

*Моделирование
квазидвухлетних колебаний
ветра тропической
стратосферы.
Малопараметрические модели*

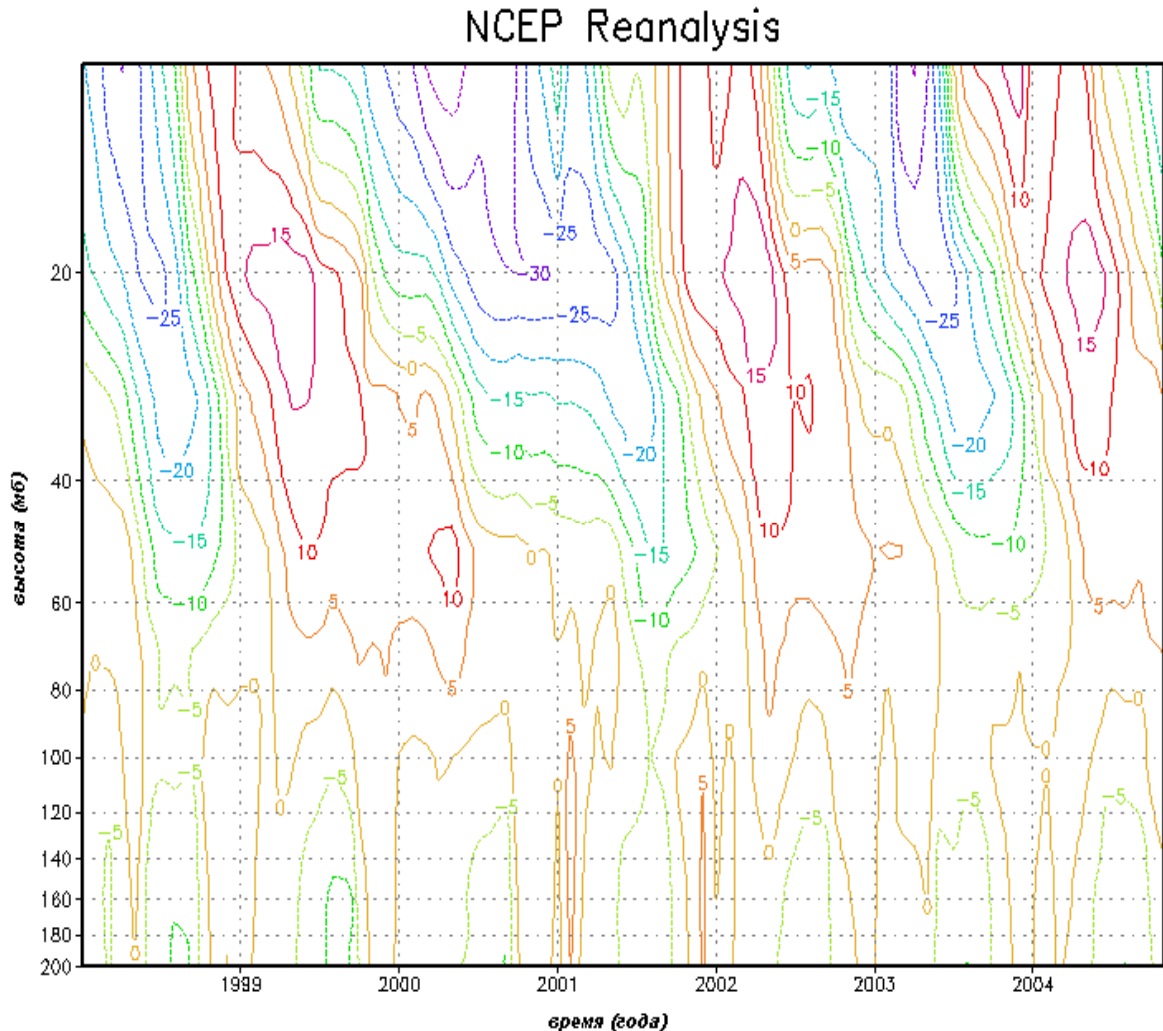
Д.В. Кулямин, аспирант МФТИ, ИВМ РАН

Обзор проблемы: квазидвухлетние колебания

- Экваториальный захват (симметричная структура по широте)
- меняющийся период ~24-30 месяцев
- Зона распространения: ~70 – 10 Мб (или 20 – 70 км) с максимумами амплитуды зональной скорости ~ 30 м/с на высотах ~ 20-10 Мб
- Медленное опускание фаз колебаний со скоростью порядка 1 км/месяц

Значение КДК:

- модуляция планетарных волн и влияние на средние широты
- воздействие на процессы генерации и общую циркуляцию озона и других примесей
- взаимодействие с долгосрочными явлениями (Эль-Ниньо)



Основные цели исследования

- **Описание и анализ существующих механизмов возбуждения квазидвухлетних колебаний**
- **Исследование свойств колебаний зонального ветра в зависимости от характеристик изучаемых механизмов**
- **Изучение условий, необходимых для решения проблемы воспроизведения КДК в моделях общей циркуляции**

Механизмы формирования КДК

- **получение количества движения от нелинейного взаимодействия вертикально распространяющихся экваториальных волн зональным течением (необходимо рассматривать весь спектр экваториальных волн вплоть до самых коротких гравитационных)**

Условное разделение спектра экваториальных волн по отношению к КДК (из предположения, что механизмы могут быть различны):

- **длинные волны** (Кельвина, Россби-гравитационные)
их периоды ~ 1-5 дней, зональные длины волн более 1000 км
В глобальных моделях – внутренний процесс
- **мелкомасштабные стратосферные гравитационные волны**
периоды значительно меньше дня, зональные длины волн ~10-100 км
В глобальных моделях процесс распространения имеет подсеточный масштаб

Первая часть исследования: изучение двух вышеуказанных механизмов на базе *малопараметрических* моделей

- **Исследование взаимодействия длинных волн со средним потоком на критических уровнях (за основу взята Р. Пламба).**
- **Изучение возможности получения КДК с использованием только параметризации взаимодействия коротких гравитационных волн со средним потоком (поскольку так оно описывается в глобальных моделях, за основу взята параметризация, предложенная К. Хинсом).**
- **Изучение относительной роли экваториальных волн разных масштабов в формировании КДК.**

Возбуждение КДК на основе взаимодействия длинных волн с зональным течением

Упрощенная двумерная модель: распространение двух разнонаправленных волн в вязкой среде в поле тяжести и с термической диссипацией (Р. Пламб)

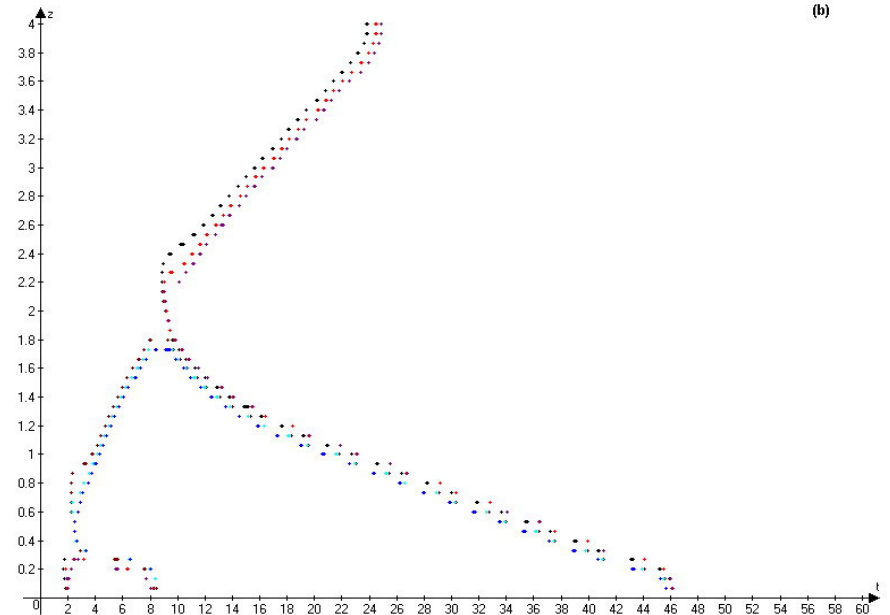
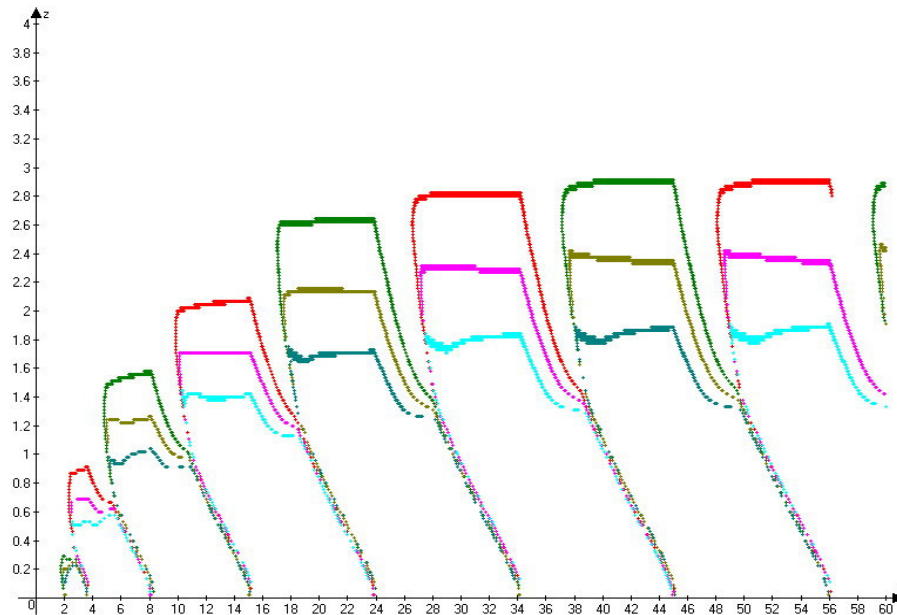
$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} - \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} = -\frac{\partial \sum_n F_n(z, u)}{\partial z}, \quad F_{n=1,2}(z) = F_n(0) \exp \left\{ -s_n \int_0^z \frac{Nv}{k_n (\bar{u} - c_n)^2} dz' \right\}.$$

Результаты:

$$T \sim \frac{\hat{k}\hat{c}}{F_0}$$

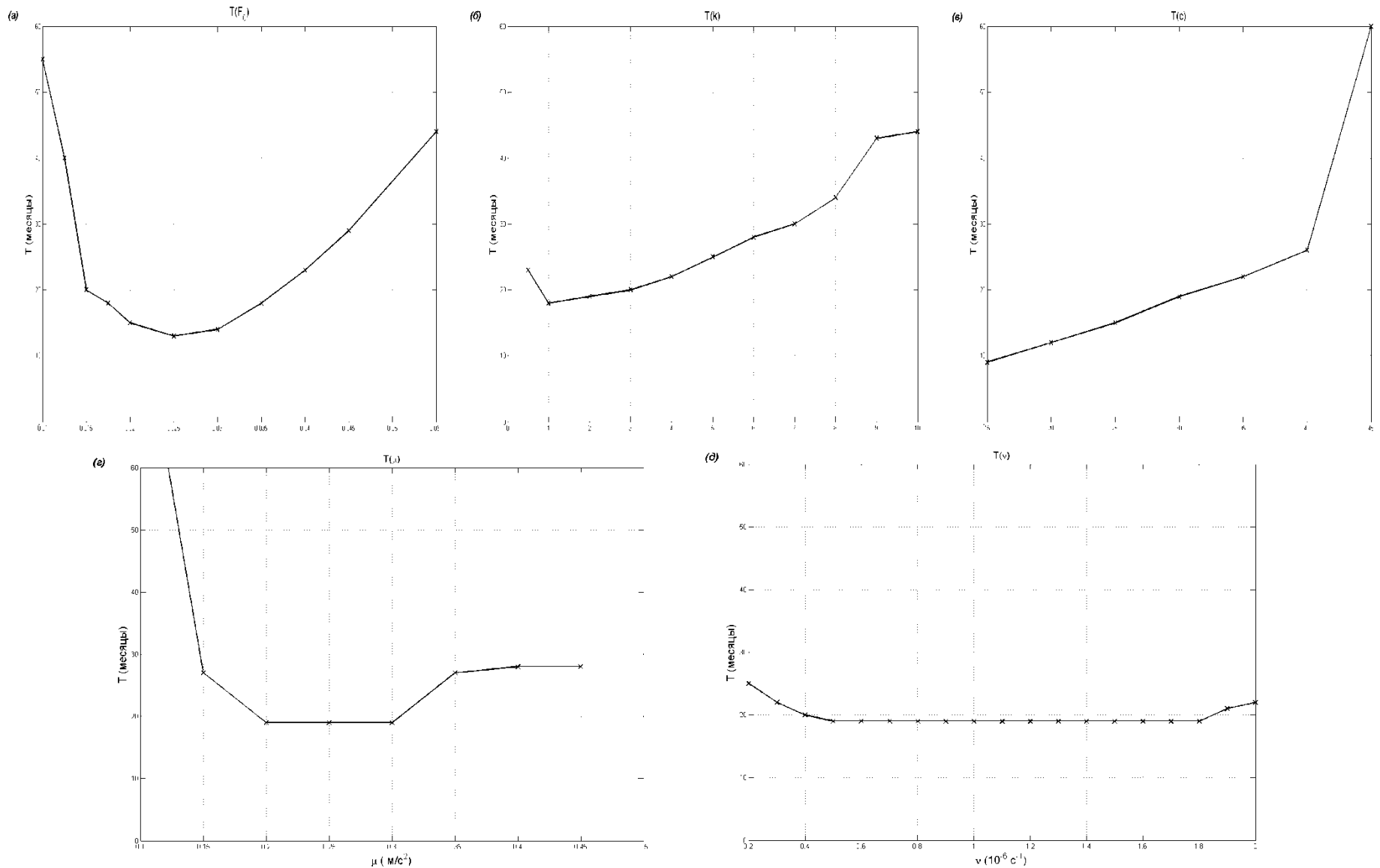
- линейная зависимость от параметров (модель нелинейная)
- область значений параметров, при которых решение имело вид предельного цикла с такой зависимостью периода, мала
- энергии реальных длинных волн недостаточно для формирования КДК

Средняя зональная скорость для различных значений вертикального разрешения M=120, M= 60



(b)

Зависимости периода колебаний зональной скорости от параметров модели, полученные в численных экспериментах с моделью Пламба с симметричными волнами.



Возбуждение КДК на основе обрушения гравитационных волн

Аналогичная упрощенная двумерная модель на основе параметризации гравитационно-волнового сопротивления (К. Хинс) (эмпирическая теория)

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} - \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial F_{GW}}{\partial z}$$

F_{GW} - поток импульса от обрушения гравитационных волн, считается на основе алгоритма, разработанного для параметризации.

Основные идеи параметризации:

- $Nm^{-1} = \Omega h^{-1}$ - дисперсионное соотношения для отдельной

волны, предполагающее изотропность волны

- $\frac{\partial v}{\partial z} < N$ - условие обрушения волны,

- учет статистических факторов: $\Phi_1 \sigma m < N, v(z) = \Phi_2 \hat{\sigma}$

- подсчет критического значения для начального $m_{iC} = N(z_0) [\Phi_1 \sigma + u(z) - u(z_0) + v(z)]^{-1}$

вертикального волнового числа

- линейный спектр $F_{GW} = \int_{m_{i \min}}^{m_{i \text{Critical}}} \rho(z_0) \overline{v(z_0)v(z_0)} h / m_i dm_i = \rho(z_0) \hat{\sigma}(z_0)^2 h \int_{m_{i \min}}^{m_{i \text{Critical}}} P(m_i) / m_i dm_i$

Результаты численного анализа

$$T \sim \frac{1}{h\sigma_0^2 m_{\min} \sqrt{\mu}}$$

Получен аналог квазидвухлетних колебаний
(в результате подбора параметров численной модели)

Граничные условия

$$u(z_0) = 0,$$

$$u(z_{\max}) = 0$$

$$F_{Hines}(z_0) = 0,$$

$$\left. \frac{\partial F_{Hines}(z)}{\partial z} \right|_{z_{\max}} = 0$$

Значения параметров

$$h = 1.4 \cdot 10^{-5} \text{ \AA}^{-1},$$

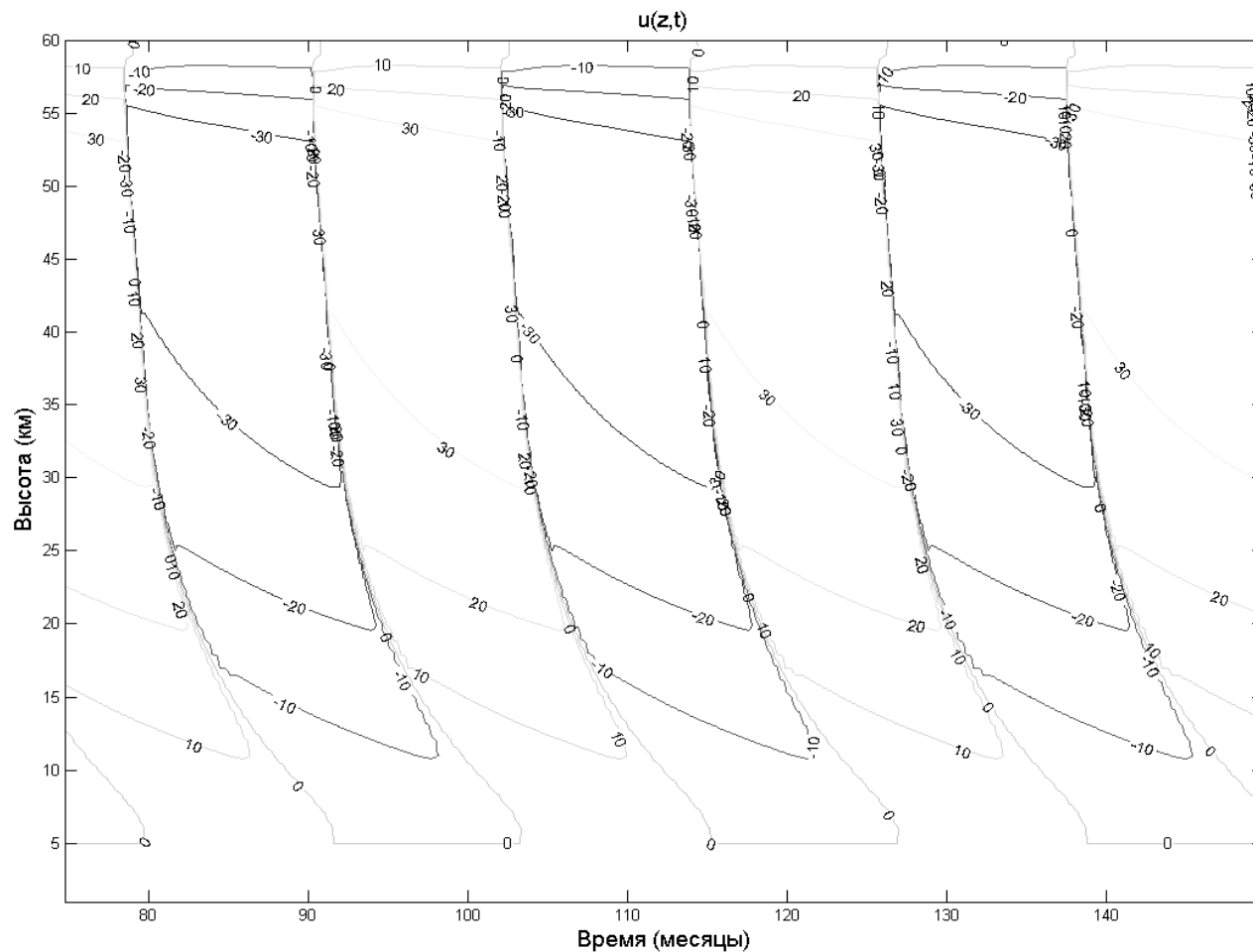
$$\mu = 0.25 \text{ \AA} \cdot \tilde{n},$$

$$\sigma_0^2 = 1.75 \text{ \AA}^2 / \tilde{n}^2,$$

$$m_{\min} = 10^{-4} \text{ \AA}^{-1},$$

$$\Phi_1 = 0.3,$$

$$\Phi_2 = 1.5$$



Моделирование КДК на основе совместного взаимодействия гравитационных и планетарных волн с зональным потоком.

Аналогичная упрощенная двумерная модель для эволюции осредненной компоненты зональной скорости при наличии двух разнонаправленных длинных волн (по модели Пламба) и непрерывного спектра гравитационных волн (задаваемых параметризацией Хинса):

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} - \mu \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial z^2} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial (F_{Plumb} + F_{Hines})}{\partial z}$$

$$F_{Plumb}(z) = \rho(z) \sum_n F_n(z_0) \exp \left\{ -\int_0^z \frac{N(z') v}{k_n (\bar{u}(z') - c_n)^2} dz' \right\},$$

$$F_{Hines}(z) = \rho(z_0) \sigma(z_0)^2 h C (m_{ic}^+(z) - m_{ic}^-(z)).$$

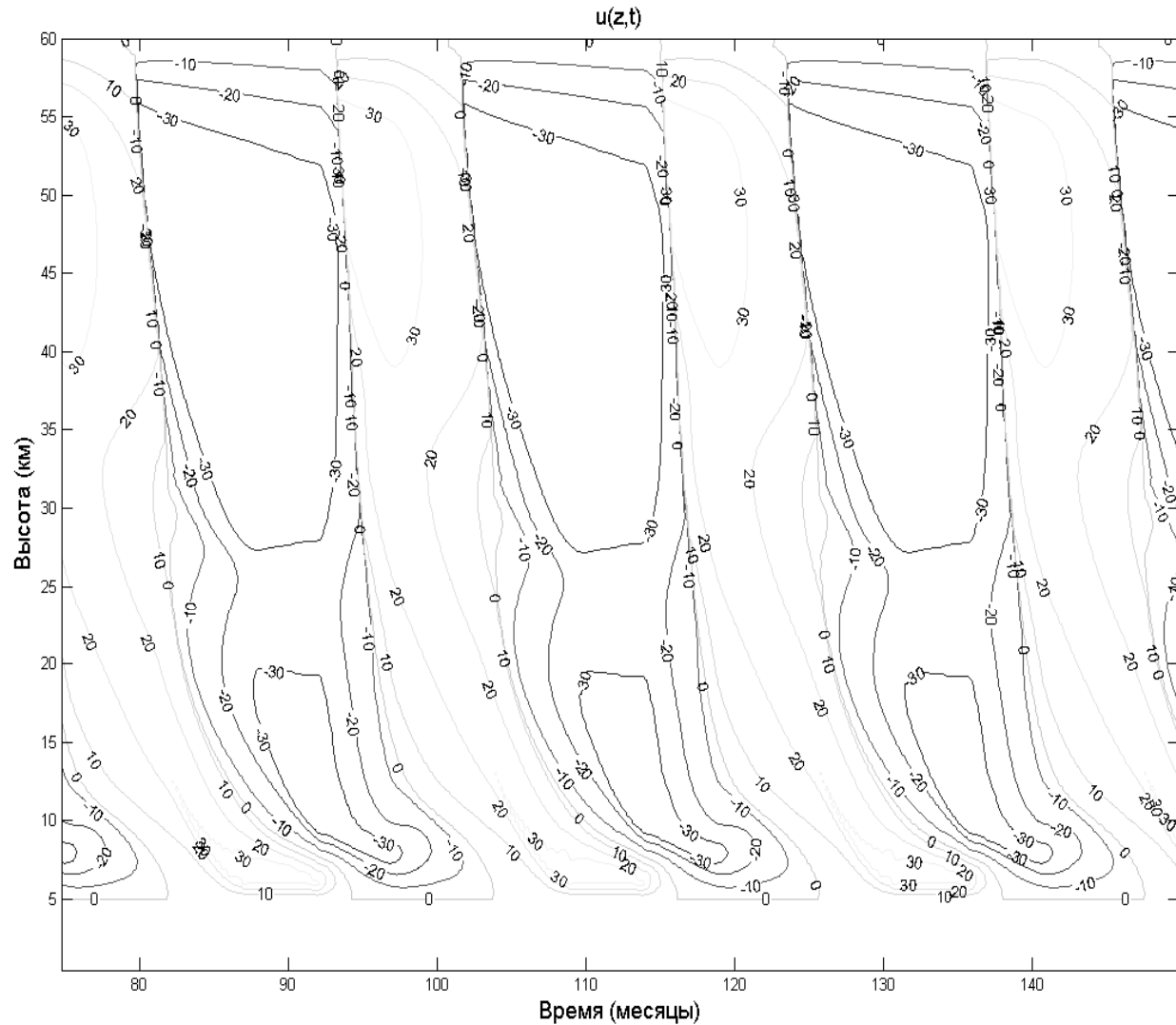
Основные результаты совместного моделирования:

- **основное взаимодействие длинных экваториальных волн с зональным потоком происходит в нижних слоях стратосферы, максимум амплитуды колебаний, возбуждаемых этим механизмом, находится в нижней стратосфере**
- **обрушение гравитационных волн происходит в верхней стратосфере, гравитационные волны играют второстепенную роль в формировании периода КДК, доставляя достаточное количество движения для его реализации в верхних слоях, происходит перераспределение потока от гравитационных волн, вследствие изменения профиля средней скорости. Механизм возбуждения колебаний от гравитационно-волнового сопротивления также реализуется, но подстраиваясь под колебания в нижних слоях.**

Для демонстрации модуляции длинными волнами колебаний, возбуждаемых короткими гравитационными волнами, на рисунке приведен результат численного эксперимента с не симметричными характеристиками длинных волн, где фазовая скорость восточной волны больше, при этом характеристики гравитационных волн оставались симметричными.

Видно, что установился общий устойчивый несимметричный профиль колебаний.

Вероятно, несимметричная меняющаяся структура КДК на разных высотах обусловлена длинными волнами, передающих максимальный поток в этих зонах.



Применение результатов в модели общей циркуляции ИВМ РАН

Подбором параметров
удается получать только
годовой цикл с
реалистичными
значениями амплитуды

**Значения характеристик
параметризации Хинса
для трехмерной модели**

$$h = 10^{-5} \text{ \AA}^{-1},$$

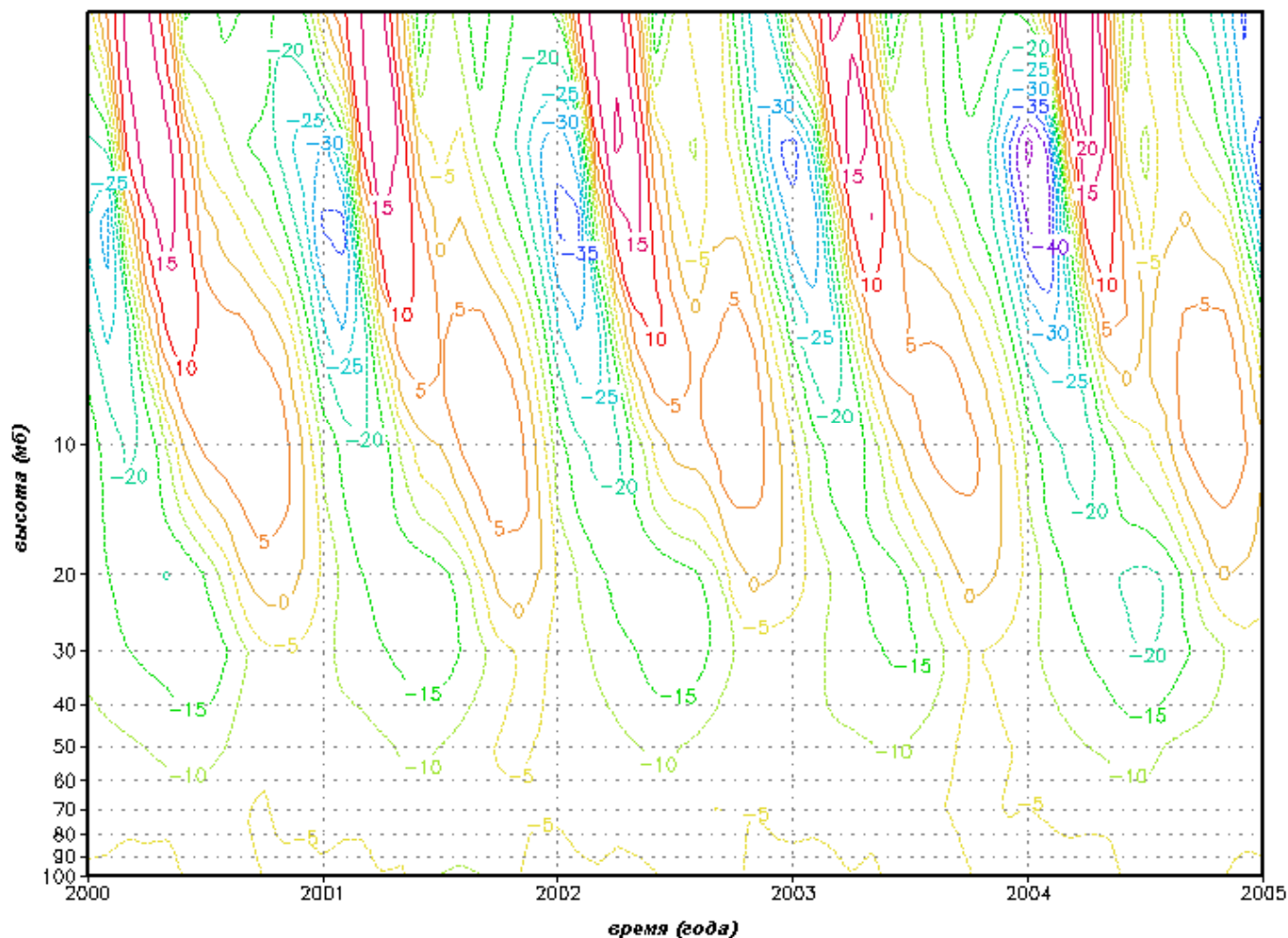
$$\sigma_0^2 = 1.5 \text{ \AA}^2 / \tilde{n}^2,$$

$$m_{\min} = 0.3 \cdot 10^{-4} \text{ \AA}^{-1},$$

$$\Phi_1 = 0.3,$$

$$\Phi_2 = 1.5$$

INM GCM model



Выводы

- Методами численного моделирования рассмотрены два механизма возбуждения КДК на основе малопараметрических моделей. Показана возможность каждого из них самостоятельно воспроизвести аналог КДК в упрощенной системе.
- Исследованы зависимости характеристик колебаний от параметров модели в обоих случаях. Их следует считать качественными, поскольку они были получены для относительно простых моделей.
- Выведены условия, необходимые для реализации КДК в глобальных моделях: для адекватного воспроизведения взаимодействия длинных планетарных экваториальных волн с зональным потоком на критических уровнях в экваториальной стратосфере необходимо высокое пространственное разрешение. Получение картины, близкой к реальным КДК, для механизма обрушения гравитационных волн возможно только в очень узком диапазоне параметров, что делает маловероятным утверждение, что этот механизм является ведущим в формировании КДК с реальными характеристиками.
- При совместном включении двух волновых источников ведущую роль в формировании периода и несимметрии восточной и западной фаз КДК играют планетарные волны, гравитационные же волны играют второстепенную роль, подкачивая недостающую энергию в колебательную систему. По-видимому, в данном случае имеет место некий механизм синхронизации двух систем, однако, это утверждение требует дальнейших тщательных исследований.