необходима **анизотропия** или **неоднородность** – градиенты температуры, плотности и заряда, развитые крупномасштабные течения: Моисеев, Тур, Яновский, Руткевич, Гварамадзе, Чхетиани, Петросян, Белян, Хоменко, Трофимов, Березин, Frish, Yosizawa, Yokoi, Rudiger, Kichatinov, Курганский, Хапаев.

**Самосогласованный подход:** Руткевич 1998 (конвекция), Курганский 1998 (влажная атмосфера), Чхетиани 1999, 2001, Пономарев, Чхетиани 2005 – нейтральный и стратифицированный атмосферный пограничный слой



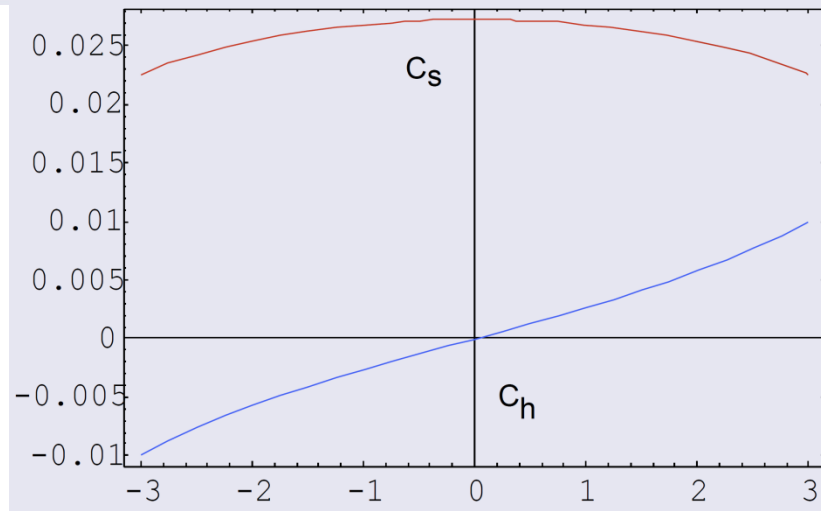
$$\tau_{ij} = -\nu_e \tilde{S}_{ij} - \frac{\partial \nu_h}{\partial x_k} \left( \varepsilon_{kjt} \tilde{S}_{it} + \varepsilon_{kit} \tilde{S}_{tj} \right) - \nu_h \tilde{R}_{ij}$$

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{\partial \tilde{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{v}_j}{\partial x_i}, \tilde{R}_{ij} = \frac{\partial \tilde{\omega}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{\omega}_j}{\partial x_i}$$

$$\nu_e = -2 (c_s \Delta)^2 \left[ \tilde{S}_{mn} \tilde{S}_{mn} \right]^{1/2}; \nu_h = (c'_h \Delta)^3 \left[ \tilde{S}_{mn} \tilde{S}_{mn} \right]^{1/2}$$

$$-\langle \tau_{ij} \tilde{S}_{ij} \rangle = \langle \varepsilon \rangle; \quad -2 \langle \tau_{ij} \tilde{R}_{ij} \rangle = \langle \eta \rangle$$

Li et al. 2006, Chkhetiani, Ponomarev 2003, 2007



## Параметризация спиральности в АПС

$$\overline{v_i v_j} = A \delta_{ij} + B \left( \frac{\partial \overline{V}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{V}_j}{\partial x_i} \right) + C \left( \lambda_i \overline{W}_j + \lambda_j \overline{W}_i \right), \quad \overline{W}_i = \varepsilon_{ilm} \frac{\partial \overline{V}_i}{\partial x_l}, \quad \lambda = (0, 0, 1)$$

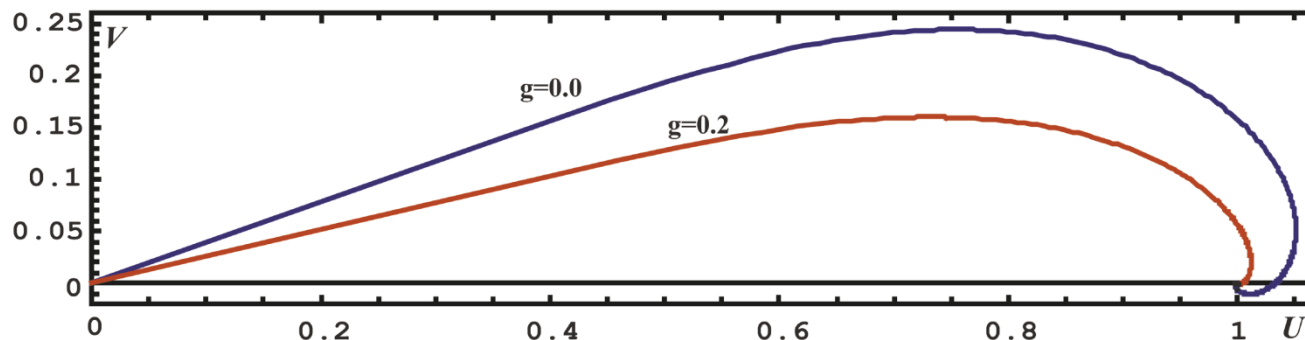
$$\overline{v_x v_z} = -K \frac{\partial U}{\partial z} + K_h \frac{\partial V}{\partial z}, \quad \overline{v_y v_z} = -K \frac{\partial V}{\partial z} - K_h \frac{\partial U}{\partial z}$$

$$g = K_h / K \approx \frac{\overline{v_y v_z}}{\overline{v_x v_z}} \sim 0.1 \div 0.3.$$

## Модифицированное течение Экмана

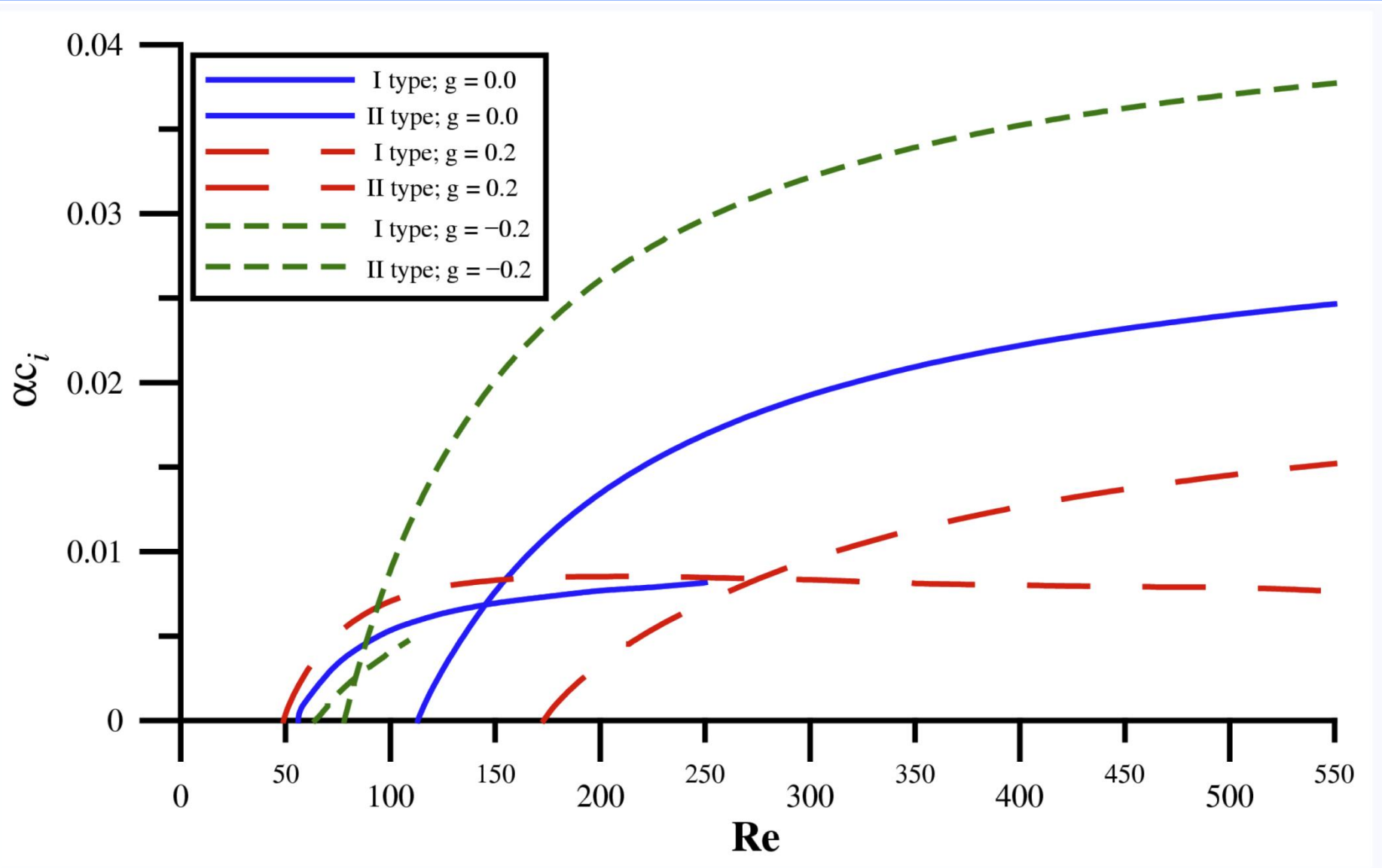
$$U = U_G \left( 1 - \exp\left(-\delta_1 \frac{z}{h}\right) \cos\left(\delta_2 \frac{z}{h}\right) \right) + V_G \exp\left(-\delta_1 \frac{z}{h}\right) \sin\left(\delta_2 \frac{z}{h}\right),$$

$$V = V_G \left( 1 - \exp\left(-\delta_1 \frac{z}{h}\right) \cos\left(\delta_2 \frac{z}{h}\right) \right) - U_G \exp\left(-\delta_1 \frac{z}{h}\right) \sin\left(\delta_2 \frac{z}{h}\right).$$

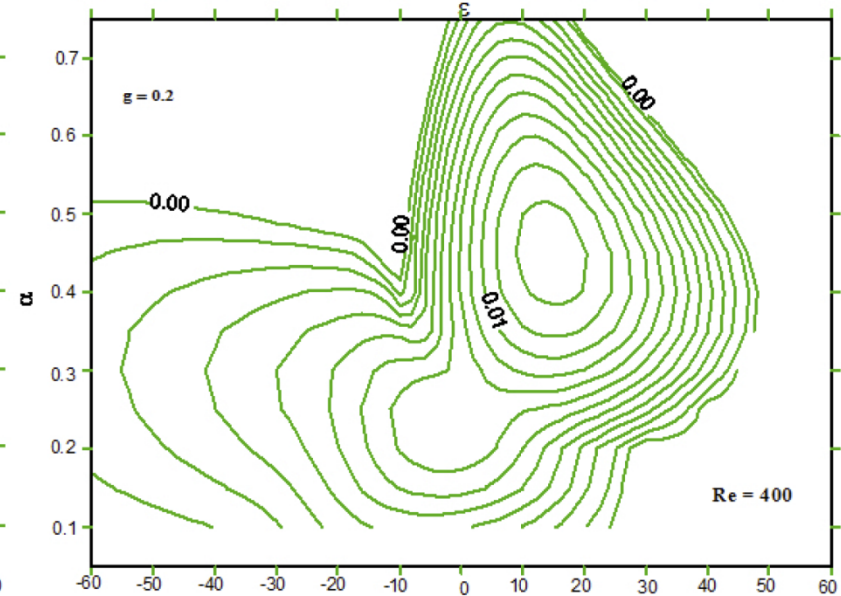
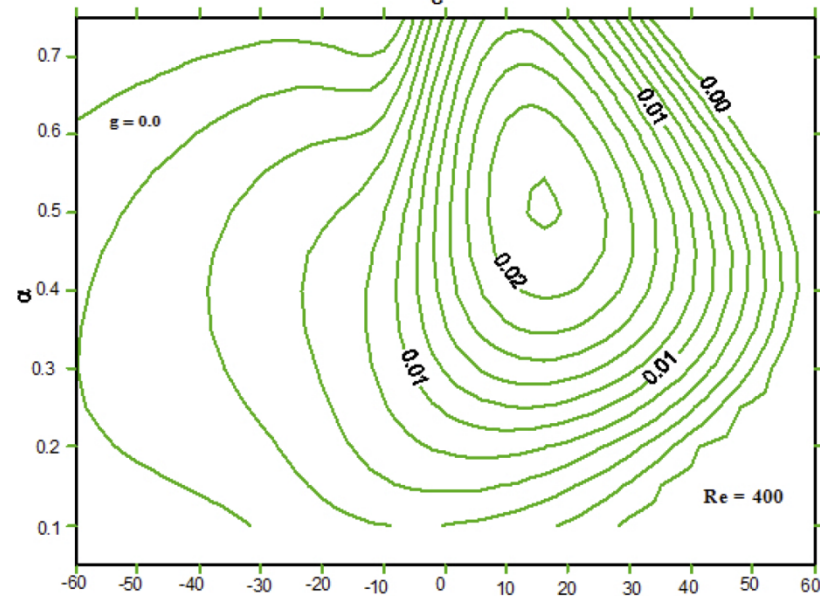
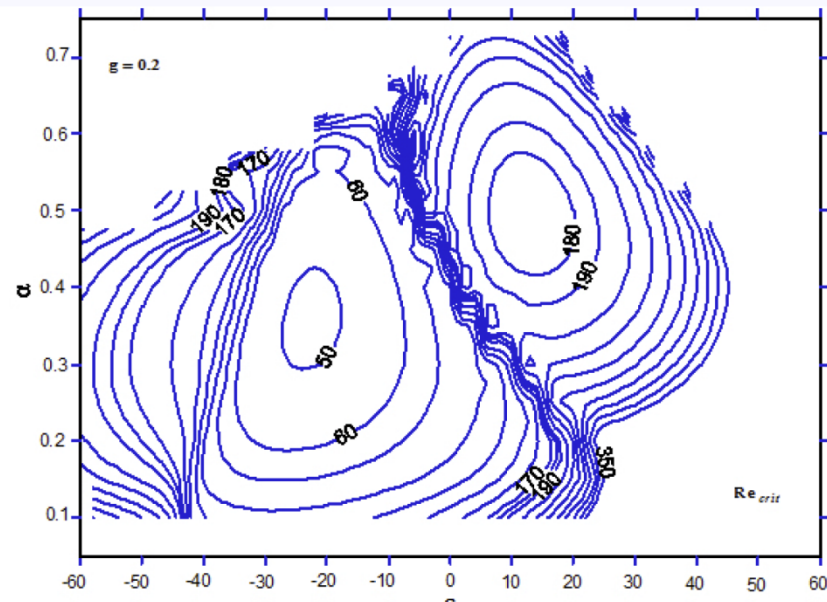
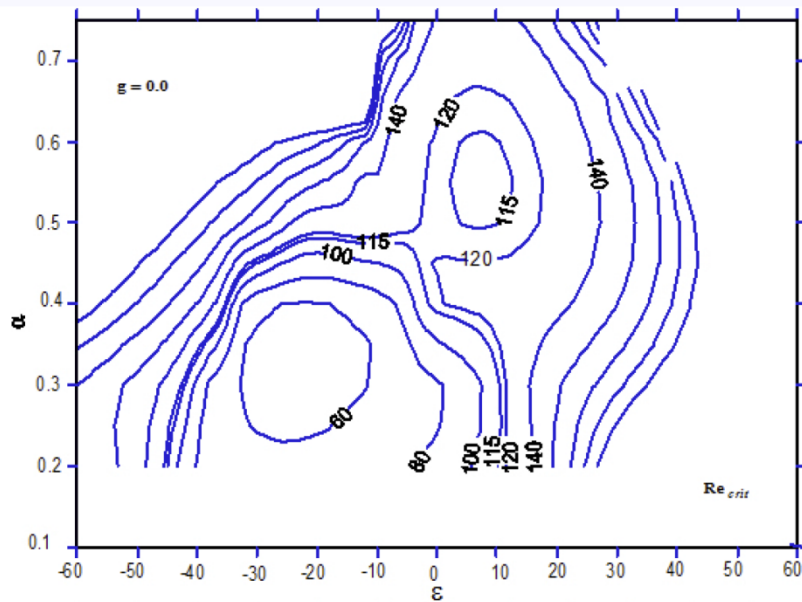


$$\delta_1 \approx 1 + \frac{g}{2}, \quad \delta_2 \approx 1 - \frac{g}{2},$$

$$\alpha = -\arctan\left(\frac{2-g}{2+g}\right)$$



**Инкременты неустойчивости экмановского слоя**

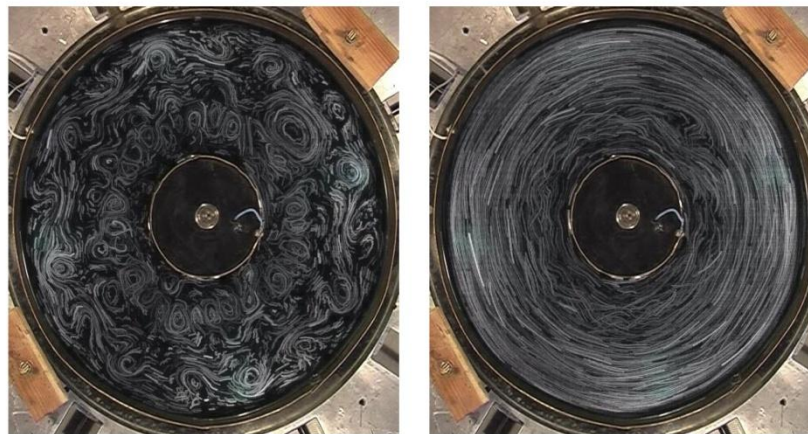
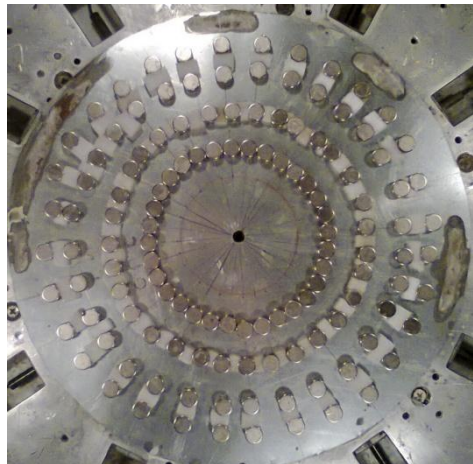
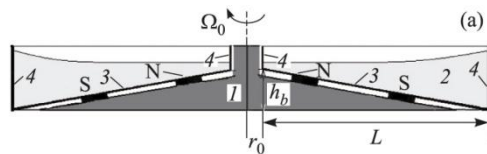


Критические числа Рейнольдса и инкременты для  $g=0,0.2$



## Обратный каскад энергии

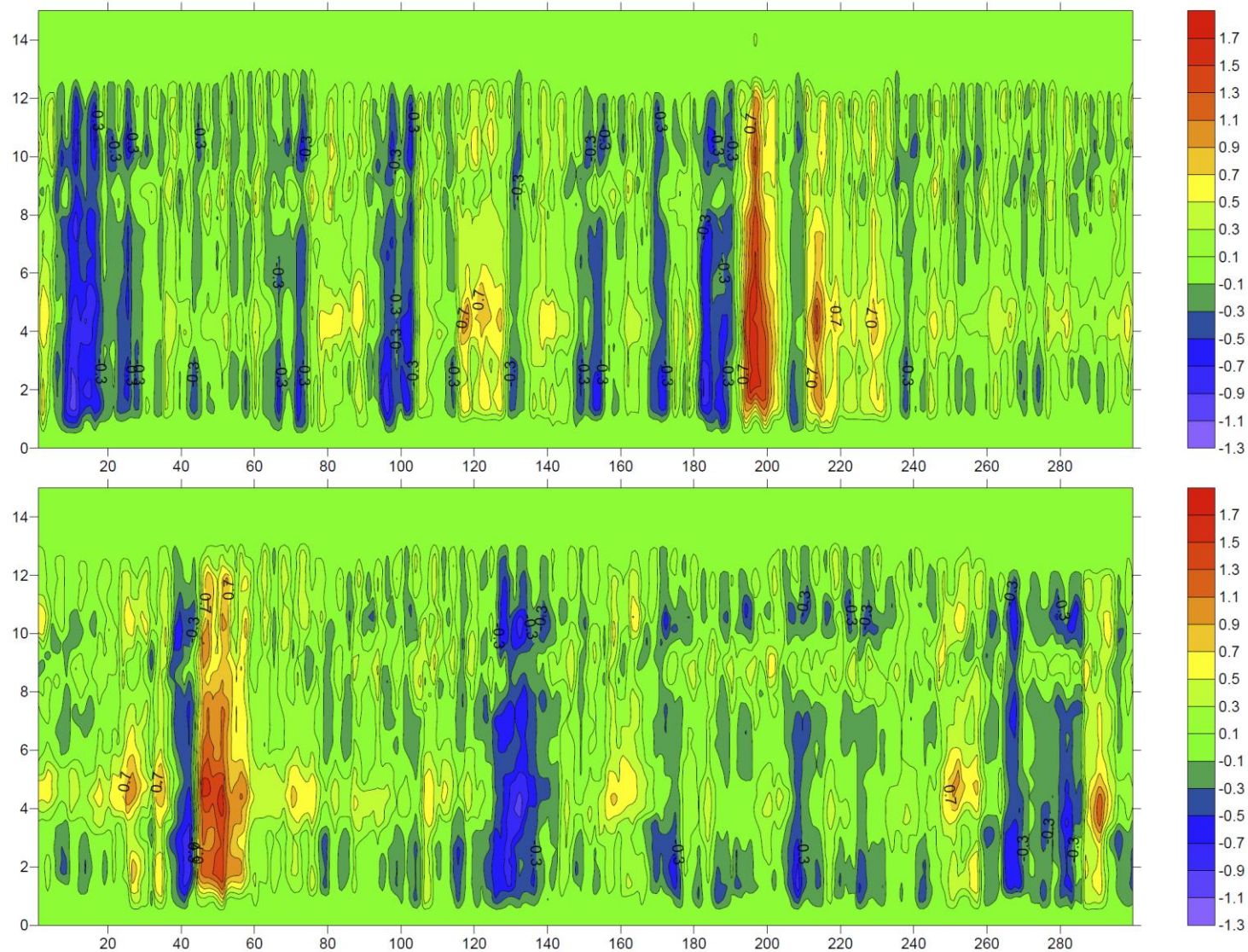
Возникает в системах со спиральностью (Chkhetiani et al. 1993, Гледзер, Чхетиани, (2015), Chkhetiani, Gledzer (2017)), в квазидвумерных системах при наличии вращения (Гледзер и др. (2011), (2013), (2017), (2018), Чхетиани и др. (2018)) — лабораторные гидродинамические эксперименты.



Возникновение вихревых кластеров, струйных течений.  
Режимы суб и супер-ротации.  
Блокинговые режимы.

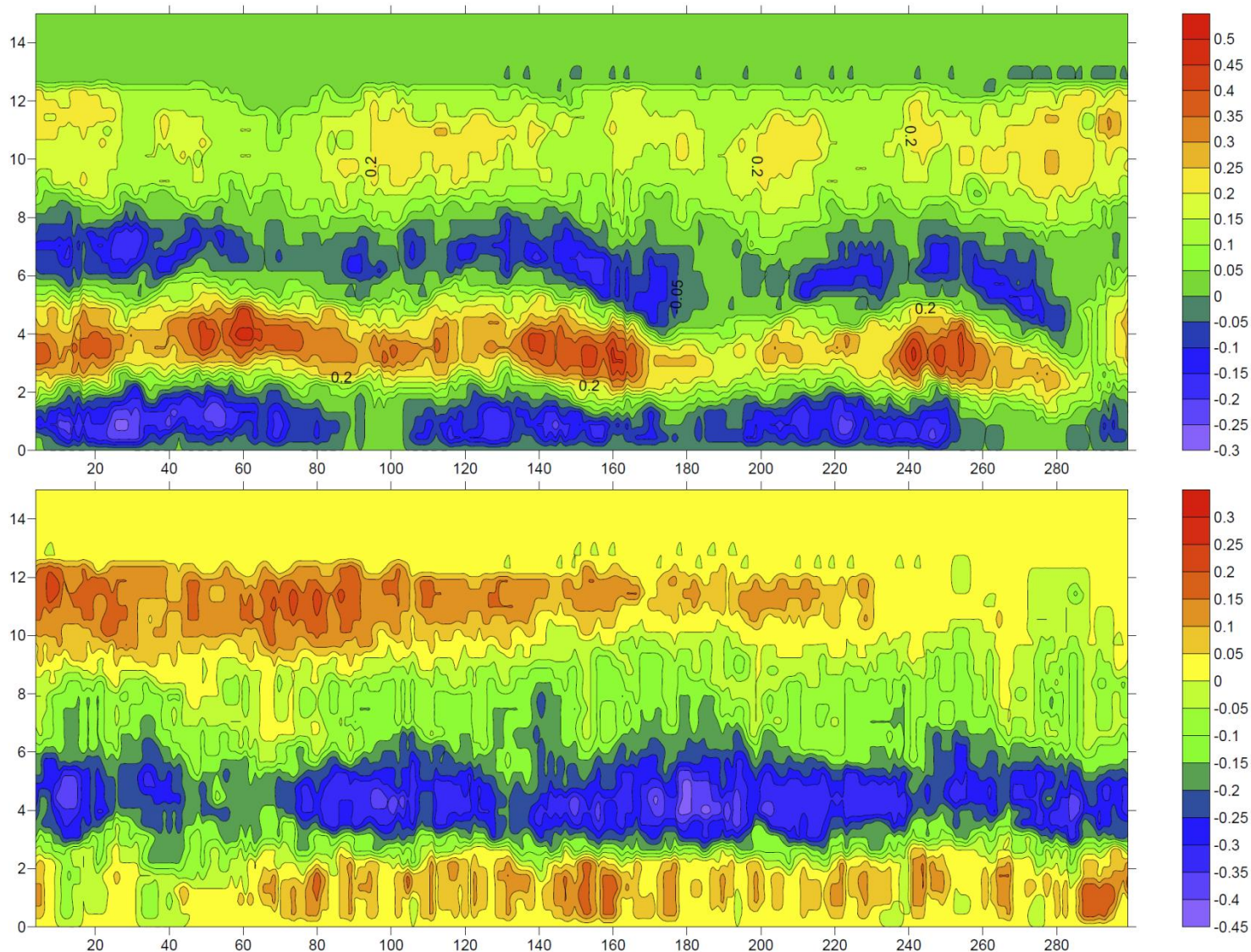


## Обратный каскад энергии – режимы суб- и суперротации





## Обратный каскад энергии – струйные течения



## Оценки спиральности

### Экмановское течение

$$U = U_G \left(1 - \exp(-z/h) \cos(z/h)\right) - V_G \exp(-z/h) \sin(z/h),$$

$$V = V_G \left(1 - \exp(-z/h) \cos(z/h)\right) + U_G \exp(-z/h) \sin(z/h),$$

$$h = \sqrt{\nu / \Omega} \quad U_G, V_G \quad - \text{компоненты скорости геострофического ветра}$$

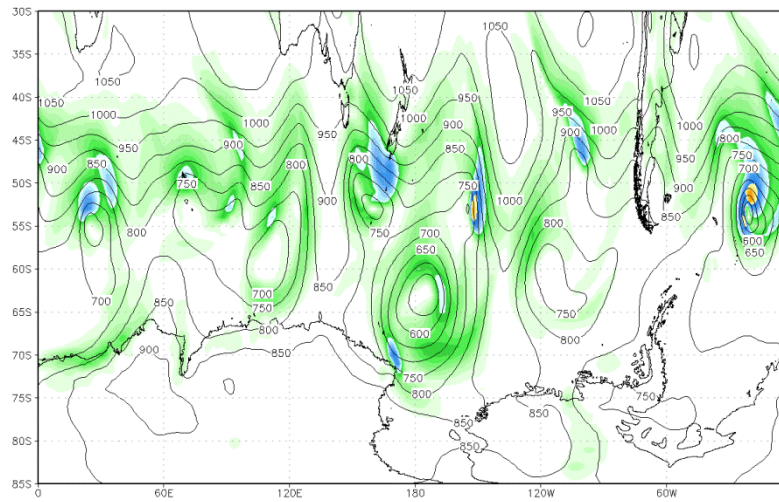
$$H = -U \frac{\partial V}{\partial z} + V \frac{\partial U}{\partial z}$$

Интегральная спиральность (Курганский, 1989)

$$H_{\text{int}} = \int_0^{\infty} H dz = \frac{1}{2} (U_G^2 + V_G^2)$$

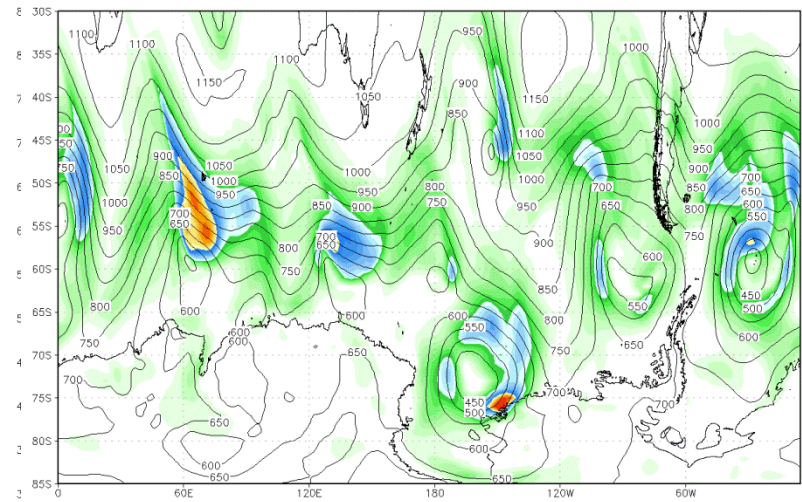


01.01.10 00 UTC (U\*\*2+V\*\*2)/2HGT and HGT at 900 mb



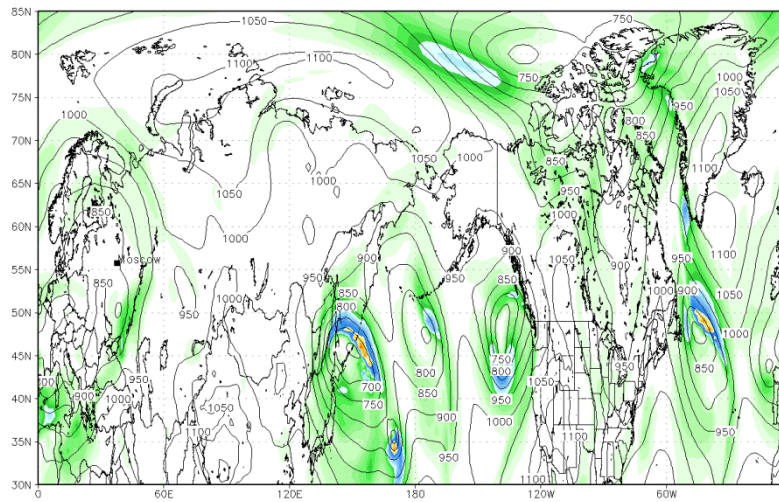
GRADS: COLA/IGES 2014-03-05-12:42  
GRADS: COLA/IGES 2014-03-05-12:14

01.07.10 00 UTC (U\*\*2+V\*\*2)/2HGT and HGT at 900 mb



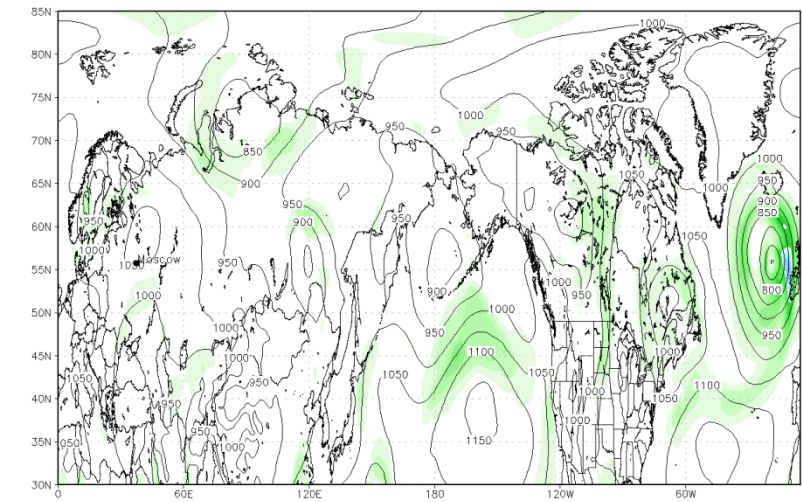
GRADS: COLA/IGES 2014-03-05-12:51  
GRADS: COLA/IGES 2014-03-05-12:22

01.07.10 00 UTC (U\*\*2+V\*\*2)/2HGT and HGT at 900 mb  
01.01.10 00 UTC (U\*\*2+V\*\*2)/2HGT and HGT at 900 mb



GRADS: COLA/IGES 2014-03-05-12:14

01.07.10 00 UTC (U\*\*2+V\*\*2)/2HGT and HGT at 900 mb



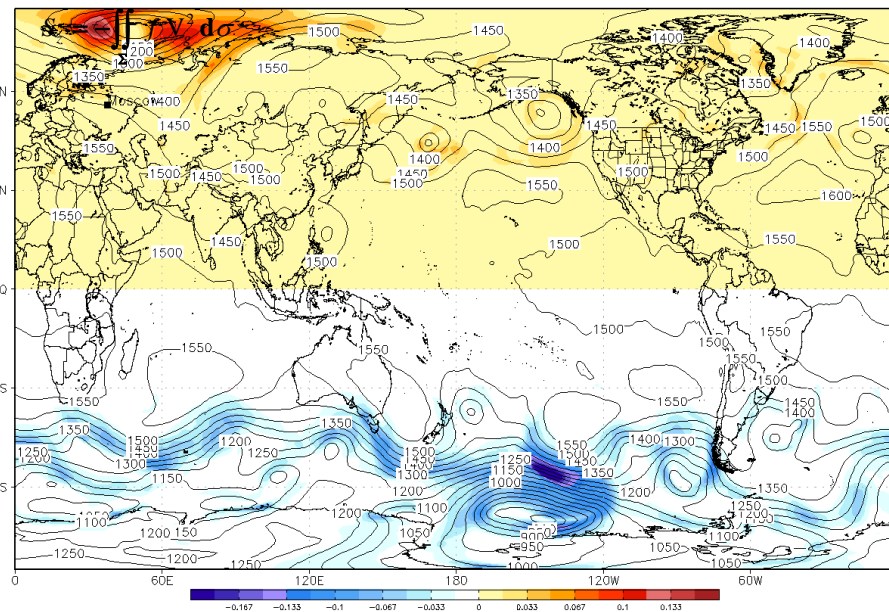
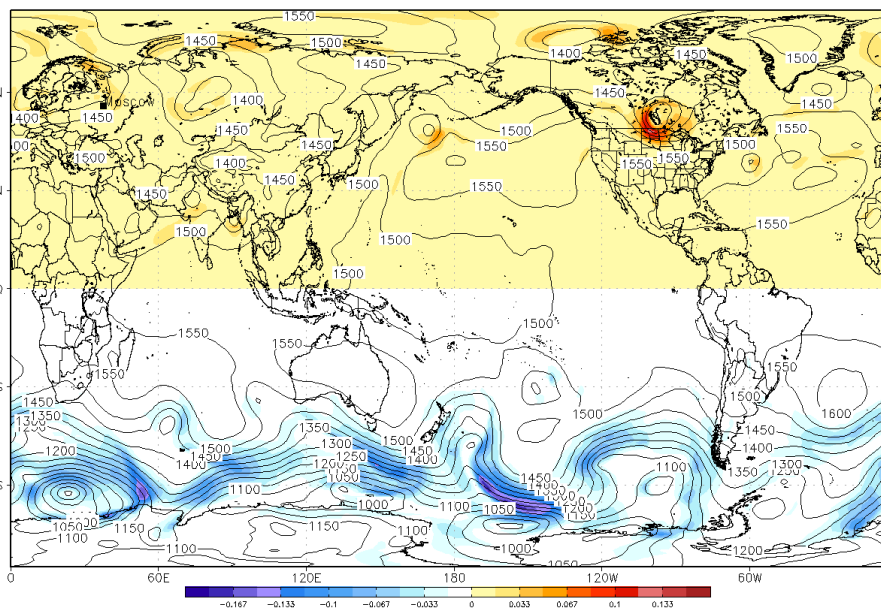
GRADS: COLA/IGES 2014-03-05-12:22  
GRADS: COLA/IGES 2014-03-05-12:51

# Вертикальный поток спиральности как индекс межгодовой изменчивости атмосферы (Курганский и др. (2018), Kurgansky et al.(2020))

$$S_z = -\iint_{\Sigma} f \mathbf{V}_g^2 d\sigma \quad | \quad h = -u \frac{\partial v}{\partial z} + v \frac{\partial u}{\partial z} \approx -\frac{g}{f} \left( u \frac{\partial}{\partial x} \ln T + v \frac{\partial}{\partial y} \ln T \right)$$

29.07.15 06 UTC f\*(U\*\*2+V\*\*2) and HGT at 850 mb

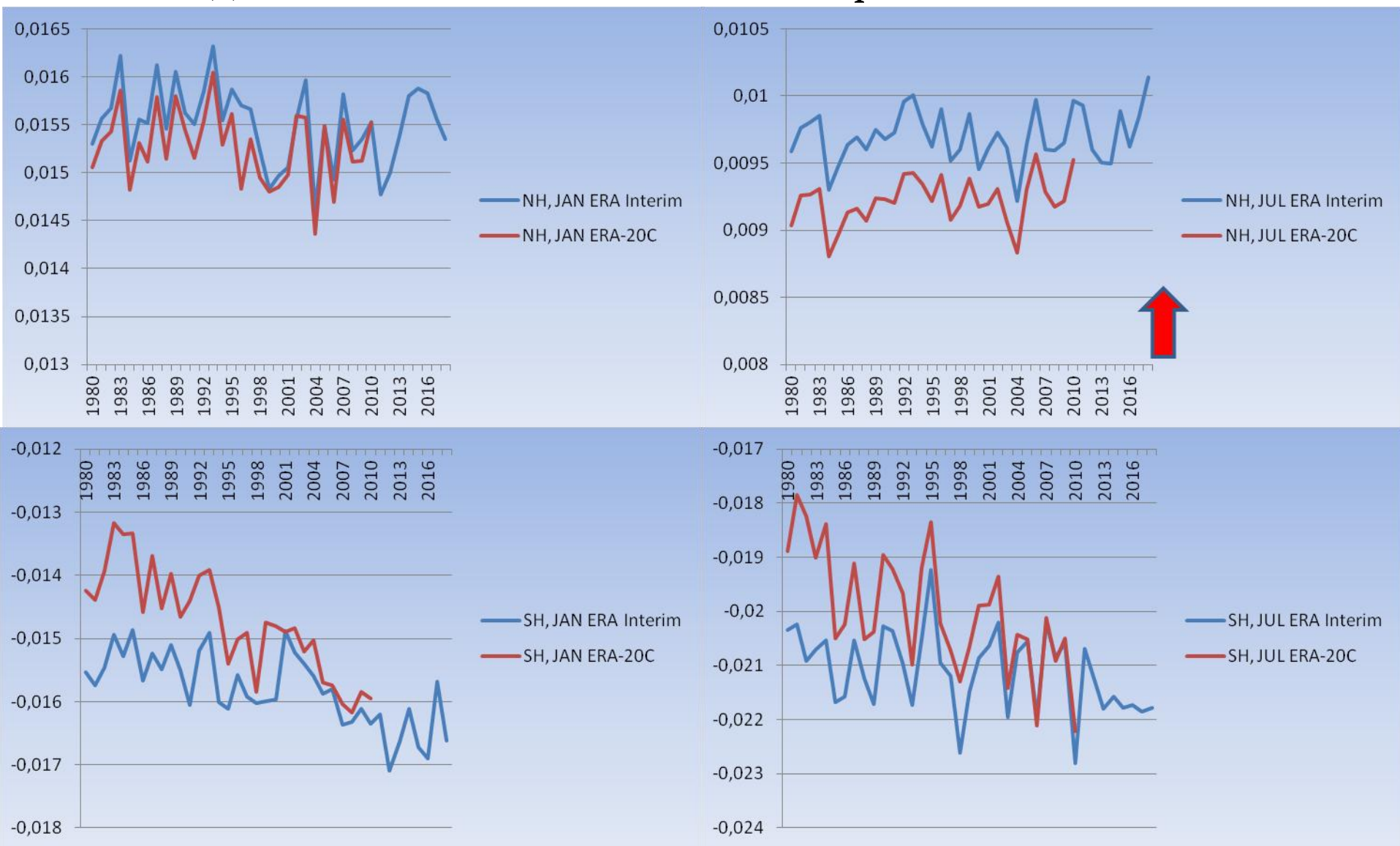
07.06.18 12 UTC f\*(U\*\*2+V\*\*2) and HGT at 850 mb



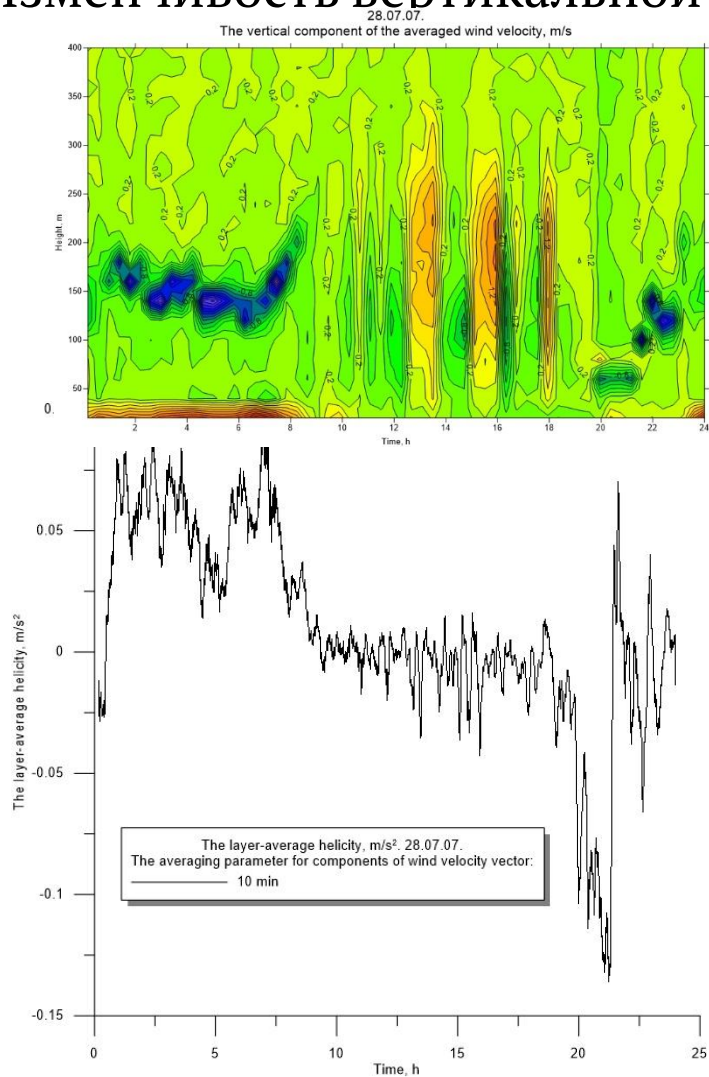
Поток спиральности (в м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>) через поверхность 850 гПа; июль 2015 г., июнь 2018.



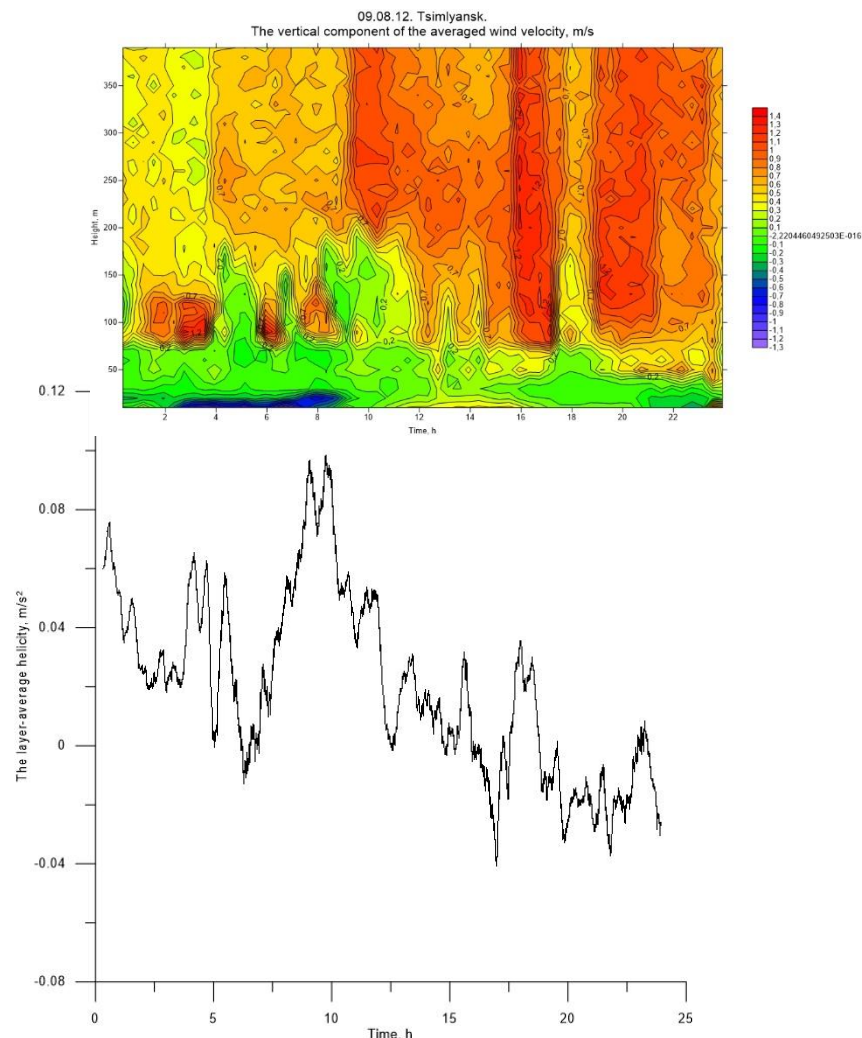
## Межгодовая изменчивость потока спиральности



# Изменчивость вертикальной скорости и средней спиральности

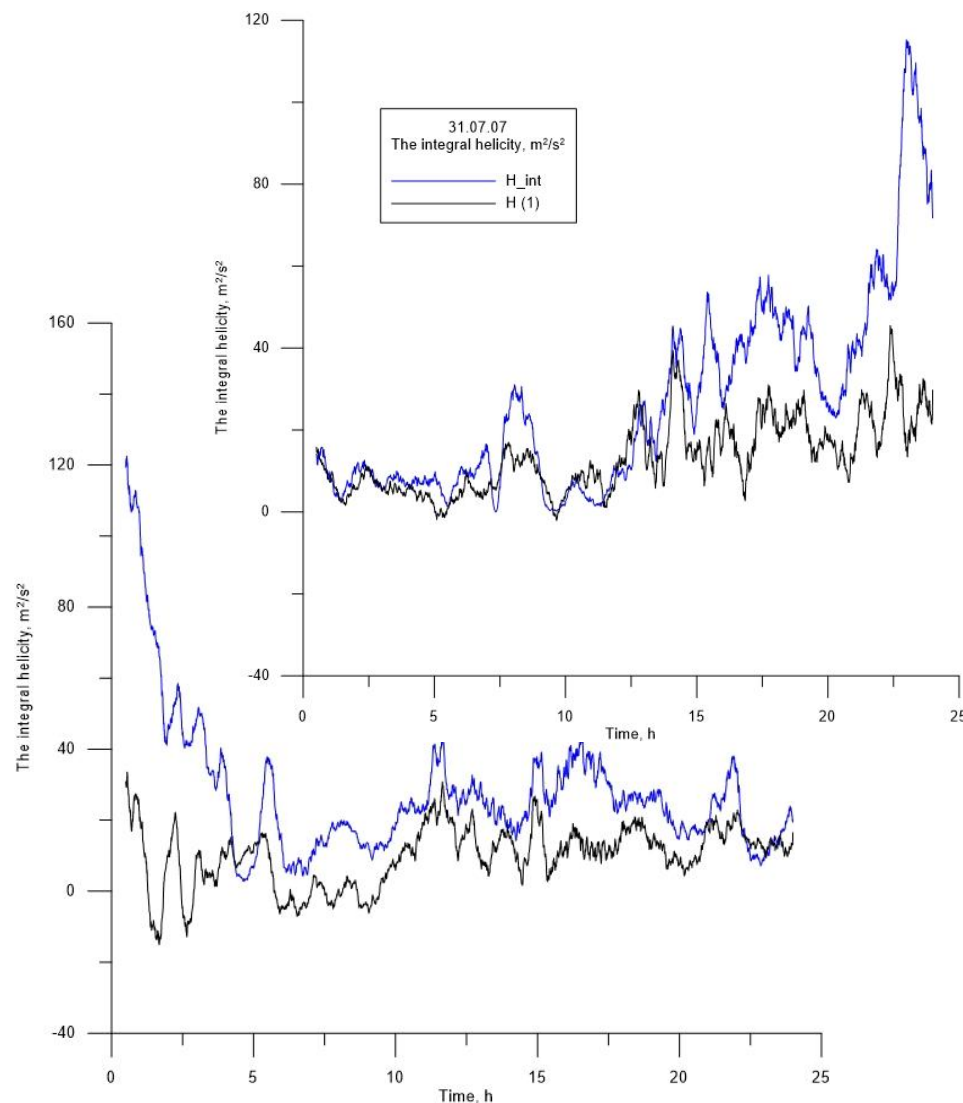
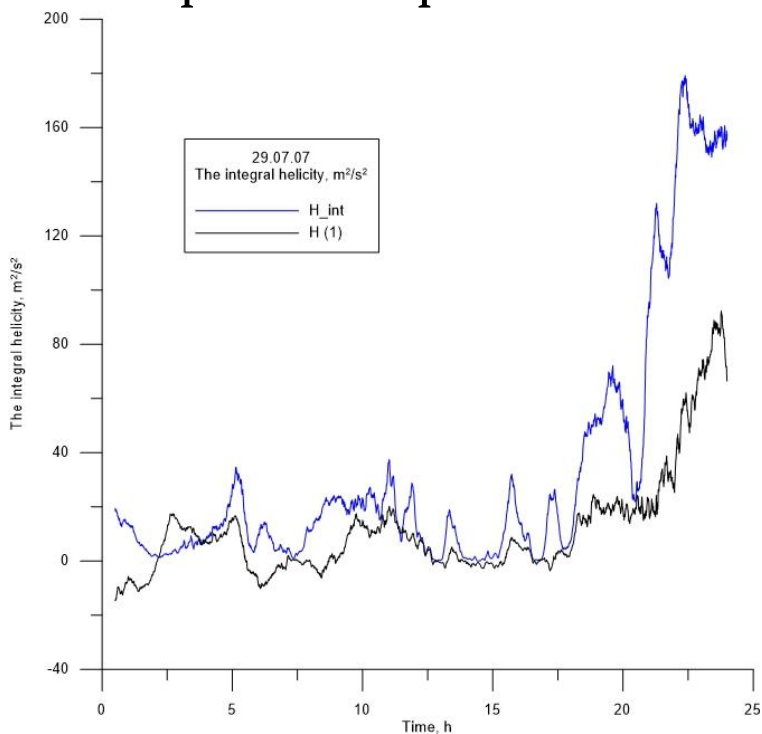


**Kalmykia, 28.07.07**



**Tsimlyansk, 09.08.12**

## Корреляция между интегральной спиральностью и квадратом скорости ветра





## «Спиральные» критерии циклонической активности

Некоторые параметры, используемые для оценок вихревой интенсивности  
SREH – Storm Relative Environmental Helicity или SRH

$$\text{SREH} = \int_0^h \left[ (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \left( \mathbf{k} \times \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z} \right) \right] dz, \quad (\text{Onderlinde, Nolan 1990})$$

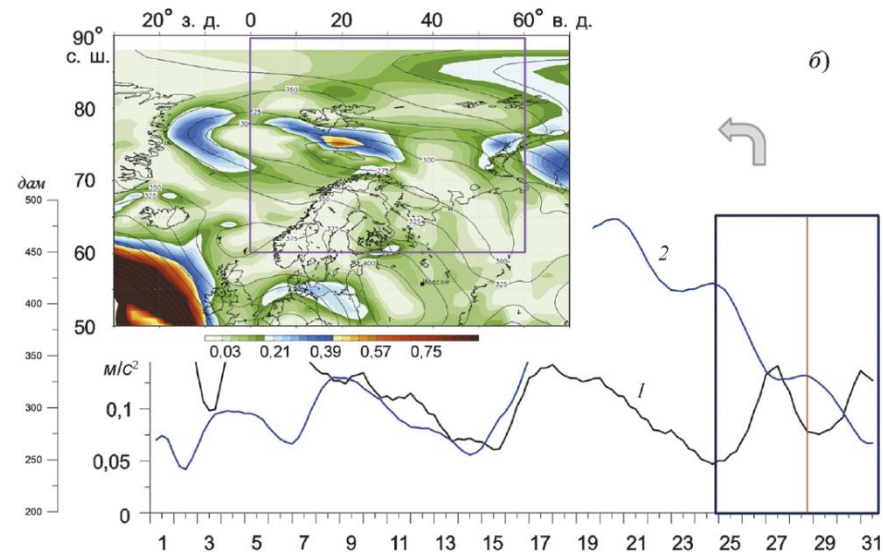
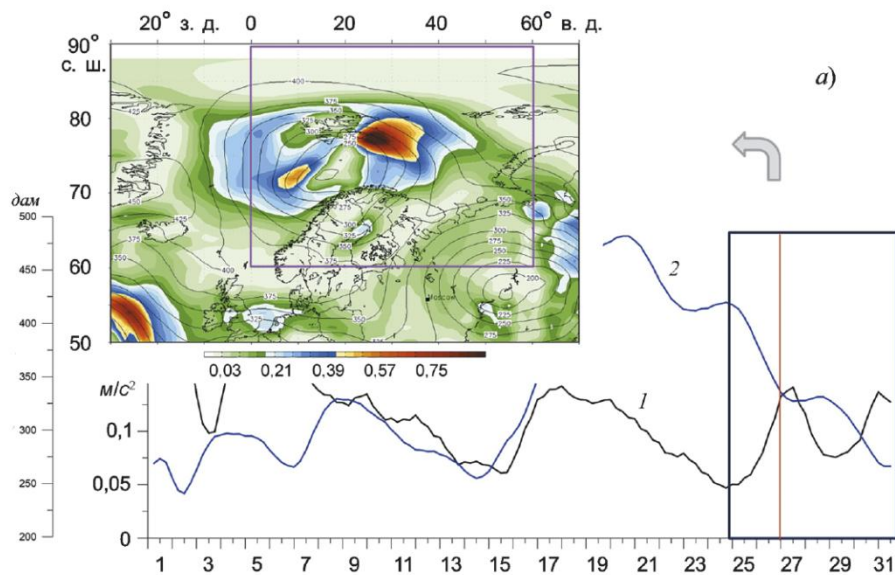
Относительная спиральность

$$H = -\left(u - u_{mean}\right) \frac{\partial u}{\partial z} + \left(v - v_{mean}\right) \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (\text{Davies-Jones, 1990})$$

Индекс спиральности  
для осесимметричных вихрей

$$S = \frac{8\pi}{3} \int_0^{\infty} V_{\tan}^3 dr \quad (\text{Kurgansky, 2008})$$

## О критериях идентификации полярных мезоциклонов (Vazaeva, Chkhetiani, Kurgansky (2020), Вазаева, Чхетиани, Дурнева (2022))



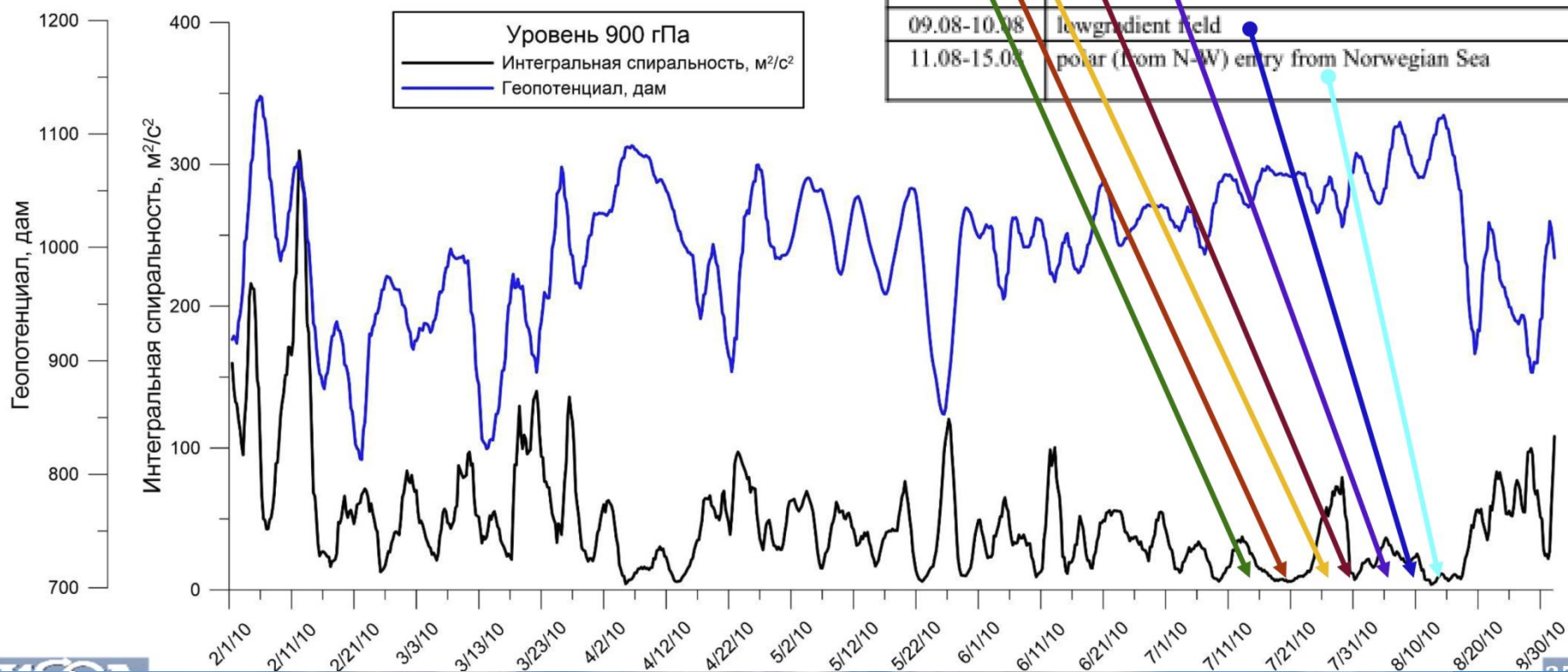
Спиральность (1) возрастает за сутки до возникновения ПМЦ 27-28.03.2013.

Есть схожие зависимости для блокирующих антициклонов.

## Диагностический смысл интегральной спиральности на примере блокирующего антициклона 2010 года по данным ECMWF. Уровень 900 гПа

Эпизоды  
регенерации

01.02.10 – 1.09.10

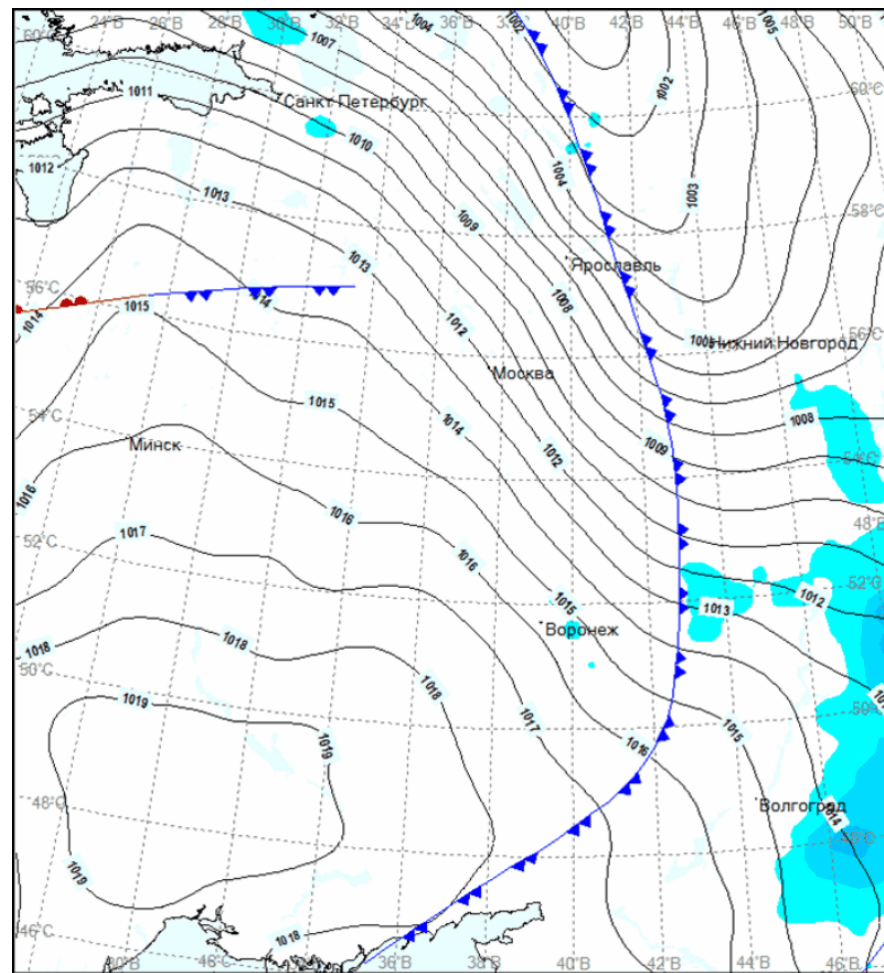




## Интегральная спиральность – 19-20.06.2024, г. Москва (Юсупов, 2024)

**Конвективный шторм** с сильными осадками, разрушительными шквалами и смерчами, приведшее к гибели 2 человек и многочисленным разрушениям как в столице, так и в её окрестностях.

- за сутки - 40 мм осадков,
- порывы ветра - 25 м/с.
- падение температуры - 11,5°C за 3 часа
- падение давления - на 12,9 гПа.
- скорость фронта 50 – 60 км/ч.
- сдвиг ветра в слое 0 – 6 км - 25 м/с.



# Спиральность в верхней атмосфере Chkhetiani, Shalimov 2009,2022

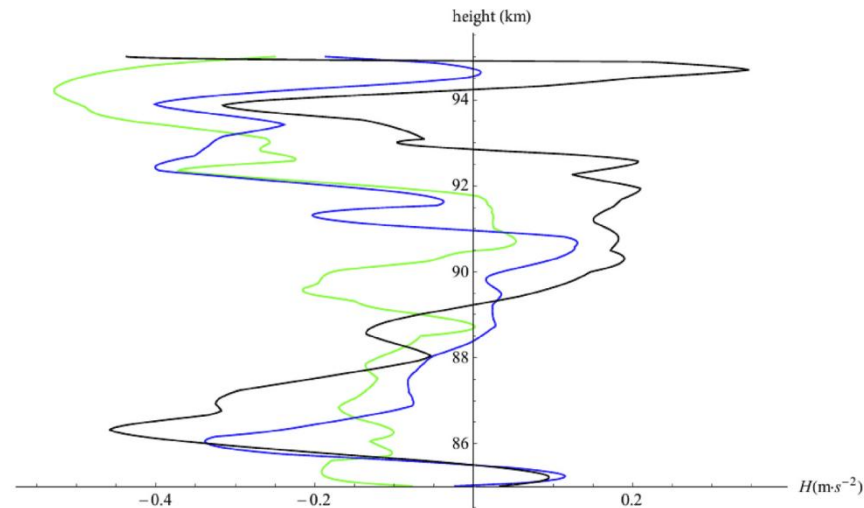
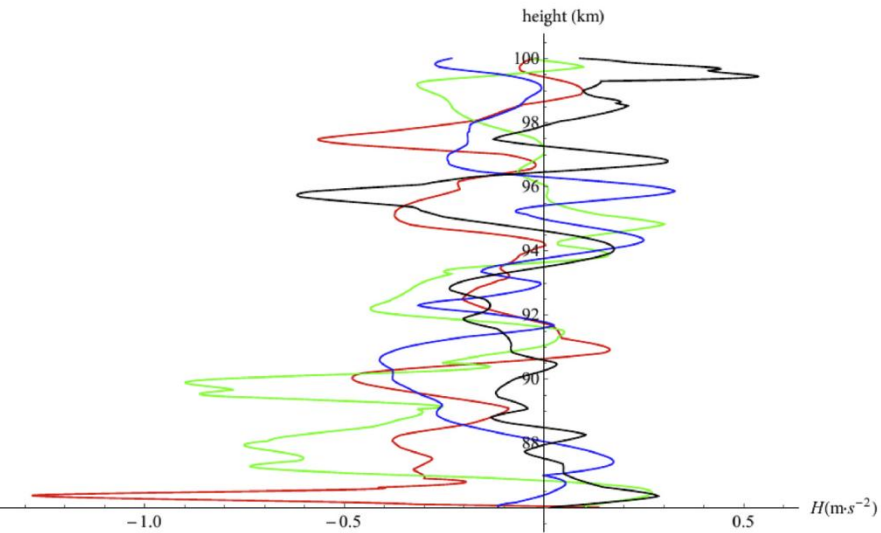
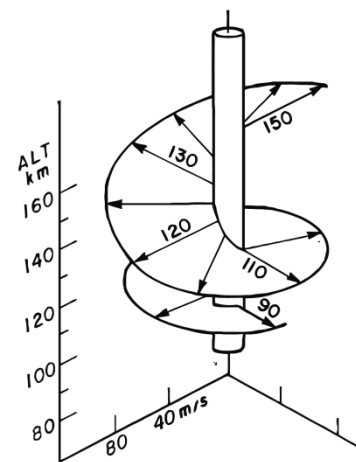


Figure 5.25b Distortion of a long-lived meteor trail due to mesospheric winds. The size of the photo is about 1.5 km. Note that the trail exhibits both laminar and turbulent behavior. Since altitude increases clockwise in this spiral trail, we see that the upper portion of the trail (above 95 km) is turbulent and the lower part is laminar. [After Kelley et al. (2000). Reproduced with permission of the American Geophysical Union.]



Figure 6.1 A TMA trail deployed from Wallops Island, Virginia on June 11, 1978, at 0634 UT. The trail was photographed from the NASA C54 airplane. (Courtesy of L.S. Mikkelsen.)



Метеорные следы в E-слое

- Спиральность – естественная составляющая атмосферных вихревых процессов разных масштабов
- Впервые проведены измерения спиральности в атмосферной турбулентности.
- Получены точные соотношения для турбулентности со спиральностью – аналог закона "4/5" Колмогорова
- Исследованы потоки и генезис спиральности в атмосферном пограничном слое и сдвиговых течениях, разработаны алгоритмы ее оценки и методы учета в атмосферных моделях
- Вертикальный поток спиральности, как эффективный индекс циркуляции атмосферы
- Индикаторы кризисных явлений, основанные на интегральной или площадной спиральности
- Ускорение ветров в верхней атмосфере



- Моисеев С.С., Чхетиани О.Г. **Спиральный скейлинг в турбулентности**. *ЖЭТФ* Т.109 (6). 357-370. 1996
- Чхетиани О.Г. **О третьих моментах в спиральной турбулентности** // *Письма в ЖЭТФ*. 1996. Т.63 (10). С. 768-772.
- Копров Б.М., Копров В.М., Пономарев В.М., Чхетиани О.Г. **Измерение турбулентной спиральности и ее спектра в пограничном слое атмосферы** // 2005. Доклады РАН. Т.403 (5). С.627-630.
- Chkhetiani O.G., Kurgansky M.V., Vazaeva N.V. **Turbulent Helicity in the Atmospheric Boundary Layer** // *Boundary-Layer Meteorology*. 2018. V. 168 Iss. 3 P. 361-385.
- Курганский М.В., Максименков Л.О., Хапаев А.А., Чхетиани О.Г. **Вертикальный поток спиральности как индекс общей циркуляции атмосферы** // Доклады РАН. 2018. Т. 479 № 4. С. 447-451.
- Vazaeva. N.V. Chkhetiani. O.G. and Kurgansky. M.V. November. **On integral characteristics of Polar Lows**. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* V. 606. No. 1. P. 012065. 2020
- Kurgansky. M.V. Maksimenkov. L.O. and Chkhetiani. O.G. **Vertical helicity flux as an index of interannual atmospheric variability**. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* V. 606. No. 1. P. 012028. 2020
- Вазаева Н.В. Чхетиани О.Г. Курганский М.В. Каллистратова М.А. **Спиральность и турбулентность в атмосферном пограничном слое** *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2021. Т. 57. № 1. С. 34-52.
- Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Дурнева Е.А. **О критериях идентификации полярных мезоциклонов** // *Метеорология и гидрология*. 2022. №4. С. 20-33
- Chkhetiani O.G., Shalimov S.L. **On anomalous wind amplitudes in the lower ionosphere** *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* V. 240 (2022) 105960
- Соленая О.А., Шишов Е.А., Чхетиани О.Г., Азизян Г.В., Копров В.М. **О турбулентной спиральности в приземном слое атмосферы**. *Изв. РАН*. 2023, Т. 59, № 6, С. 675–685
- Wang Y., Chkhetiani O. **Four-thirds law of energy and magnetic helicity in electron and Hall magnetohydrodynamic fluids**. *Physica D*. V. 454. P. 133835. 2023.
- Chkhetiani O., Kurgansky M. **Kinetic Helicity in the Earth's atmosphere** in “*Helicities in Geophysics, Astrophysics, and Beyond*” AGU Monograph series. Wiley. 2024. P. 149-166.

**Спасибо за внимание!**