Спектральные характеристики мезомасштабной турбулентности в устойчиво-стратифицированной атмосфере, полученные по данным самолетных измерений и инфразвукового зондирования атмосферы.

[1]Чунчузов И.П., [1]Попов О.Е., [1]Чхетиани О.Г., [1]Куличков С.Н.,
[2]Белан Б.Д., [2]Фофонов А.В., [2]Ивлев Г.А., [2]Козлов А.В.

[1] *Институт Физики Атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва*
[2]*Институт Оптики Атмосферы им. В.Е. Зуева РАН, Томск*
E-mail: igor.chunchuzov@gmail.com

V Всероссийская конференция с международным участием Турбулентность, динамика атмосферы и климата посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова 19–21 ноября 2024 г. Москва

Содержание

- Самолетные измерения мезомасштабных флуктуаций скорости ветра, температуры и концентраций газовых составляющих в устойчиво-стратифицированной тропосфере.
- Модель формирования 3-х мерного спектра флуктуаций
- Горизонтальные спектры в диапазоне масштабов 400 м-200 км
- Наклонные спектры флуктуаций в тропосфере
- Сравнение с вертикальными спектрами флуктуаций скорости ветра в стратосфере, восстановленными по данным инфразвукового зондирования атмосферы.

Самолетные исследования флуктуаций метеопараметров, примесей и их спектров

1. Bacmeister J. T., S. D. Eckermann et al. (1996). *J. Geophys. Res*., *D101*, 9441–9470.
2. Berkes F. et al. (2017). *Atmospheric Chemistry and Physics.* V. *17, 20*.
3. Bacmeister J. T., S. D. Eckermann et al. (1996). J. Geophys. Res., D101, 9441–9470.
4. Винниченко Н. К, Н. З. Пинус, С. М. Шметер, Г. Н. Шур. Турбулентность в свободной атмосфере. Гидрометеоиздат, 1976 г
5. Callies J., R. Ferrari, and O. Bühler (2014). Proc. Natl. Acad. Sci. U S A. V. 111(48).
6. Cho J.Y.N., Zhu, Y., Newell R.E., et al. (1999). J. Geophys.Res. 104, 5697–5716.
7. Chunchuzov I., O. Chkhetiani, S. Kulichkov, O. Popov, B. Belan, A. Fofonov, G. Ivlev, A. Kozlov. (2023).. J. Atm. Sci., 81, 105-124.
8. Гурвич А. С. и В.П. Кухарец. (2008).Изв. РАН Физика атмосферы и океана Т. 44(6).
9. Imazio P. R., P. D. Mininni, A. et al. (2023). J. Geophys. Res. Atmospheres, https://doi.org/10.1029/2022JD037491.
10. Knobloch S., Kaifler B., Dornbrack A., & Rapp M. (2023). Geophys. Research Letters, V.50.
11. Lilly D. K. and P. F. Lester (1974). J. Atmos. Sci., V.31, 800-812.
12. Lindborg E. (2015).. J. Fluid Mech., 762, R4, doi:10.1017/jfm.2014.685.
13. Lumley J. L. (1964. J. Atm. Sci., 21, 99-102.
14. Lumley J. L., and H. A. Panofsky (1964). The structure of atmospheric turbulence. John Wiley & Sons Inc., 244 pp.
15. Myrup L.O. (1969). Tellus, V.21(3), 341-353.
16. Nastrom G. D. and K. S. Gage. (1985). J. Atmos. Sci., V. 42, 950–960.
17. Andreas Petzold, Valerie Thouret et al. (2015). Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 67, 1, 28452, DOI: 10.3402/tellusb.v67.28452.
18. Schumann U. (2019). J. Atmos. Sci., 76, 3847-3862,
19. Skamarock W. C., S. H. Park, J. B. Klemp, and C. Snyder (2014). J. Atm. Sci., 71.
20. Stephens B. B., Morgan E. J. et al. (2021), Atmos. Meas. Tech., 14, 2543–2574

3-х мерный спектр флуктуаций температуры

[*Chunchuzov I., 2002: J. Atm. Sci.,V. 59, 1753-1777; Chunchuzov I.,2018: J. Atm. Sci., V.75 (10). 3447–3467*]

$$\Phi_T\left(k_\perp, k_z\right) = \frac{T_0^2 N^4}{g^2} S_{3E}(k_\perp, k_z), (k_z{*} < k_z < k_w)$$

T_0 -средняя температура

$$S_{3E}(k_\perp, k_z) = \frac{A_0}{|k_z|^5} \exp\left(-\frac{k_\perp^2}{4e_0 k_z^2}\right), \quad k_\perp^2 = k_x^2 + k_y^2, \quad e_0 << 1$$

$$A_0 = \beta_0 / (8\pi e_0) \qquad \beta = 0.2$$

$e_0 =< (\nabla_\perp S_v)^2 >= \frac{M^2}{\chi^2} \geq \frac{M^2}{N^2} f^2$ << 1-параметр анизотропии, f- параметр Кориолиса

σ^2 -дисперсия флуктуаций скорости ветра, вызванных ВГВ, N -частота БВ,

$l_v = 2\pi k_z^{*-1}$-внешний вертикальный масштаб, $M \equiv \frac{\sigma}{N l_v}$ -параметр нелинейности,

$k_z{*} = \frac{N}{\sigma\sqrt{2}}$ -характерное вертикальное волновое число,

$\chi^2 = \sigma^2 / \sigma_w^2$ – отношение дисперсий горизонтальных и вертикальных скоростей,

$k_w = k_z{*} \exp(\beta_0^{-1})$ - критическое вертикальное волновое число, на котором возникают процессы обрушения волн из-за сдвиговых и конвективных неустойчивостей

Вертикальные спектры

флуктуаций горизонтальной скорости

$$V(k_z) = \beta_0 N^2 k_z^{-3}, \qquad k_z^* << k_z < k_w$$

относительных флуктуаций температуры

$$F_T(k_z) = \beta_0 N^4 g^{-2} k_z^{-3} \qquad \beta_0 \sim 0.2$$

-в состоянии нелинейного насыщения при M=0.35-0.40

Горизонтальный спектр

флуктуаций горизонтальной скорости

$$\tilde{V}_{E,\perp}(k_x) = 4e_0 \beta_0 N^2 k_x^{-3}, \quad k_x >> k_x^* = 2\sqrt{e_0} k_z^*$$

$$l_x / l_z = 1/\sqrt{4e_0} \sim \chi / M \ >>1$$

-отношение масштабов анизотропных неоднородностей

M = 0.35-0.4 -нелинейное насыщение спектра

Параметры спектров: $N, \quad f, \quad \sigma, \quad \chi = \sigma / \sigma_w$

Измерения (ИОА РАН) на самолете-лаборатории Ту-134 «Оптик» в Арктическом регионе России в сентябре 2020 г. и 2022 г.

Измеряемые газовые составляющие (Table 1), приборы, точности измерений

TABLE 1. Measured gas constituents, instruments/sensors, measurement errors, and time constants.

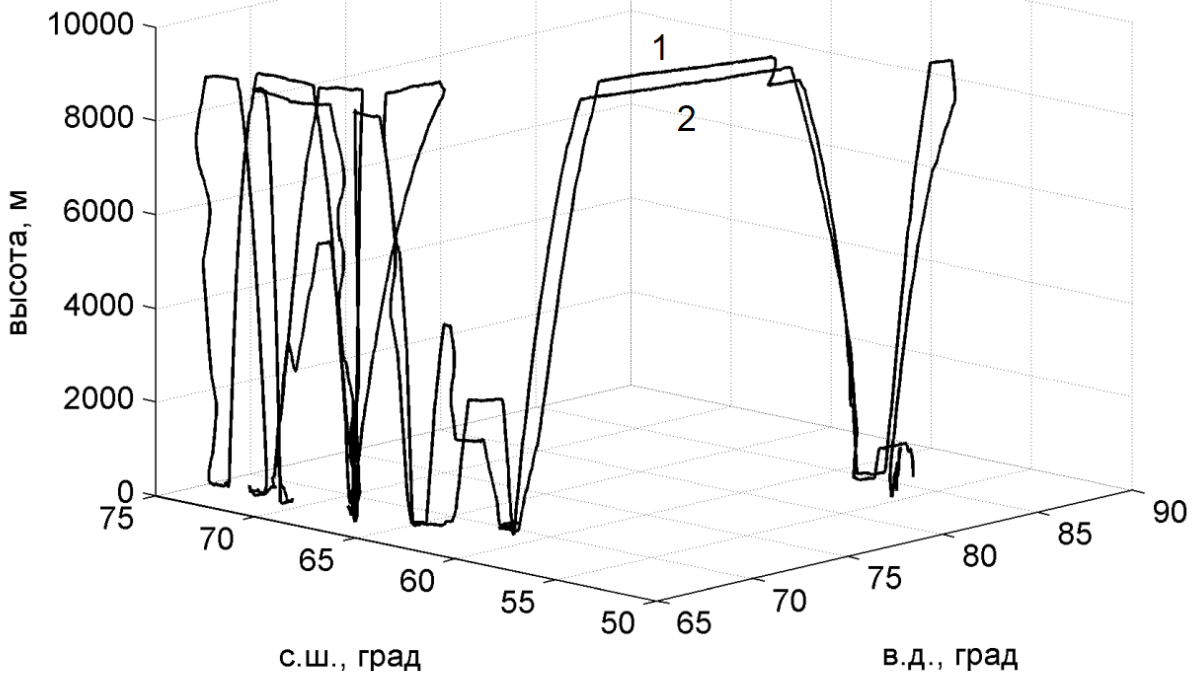
Block	Device	Parameter	Range	Accuracy	Time constant
Gas analysis complex	Analyzer model 42i-TL	NO_x	0 … 1000 ppb	±1%	60 s
		SO_2	0 … 100 ppm	±1%	60 s
	TEI model 49C	O_3, ppm	0 … 200	0.001 ppm	4 s
	TEI model 48C	CO, ppm	0 … 1000	±1%	1 s
	LI-6262	CO_2, ppm	0 … 1000	<0.2 ppm	1 s
	ME 9850B	SO_2, ppm	0 … 20	±1%	<20 s
	Model CLD 780 TR	NO_x, ppm	0 … 0.5	<0.003 ppm	1 s

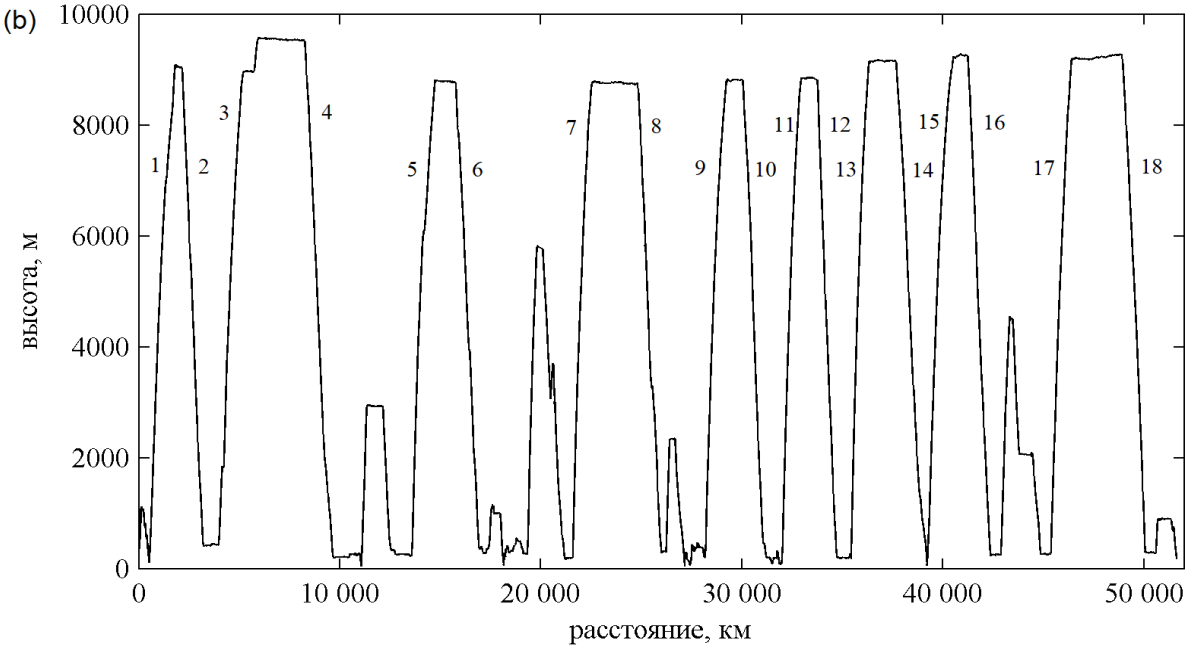
Метеорологические параметры (Table 2)

TABLE 2. Measurements of meteorological parameters, instruments/sensors, units, and accuracy (time constant 1 s and measurement step 1 s).

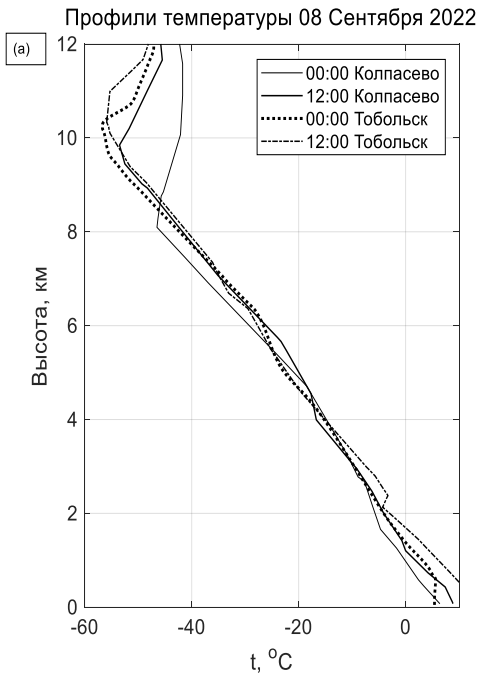
Parameter (device)	Units	Accuracy
Flight altitude, by static pressure (electromechanical altimeter VEM-72)	m	10 m
Air temperature (HYCAL Sensing Products Honeywell Inc., model: IH-3602C)	°C	0.5°C, with step 0.1°C, (−70 … +70)
Full braking air temperature (resistive-type sensor)	°C	0.5°C
Relative humidity (HYCAL Sensing Products Honeywell Inc., model: IH-3602C)	%	7% c with step 1%(0 … 100)
Atmospheric pressure (Motorola MPX4115AP)	mm Hg	1.5%,100–860 mm Hg
Aircraft speed (DISS-3A “Strela”)	km h^{-1}	1 km h^{-1}
Aircraft speed relative to the air	km h^{-1}	1 km h^{-1}

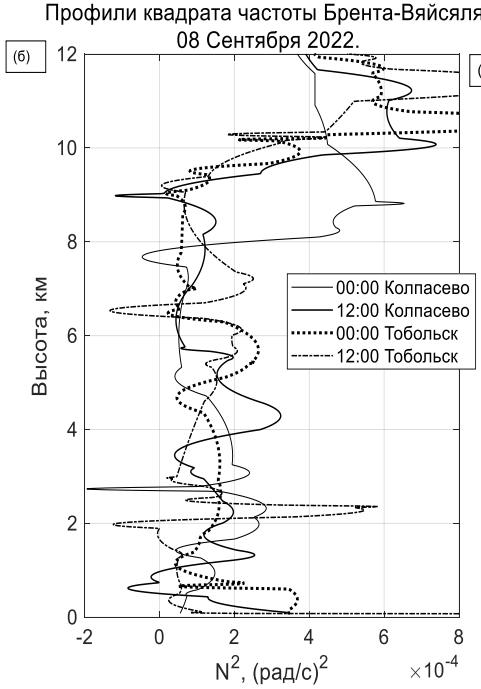
(a) Траектории полета с горизонтальными и наклонными трассами

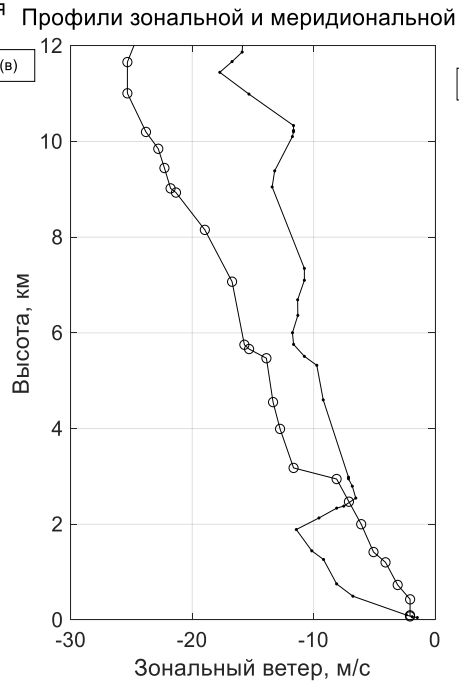


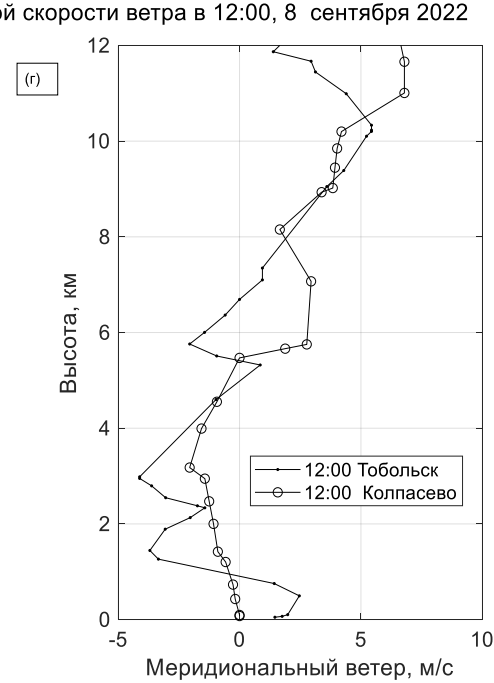


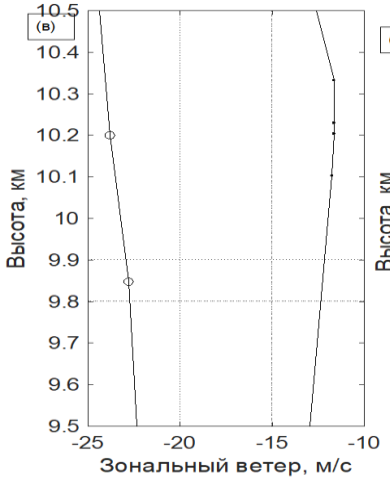
Данные радиозондирования

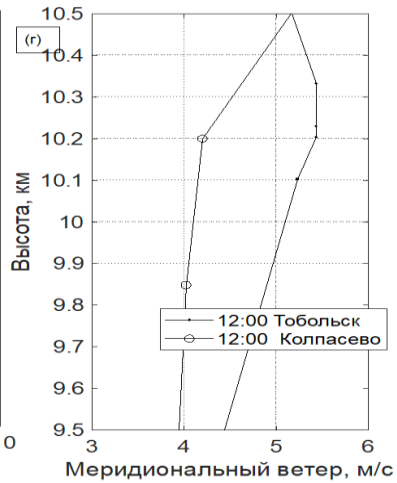


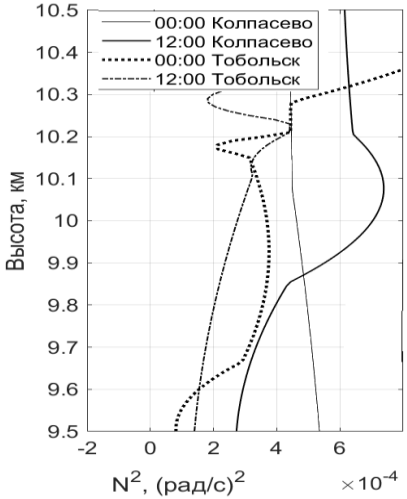






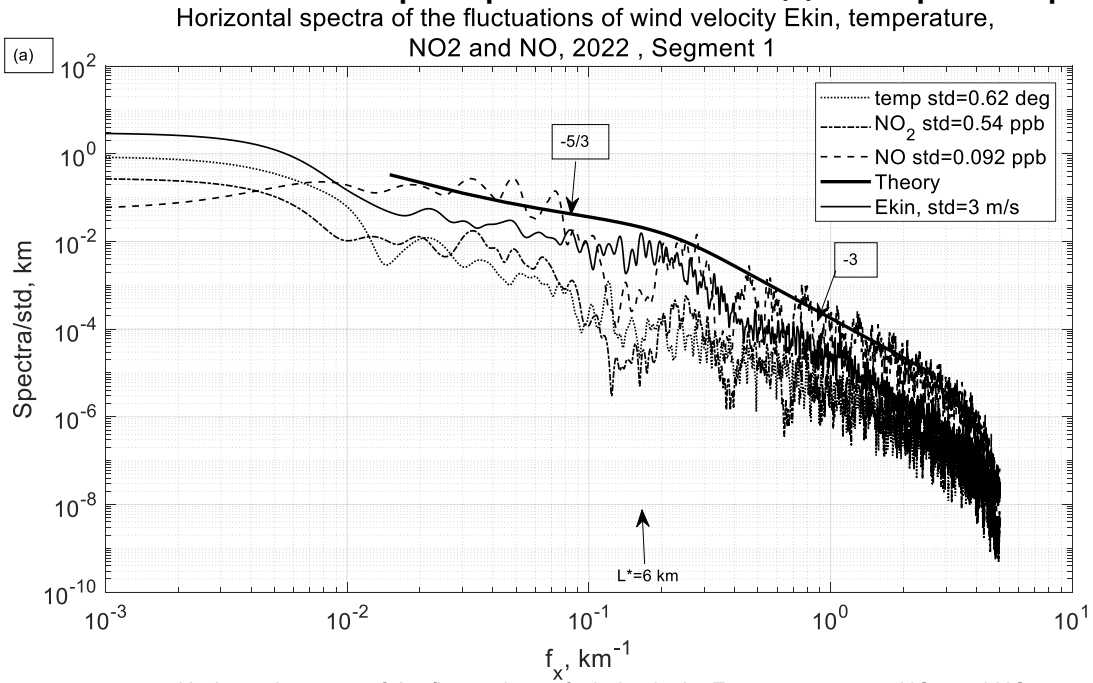


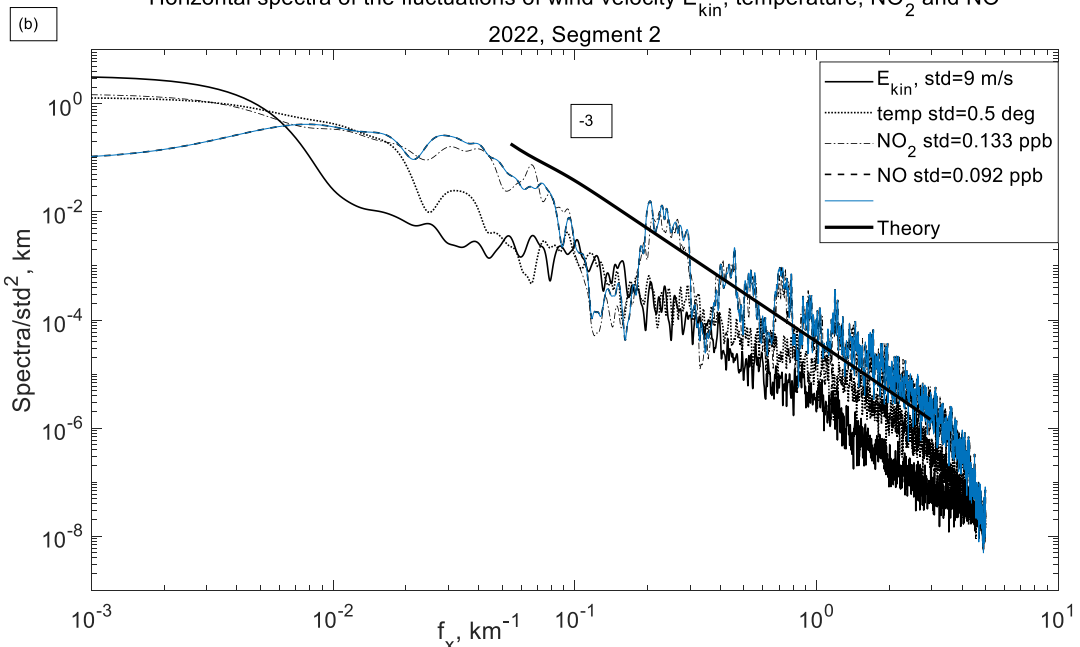




Устойчивая стратификация
в слое 9.5-10.5 км,
в котором проходила трасса
1 (высота 9540 м ±35м)
и трасса 2 (высота 9220 м
±60 м)

Горизонтальные спектры флуктуаций скорости ветра, Ekin, температуры, NO2, NO,нормированные на дисперсии флуктуаций





Трасса 1:

$\sigma \sim$ 3 м/с, N =0.02 рад/с,

χ =2, $f = 1.25 \cdot 10^{-4}$ рад/с,

M=0.4, e_0 ~0.005,

Горизонтальный масштаб

$$L^* = 2\pi / k_x^* \approx 2\sqrt{2}\pi\sigma\chi / (M \cdot N)$$

$L^* \sim 6$ км

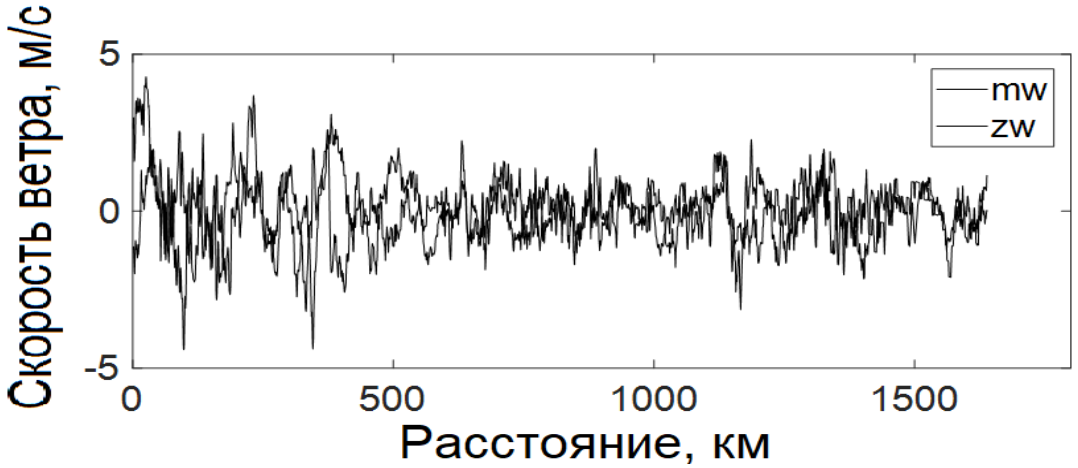
Трасса 2:

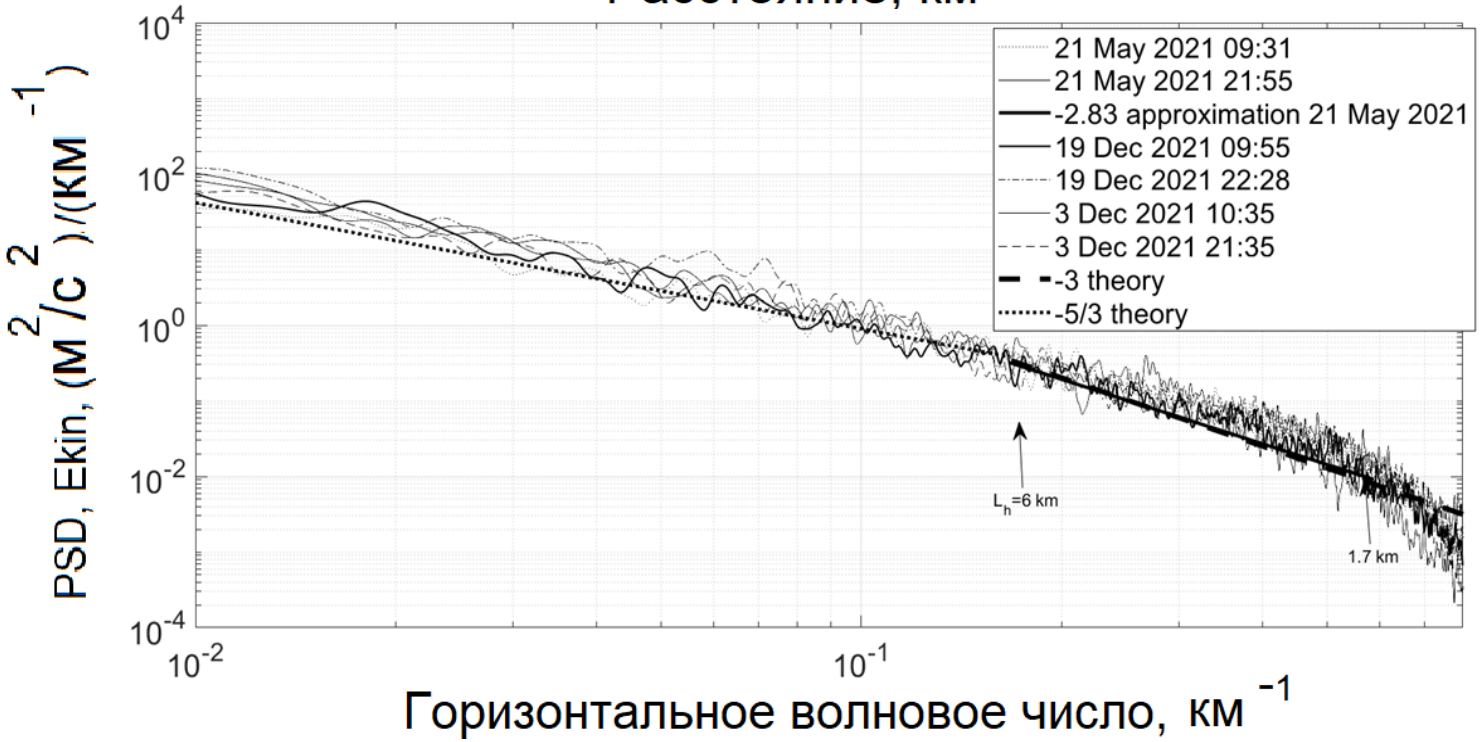
$\sigma \sim 9$ м/с

$L^* \sim 20$ км

Флуктуации меридиональной (mw) и зональной (zw) компонент скорости ветра над Гренландией, 24 марта 2021

(по данным измерений гражданскими самолетами: http://www.iagos.org)



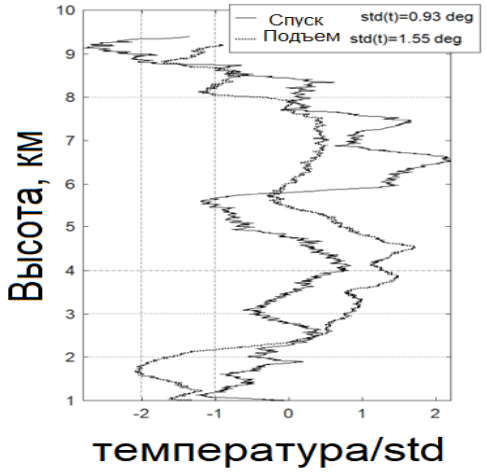


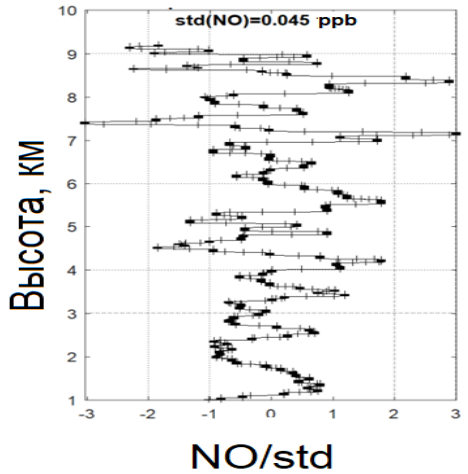
Подтверждение результатов ранних самолетных исследований (Shur 1962; Myrup 1969; Lilly and Lester 1974; Винниченко и др. 1976; Backmeister et al. 1996), указывавших на существование подобласти плавучести.

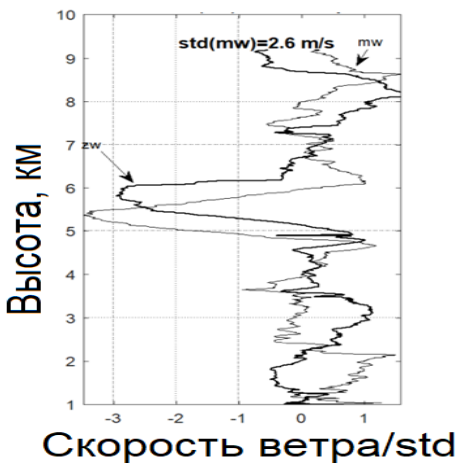
Схема пересечения анизотропных неоднородностей и “зон турбулентности” горизонтальными и наклонными трассами

Первая работа по наклонным спектрам [Гурвич А. С. и В.П. Кухарец (2008).Изв. РАН Физика атмосферы и океана Т. 44(6)]

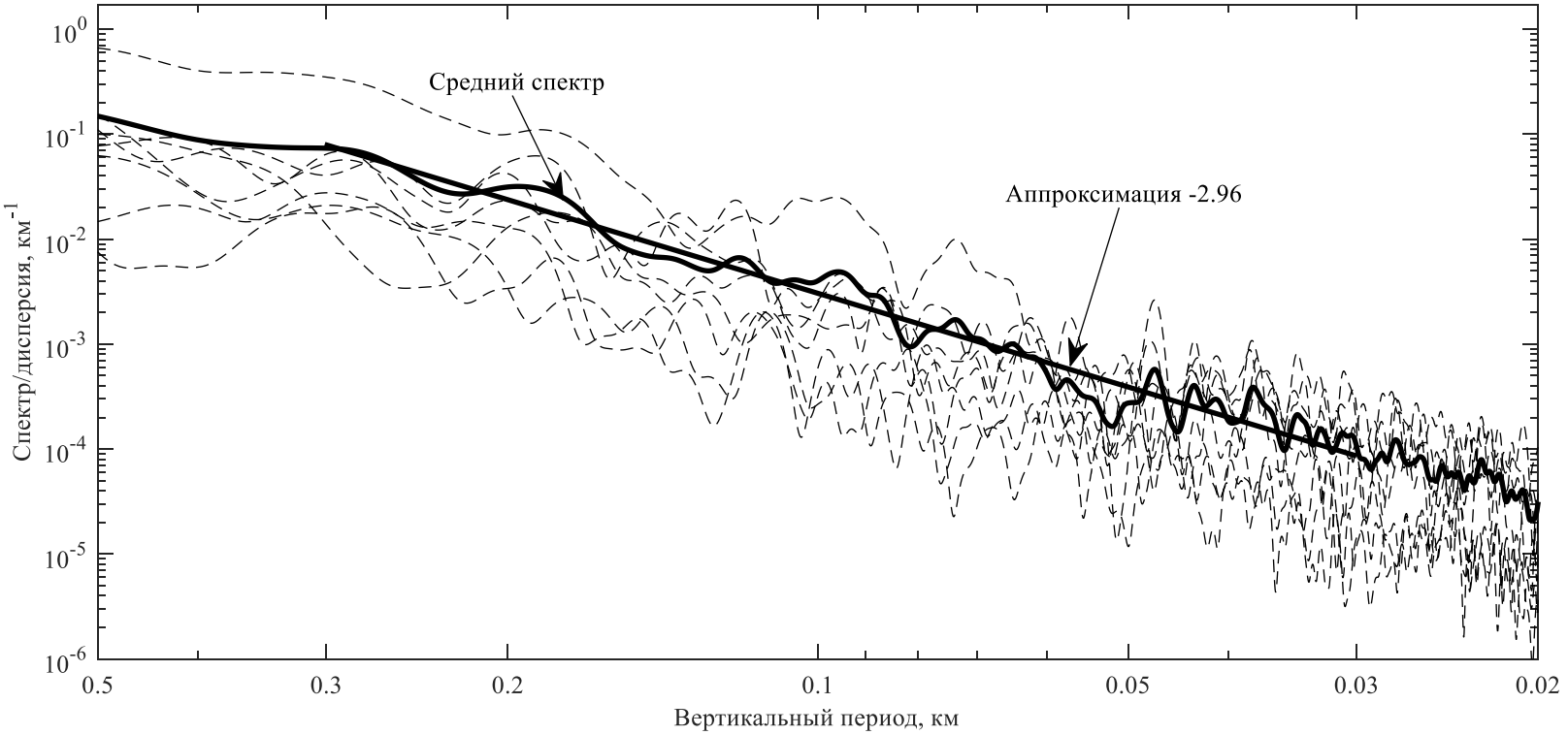
Наклонные профили флуктуаций температуры (t), концентрации NO и скорости ветра, нормированные на их среднеквадратические значения (std)



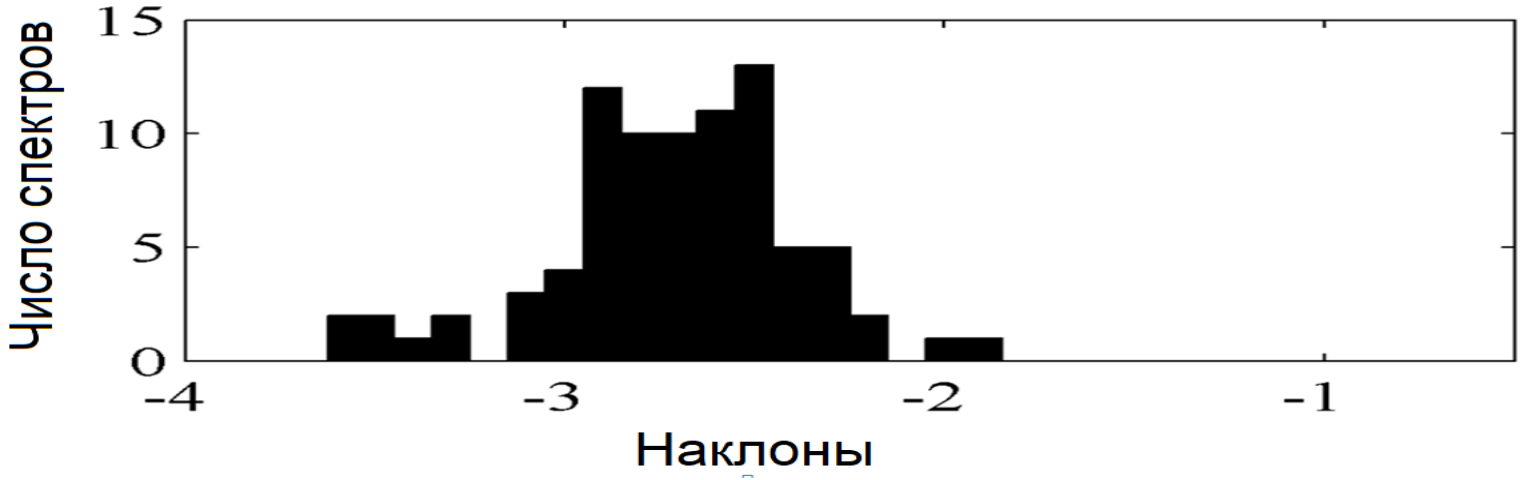




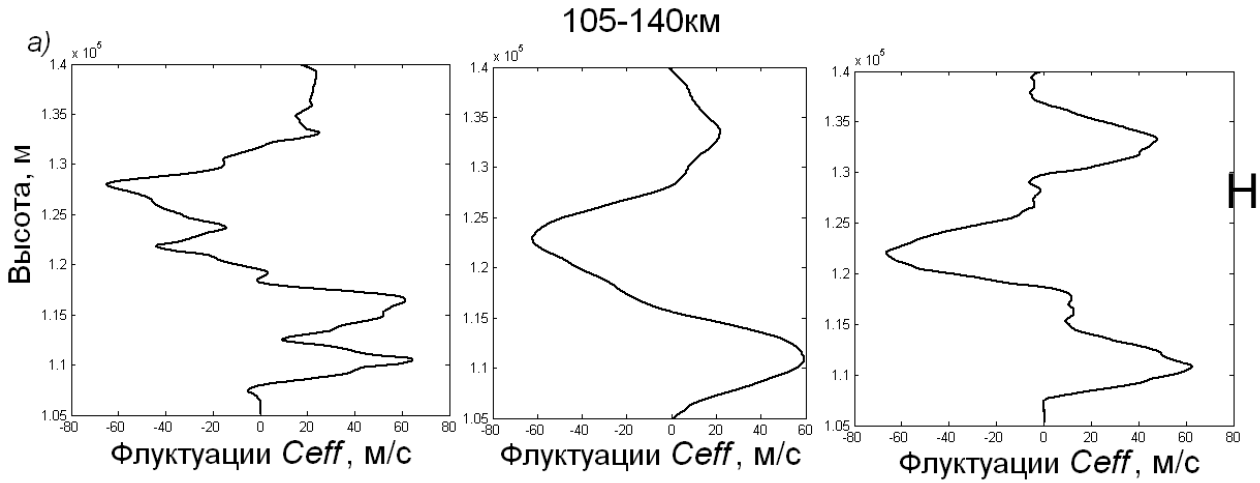
Наклонные спектры флуктуаций скорости ветра (mw),
полученные по пяти подъемам и трем спускам Ту 134 и средний спектр



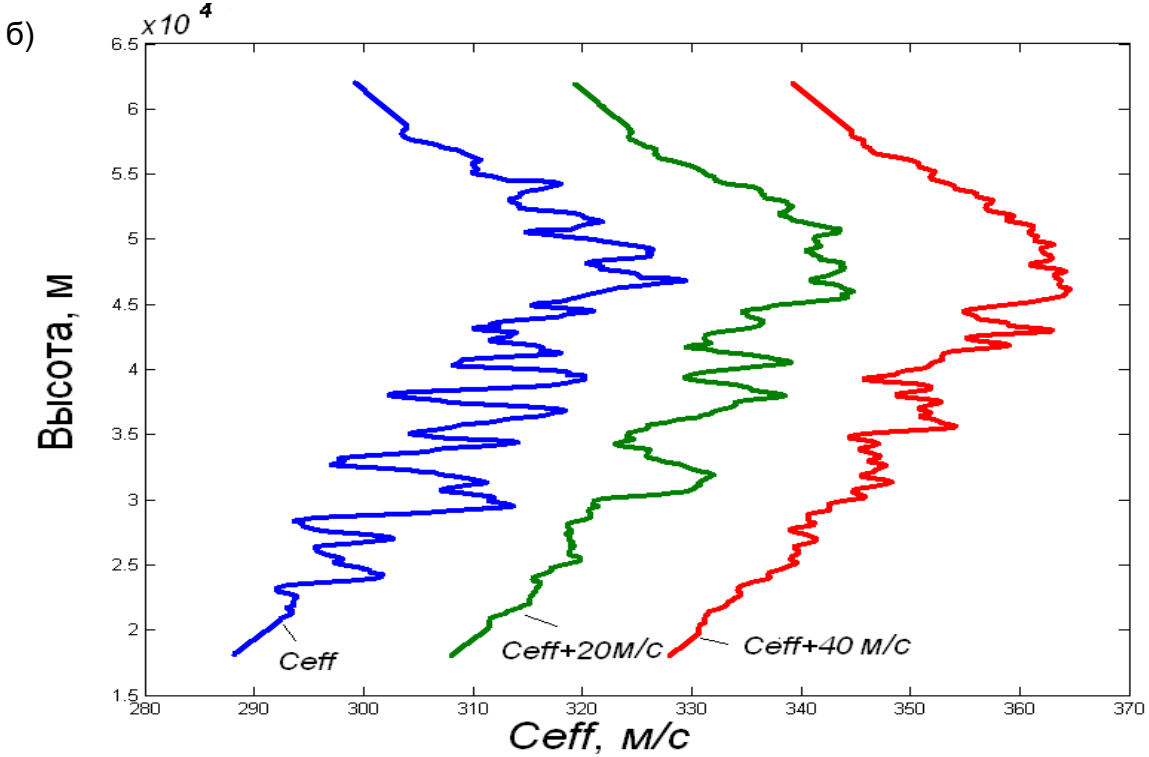
Гистограмма распределения спектров по их наклонам



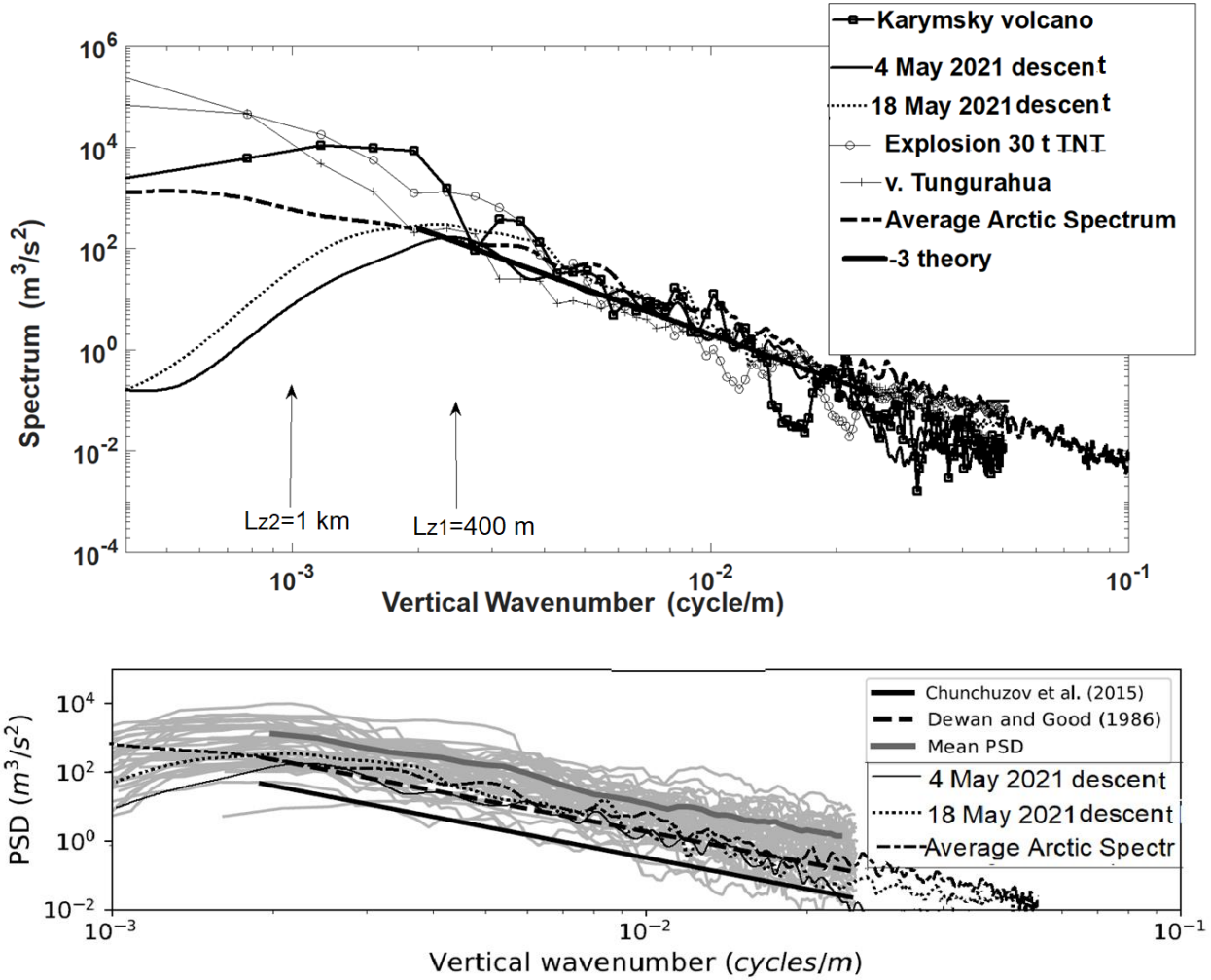
Восстановленные с помощью инфразвуковых сигналов от 3-х извержений вулкана в Эквадоре (с интервалом в 15 мин) профили флуктуаций *Ceff* и скорости ветра на высотах стратосферы (25-55 км) и нижней термосферы (105-140 км)



Нижняя термосфера
105-140 км



Стратосфера
25-55 км



Вверху: Вертикальные спектры флуктуаций горизонтальной скорости ветра в стратосфере, восстановленных по данным инфразвукового зондирования, и наклонные спектры, полученные по подъемам и спускам самолета TU 134 (Average Arctic Spectrum) и пассажирских самолетов. Внизу: Наклонные спектры в тропосфере и вертикальные спектры(PSD) (Vorobeva et al. 2023, JGR, 2023. V.128 (13)) для восстановленных флуктуаций в стратосфере, их средний спектр (темно-серая линия) и теоретические спектры из моделей (Dewan and Good 1986, JGR, V.91) и (Chunchuzov et al. 2015, *J. Acoust. Soc. Am. V. 137*).

Заключение

1. На основе анализа мезомасштабных флуктуаций температуры и скорости ветра вдоль горизонтальных трасс самолетов в устойчиво-стратифицированной тропосфере арктической зоны России и над Гренландией (выше 60° с.ш.) подтверждено существование перехода от спектра -5/3 Настрома-Гейджа к более крутой части спектра на коротких масштабах. Наличие этого перехода в подобласти плавучести обнаруживалось в ранних самолетных исследованиях, но его существование не учитывалось в большинстве современных моделей горизонтального спектра.
2. Теоретическая модель 3-х мерного спектра флуктуаций объясняла переход от спектра -5/3 к более крутому спектру на определенном масштабе, который оценивался из данных радиозондирования и самолетных измерений.
3. Тропосферные наклонные спектры скорости ветра (диапазон высот 5-12 км), полученные по данным самолетных измерений вдоль наклонных трасс, показали тот же степенной закон спадания (близкий к -3) с уменьшением вертикальных масштабов, что и вертикальные спектры в стратосфере , полученные по инфразвуковым сигналам от взрывов и извержений вулканов. Этот факт подтверждал существование общего механизма формирования тонкой слоистой структуры температуры и скорости ветра и их спектров как в устойчиво-стратифицированных слоях тропосферы, так и в стратосфере. Этот механизм, как было показано, связан с совместным влиянием плавучести и нелинейных эффектов адвекции на формирование спектров.