

# О потенциальном влиянии объемных колебаний атмосферы на результаты дистанционного зондирования

Кочин А. В.

Центральная аэрологическая обсерватория



20-я конференции «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»  
ИКИ РАН Москва ноябрь 2022

# Актуальность проблемы

Мезомасштабные волновые процессы являются транспортным механизмом для энергетического обмена между тропосферой и стратосферой, поскольку тропопауза блокирует такой обмен. Считается, что внутренние гравитационные волны (IGW) являются основным волновым процессом в атмосфере. Однако объяснение процесса возникновения IGW нельзя считать достаточно обоснованным, поскольку причины появления выбранного воздушного объема, на который влияет первоначальное возмущение, пока не ясны. Данные проведенных экспериментов по обнаружению волновых процессов показывают наличие заметных колебательных движений не только при прохождении фронтов или других возмущений, но и в хорошую погоду. В качестве альтернативы IGW рассматривается возможный процесс генерации объемных акустических колебаний за счет образования акустического резонатора в атмосфере. Колебания в атмосфере влияют на результаты дистанционного зондирования, потому что они вызывают флуктуации температуры воздуха за счет адиабатического сжатия/разрежения, а также меняют оптическую массу атмосферы. Кроме того понимание физики колебательных процессов необходимо для разработки методов дистанционного зондирования для оценки их интенсивности, что важно как для синоптических, так и климатических исследований.

# Формирование внутренних гравитационных волн

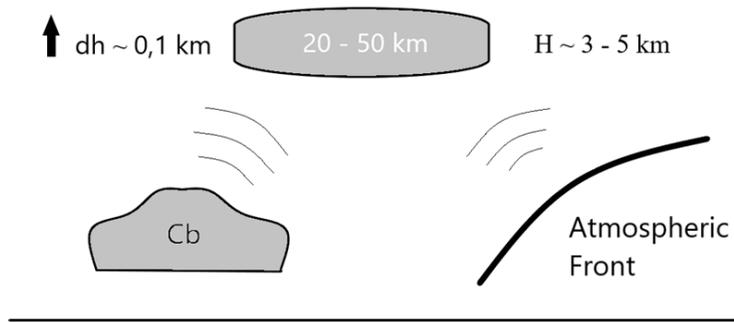


Рис.1. Формирование ВГВ.  $H$  - толщина объема,  $dh$  - начальное смещение объема.

Внешний источник (фронт или мощное кучево-дождевое облако) создает импульс, вызывающий начальное смещение ( $dh$ ) некоторого объема, как показано на рис. 1. Большинство исследователей считают, что размеры воздушного объема составляют порядка нескольких километров в толщину и десятков километров в длину (Alexander, 2004; Госсард, 1975; Куличков 2017). Масса такого воздушного объема в стратосфере на высоте 15 км при плотности воздуха  $0,1 \text{ кг/м}^3$  составляет более 100 млн. тонн. Амплитуда начального смещения составляет десятки или сотни метров (рис. 1).

Причины внезапного смещения только одного конкретного массивного воздушного объема трудно объяснить. До возникновения колебаний стратосфера однородна и неподвижна. Импульс от мощного кучево-дождевого облака или атмосферного фронта воздействует на всю атмосферу, включая тропосферу и стратосферу (рис. 1). Процесс, вызывающий появление неоднородностей в стратосфере с размерами десятков километров по горизонтали и нескольких километров по вертикали, никем не описан. Если нет неоднородностей, то нет и выбранного объекта, который приобретает дополнительный импульс. Поэтому существование колебаний изолированного воздушного объема в стратосфере представляется маловероятным.

# Частота Брента-Вяйсяля

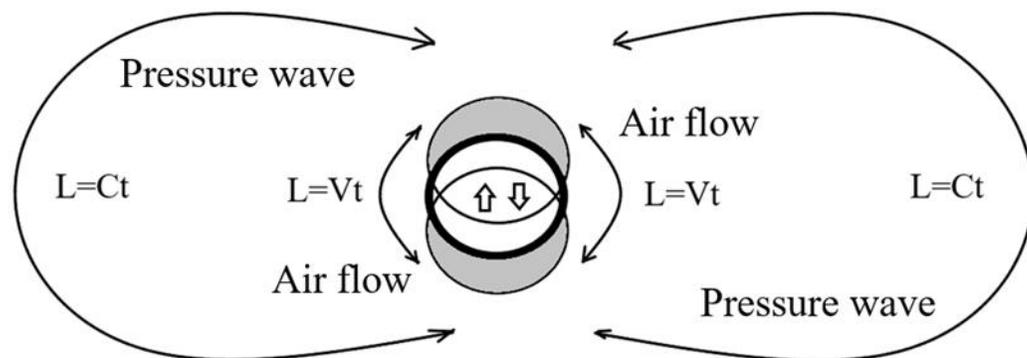


Рис.2. Смещения звуковой волны и присоединенной воздушной массы при колебаниях объема. Добавленная масса воздуха, который смещается при колебаниях объема воздуха, выделена серым цветом,.

Соотношение для частоты Брента-Вяйсяля выводится в предположении гидростатического равновесия. Для области колебаний в 20 км время восстановления гидростатического равновесия заметно более 600 секунд, в то время как период частоты Брента-Вяйсяля в стратосфере составляет 300 секунд. Это уже ограничивает сферу применимости вывода размером единиц километров. Кроме того, когда объем воздуха смещается, освободившийся объем должен быть заполнен воздухом из окружающего пространства. Затем этот воздух из окружающего пространства должен вернуться на свое первоначальное место.

В течение полного периода колебаний IGW (300 секунд в стратосфере) путь добавленной воздушной массы (рис. 2) не может быть меньше периметра области колебаний. Скорость перемещения  $V$  по радиозондовым измерениям составляет около 0,5 - 1 м/с, что дает максимальный размер 50 - 100 метров.

# Эксперимент с радиозондами.

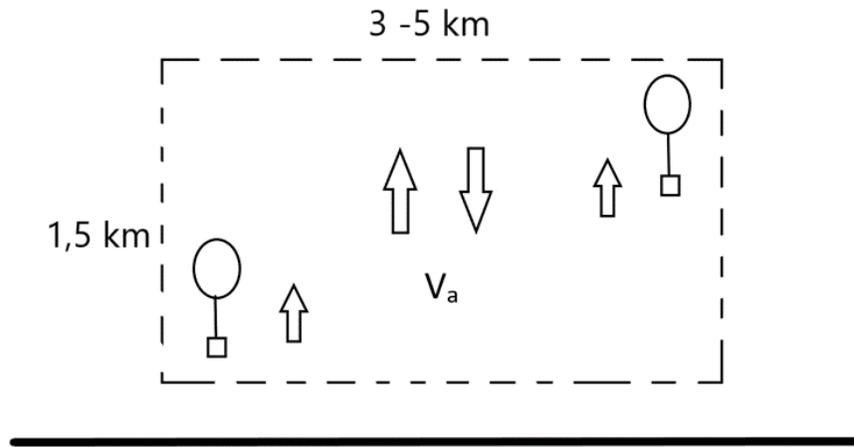


Рис.3. Взаимное положение радиозондов в эксперименте.

Выпуск двух радиозондов через 300 секунд, находящихся на разной высоте в процессе полета (разница высот примерно 1500 метров) показал, что вертикальные скорости изменяются синхронно, т. е. существует процесс, общий для всей атмосферы, который вызывает синхронные колебания всей атмосферы. Период колебаний скорости близок к 350 секундам (суммарные спектры за весь полет внизу справа).

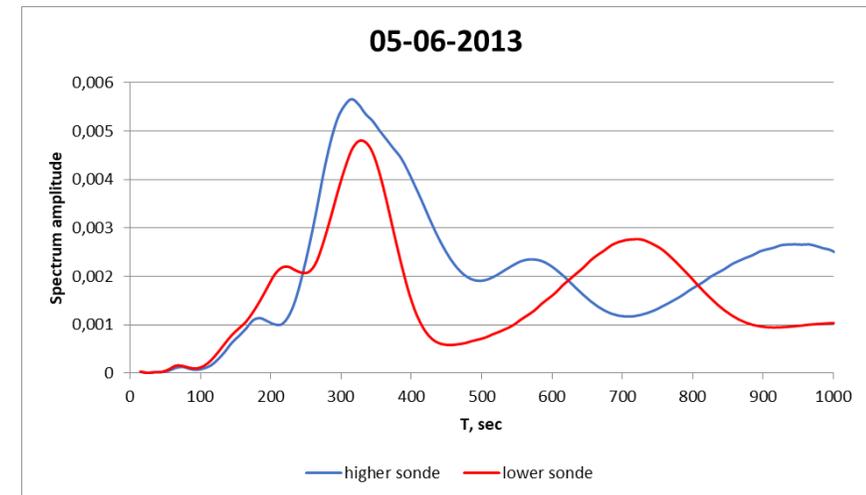
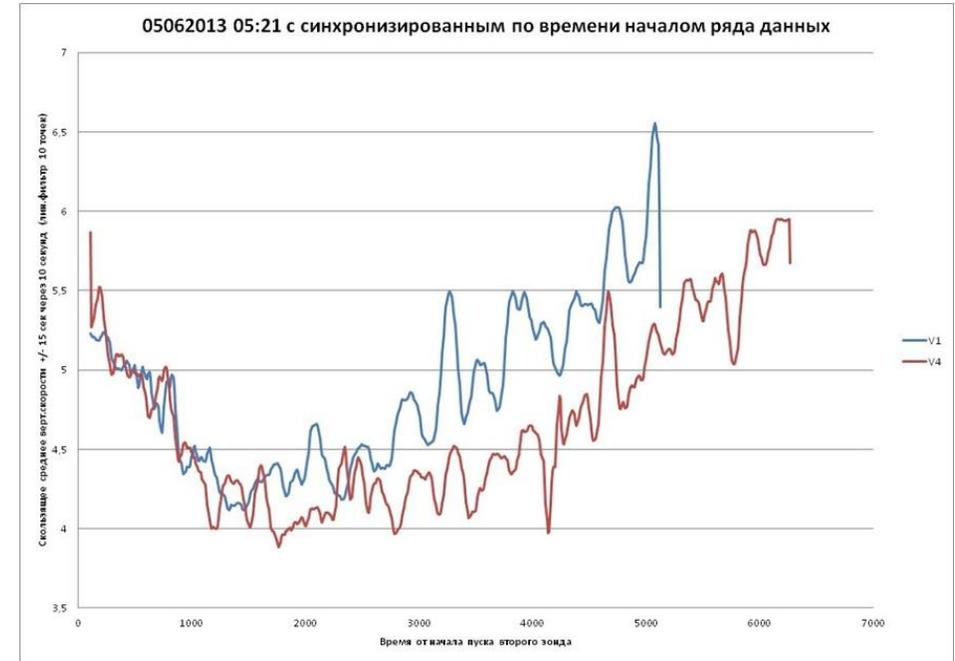


Рис.4. Вертикальные скорости и спектры колебаний скоростей.

Одновременное измерение освещенности и атмосферного давления микробарографом при восхода солнца подтвердили наличие синхронных противофазные колебаний в атмосфере с периодом около 350 – 400 секунд.

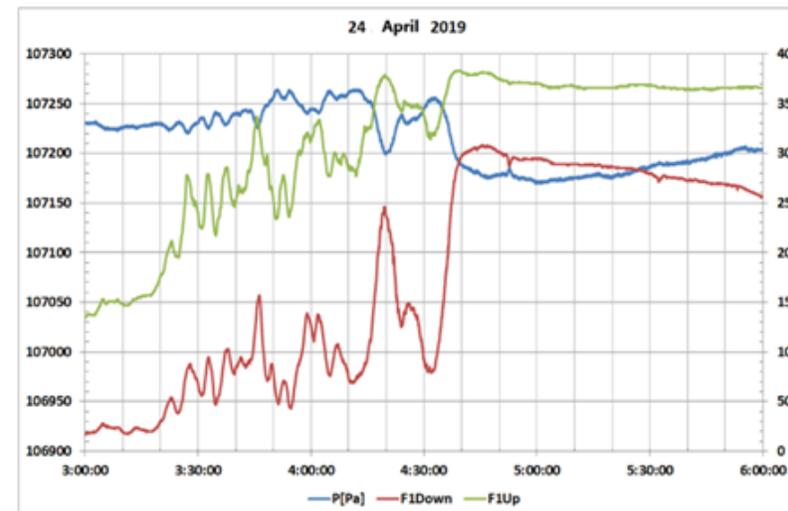
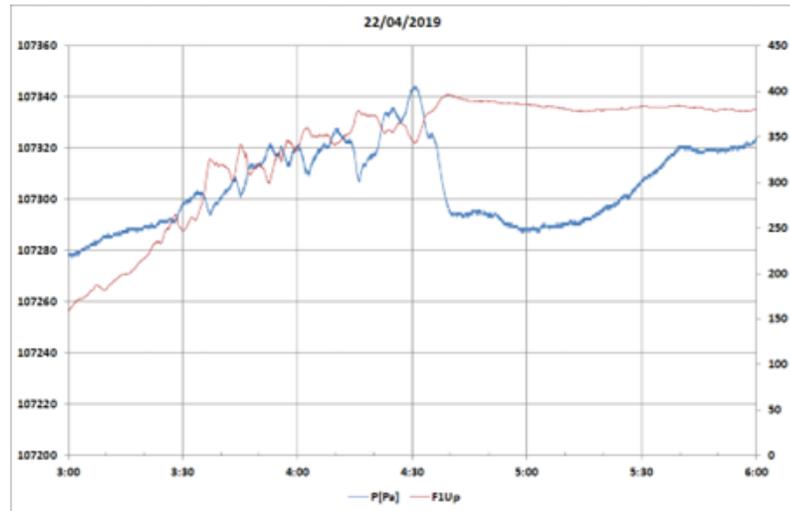


Рис.5. Данные микробарографа (синяя линия) и вертикально ориентированные данные датчика видимого света (красная линия). Левая ось Y - это давление в Па, правая ось Y - шкала датчика освещенности в кодах АЦП, ось X - местное время в часах. Интенсивность света, отраженного подстилающей поверхностью, показана красной линией на правом рисунке.

# Изменения давления и освещенности при прохождении солнечного терминатора. Влияние на результаты дистанционного зондирования.

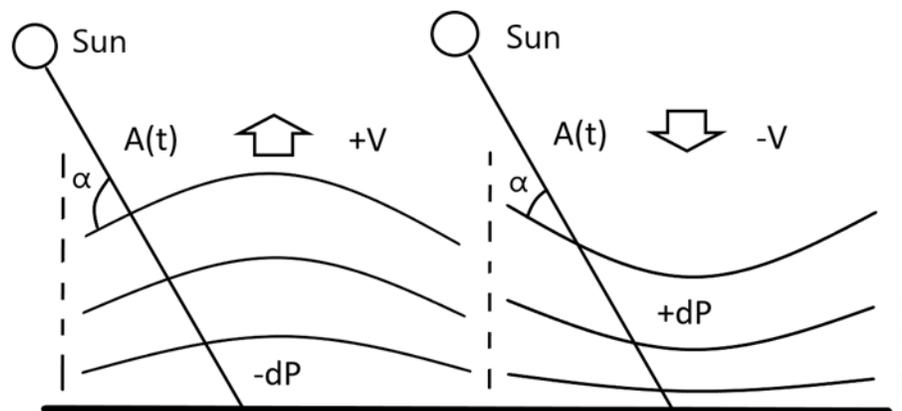


Рис.6. Изменения давления и освещенности.  $A(t)$  - амплитуда смещения слоев атмосферы во время флуктуации,  $dP$  - колебание поверхностного давления,  $V$  - вертикальная скорость слоев атмосферы,  $\alpha$  - угол падения солнечного света на слои атмосферы.

Флуктуации освещения возникают из-за изменения оптической массы атмосферы, а колебания давления возникают из-за ускорения центра масс в процессе колебаний. Когда центр масс смещается из равновесного состояния на поверхность Земли, воздух сжимается и поверхностное давление увеличивается. При этом уменьшается оптическая масса атмосферы, что уменьшает затухание (рис. 6). Одновременно увеличивается плотность воздуха и его температура, что влияет на результаты дистанционного зондирования.

Оптическая масса атмосферы не изменяется при возникновении внутренних гравитационных волн, так как этот процесс вызывает разнонаправленное смещение воздуха в разных частях атмосферы, что не изменяет оптическую массу атмосферы. Кроме того, затухание света происходит только в тропосфере, а стратосфера не изменяет интенсивность света (Kochin 2021). Поэтому изменение интенсивности света может быть вызвано только флуктуациями тропосферы.

# Генерация объемных акустических колебаний

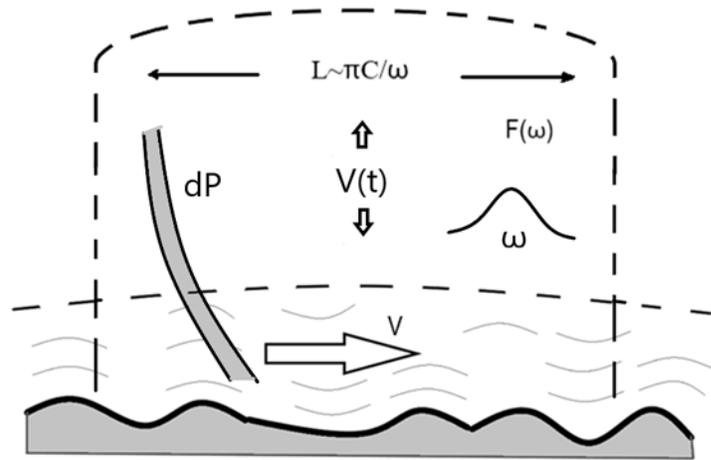


Рис.7. Генерация колебаний вследствие отклонения давления на  $dP$  (выделено серым цветом) от гидростатического давления.  $V(t)$  вертикальные воздушные потоки для восстановления гидростатического равновесия,  $V$  — скорость ветра, обтекающего орографические неоднородности,  $\omega$  — частота акустического резонатора,  $F(\omega)$  — реакция акустического резонатора на внешние воздействия.  $L$  — вероятная горизонтальная протяженность зоны колебаний;  $C$  — скорость звука.

Вертикальные смещения воздушной массы из-за каких-либо возмущений приводят к отклонению вертикального профиля давления от гидростатического состояния. отклонения давления от гидростатического давления (показаны серым цветом на рис. 7) требуют последующего перераспределения массы в атмосфере с целью восстановления гидростатического равновесия.

Перераспределение масс приводит к появлению упорядоченных воздушных потоков  $V(t)$ . Однако эти воздушные потоки не уменьшаются до нуля, когда атмосфера достигает гидростатического равновесия, эти воздушные потоки вызывают колебательные движения в вертикальном направлении. Эффект полностью аналогичен действию сил плавучести при образовании ВГВ, включая образование определенной резонансной частоты  $\omega$ . При этом воздействие внешних возмущений аналогично воздействию шума на резонансную систему.

# Один из возможных вариантов формирования акустического резонатора

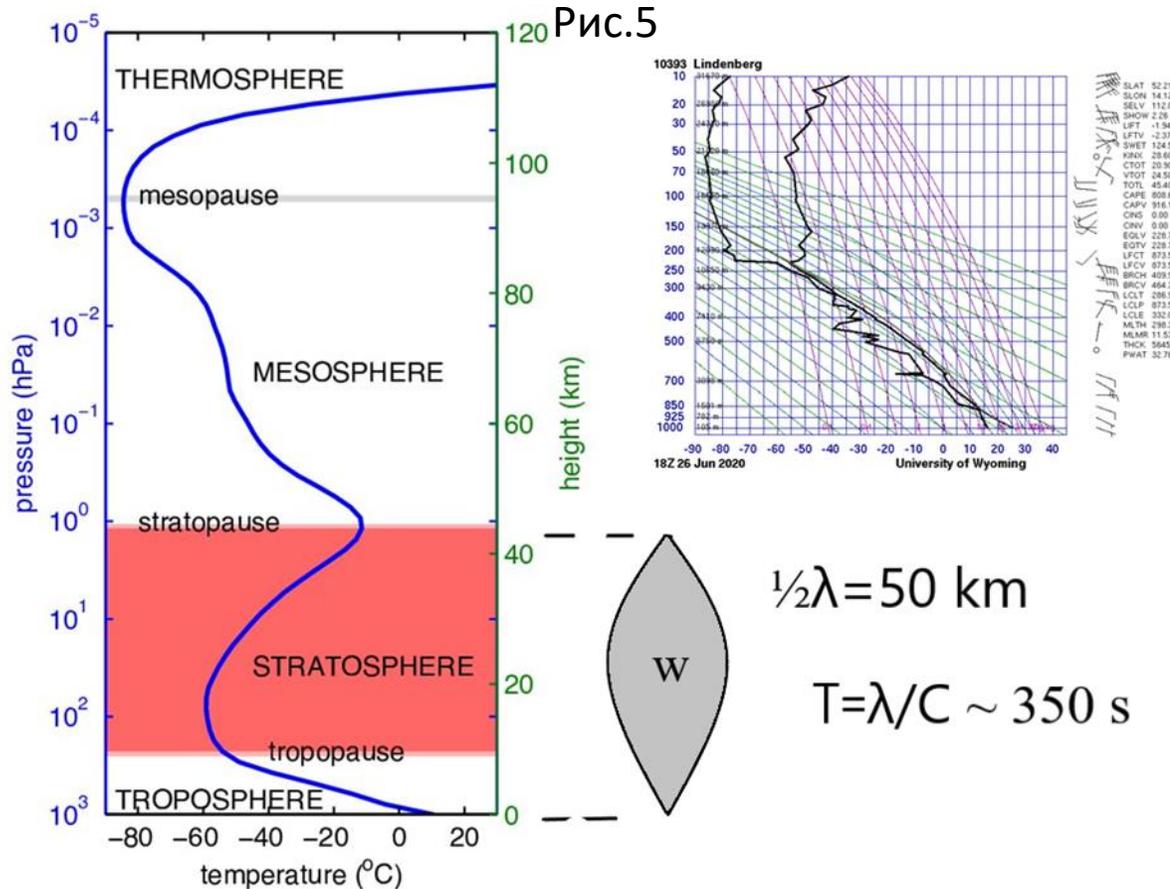


Рис.8. Формирование акустического резонатора между поверхностью Земли и стратопазой и образование стоячей волны (выделенной серым цветом). Профиль температуры атмосферы (Gerber, 2012) показан в левой части рисунка. Левая ось Y - давление (hPa), правая ось Y - высота (км), ось X - температура (°C). Пример данных аэрологического зондирования с разворотом ветра на высотах полярных и тропических тропопауз показан в правой части рисунка. Ось Y - давление (гПа) и высота (в метрах); Ось X - температура (°C). Профиль ветра показан стрелками справа от графика температуры. Потенциально колебания могут усиливаться из-за термоакустического эффекта (Рэлей)

# Заключение

1. Колебания в атмосфере влияют на результаты дистанционного зондирования, потому что они вызывают флуктуации температуры и плотности воздуха за счет адиабатического сжатия/разрежения, а также меняют оптическую массу атмосферы.
2. Считается, что внутренние гравитационные волны (IGW) являются самым главным волновым процессом в атмосфере. Однако объяснение процесса возникновения IGW не может считаться достаточно обоснованным.
3. Процесс генерации объемных акустических колебаний за счет образования акустического резонатора в атмосфере можно рассматривать как альтернативу IGW. Вероятность образования таких колебаний высока, поскольку для их появления не требуется наличие резких изменений параметров атмосферы.

# Литература

Alexander, M. J., P. T. May, and J. H. Beres (2004), Gravity waves generated by convection in the Darwin area during the Darwin Area Wave Experiment, *J. Geophys. Res.* doi:10.1029/2004JD004729

Basok B., V. V. Gotsulenko. 2018. Self-oscillations excited by the heat sink from the heated gas flow. *The journal Proceedings of MIPT 2018. V. 10, № 4.*

Borchevkina A. Karpov, A.V. A.V. Ilminskaya 2016. The influence of meteorological storms on the parameters of the atmosphere and ionosphere in the Kaliningrad region in 2016. *Meteorological Bulletin.*

Gerber R. & al. (2012). Assessing and Understanding the Impact of Stratospheric Dynamics and Variability on the Earth System. *BAMS.* DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00145.1

Gossard E., Hooke W. *Waves in the Atmosphere.* 1975.

Holton J. *An Introduction to Dynamic Meteorology.* Elsevier. 2004.

Khaykin, S. M., A. Hauchecorne, N. Mzé, and P. Keckhut (2015), Seasonal variation of gravity wave activity at midlatitudes from 7 years of COSMIC GPS and Rayleigh lidar temperature observations, *Geophys. Res. Lett.*, 42, doi:10.1002/2014GL062891.

Kochin A. 2021. Examination of Optical Processes in The Atmosphere During Upper Air Soundings. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.* DOI: 10.1175/JTECH-D-20-0158.1

Kochin A. 2022. Correction of Variation due to Non-Hydrostatic Effects The Observed Temperature in Upper-Air Sounding.

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.14145>

Kochin A. 2022. Earth's Rotation Causes Global Atmospheric Circulation.

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.14887>

Kochin A. 2014. Detection of the atmosphere oscillatory motion in the spectra of the electric field and pressure fluctuations. XV International Conference on Atmospheric Electricity, Norman, Oklahoma, USA, 2014

Kshevetsky S., Kulichkov N. 2015. Influence of internal gravitational waves

from convective clouds on atmospheric pressure and spatial distribution of temperature disturbances. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* DOI: 10.7868/S000235151501006X

DOI: 10.7868/S000235151501006X

Kulichkov S.N., Chunchuzov I.P., Popov O.E., Perepelkin V.G., Golikova E.V., Bush G.A., Repina I.A., Tsybul'skaya N.D., Gorchakov G.I. Internal gravity and infrasound waves during a hurricane in Moscow On May 29, 2017 //

*Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* doi: 10.31857/S0002-351555232-40

Plougonven, R., and F. Zhang (2014), Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts, *Rev. Geophys.*, 52, doi:10.1002/2012RG000419.

Rayleigh 1887. *The theory of sound.*

Rott, Nikolaus (1980). "Thermoacoustics". *Advances in Applied Mechanics* Volume 20. doi:10.1016/S0065-2156(08)70233-3. ISBN 9780120020201