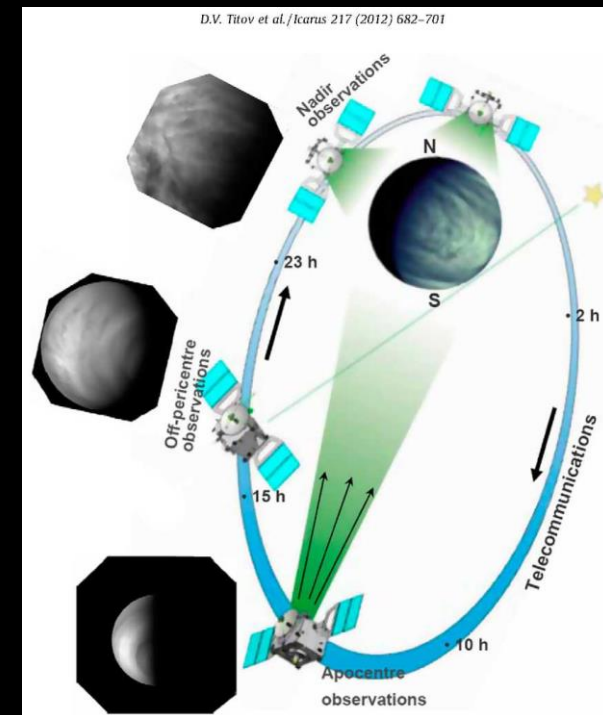
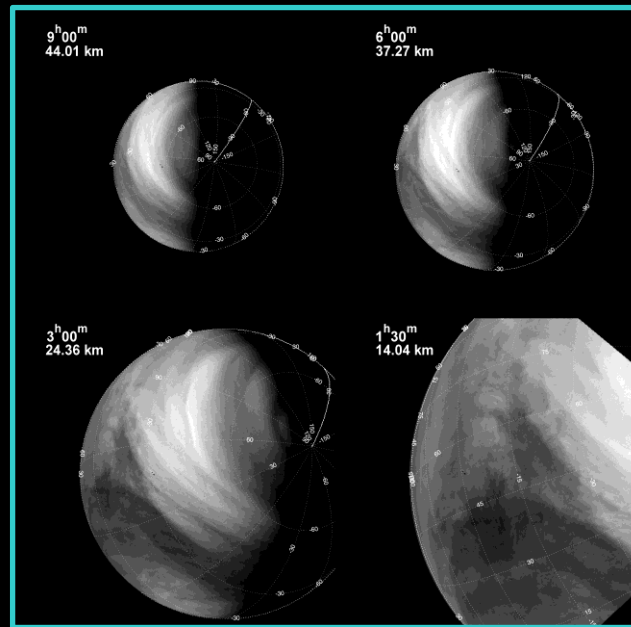
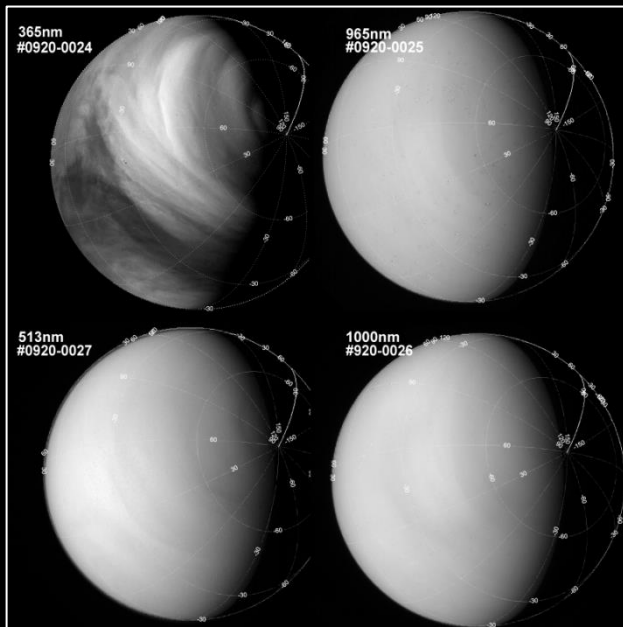


**Циркуляция мезосферы Венеры по данным
многолетних наблюдений VMC в
ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном
каналах с борта
Venus Express**

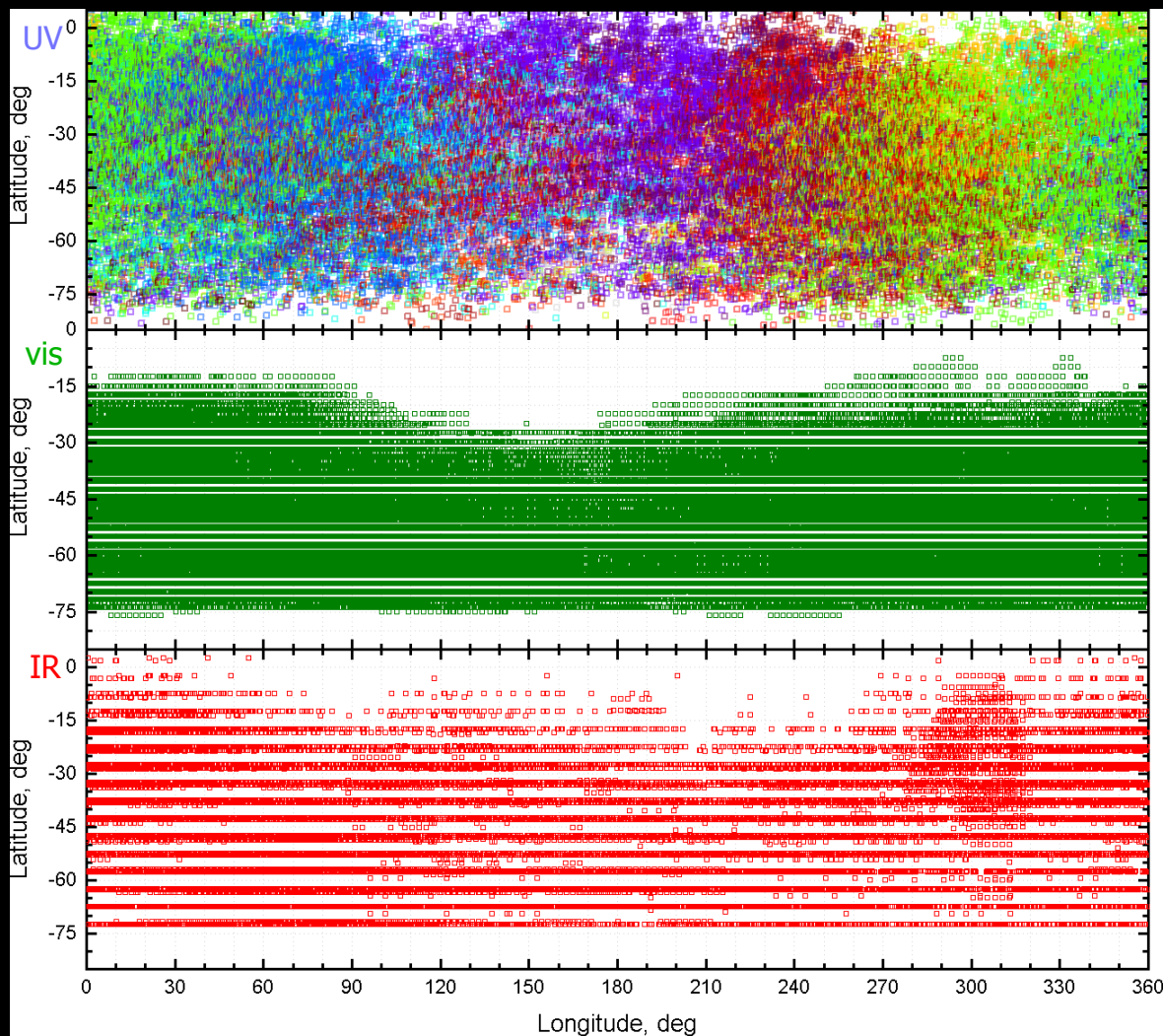
Хатунцев И.В., Пацаева М.В., Титов Д.В., Тюрин А.В., Игнатъев Н.И.,
Федорова А.А., Засова Л.В., Берто Ж.-Л.

Venus Monitoring Camera (VMC) на борту Venus Express



- Venus Express вышел на высокоэллиптическую полярную орбиту Венеры 19 апреля 2006 г; проработал до 18 января 2015 г. Время жизни - 9 лет, 37 дней.
- Высота в апоцентре – 66000 км, в перицентре – 250-350 км, период обращения - ~24 ч.
- Venus Monitoring Camera имела 4 канала (365нм, 513нм, 965нм и 1010нм); Поле зрения -17.5°.
- За 9 лет наблюдений VMC с борта Venus Express получила изображения облачного покрова планеты для ~3000 орбит (13 «сезонов»).
- Для исследования циркуляции использовались изображения с разрешением от 50 км/пиксель в апоцентре до 9 км/пиксель (h=12000 км).

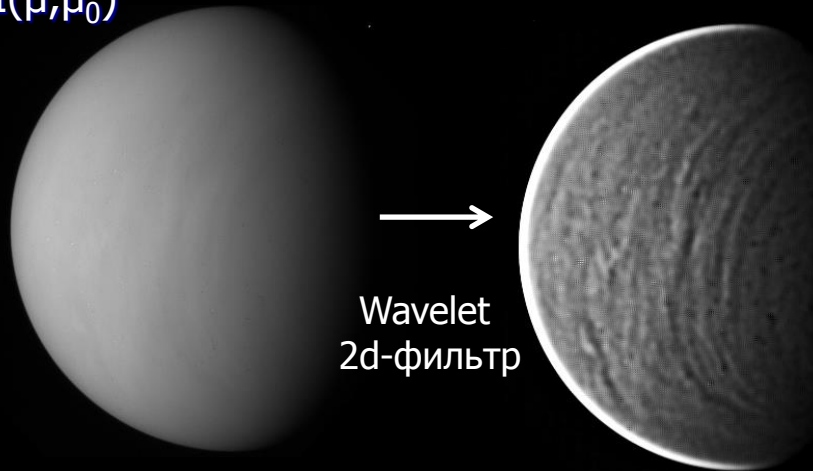
Широтно-долготное покрытие измерениями



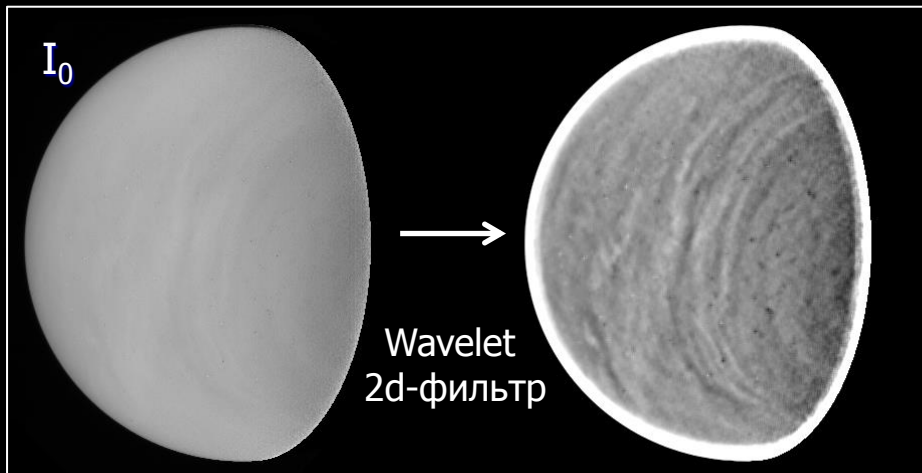
- Интервал наблюдений – 2006/05-2013/09;
- Сплошное покрытие по долготе во всех каналах;
- Наилучшее покрытие по широте в УФ. В видимом и ИК каналах экваториальные широты покрыты измерениями плохо из-за особенностей стратегии наблюдений и низкой контрастности изображений. Усиление контрастности изображений «съедает низкие широты».

Коррекция видимых и ИК изображений

$I(\mu, \mu_0)$



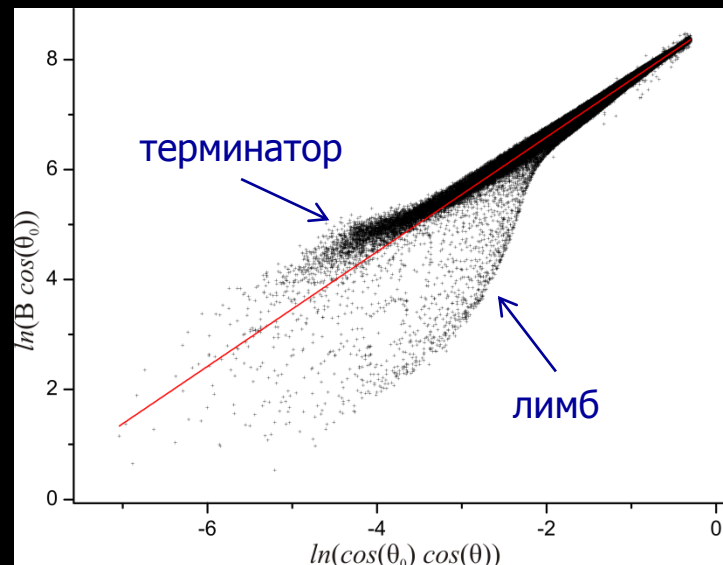
Закон Миннарта (Minnaert)



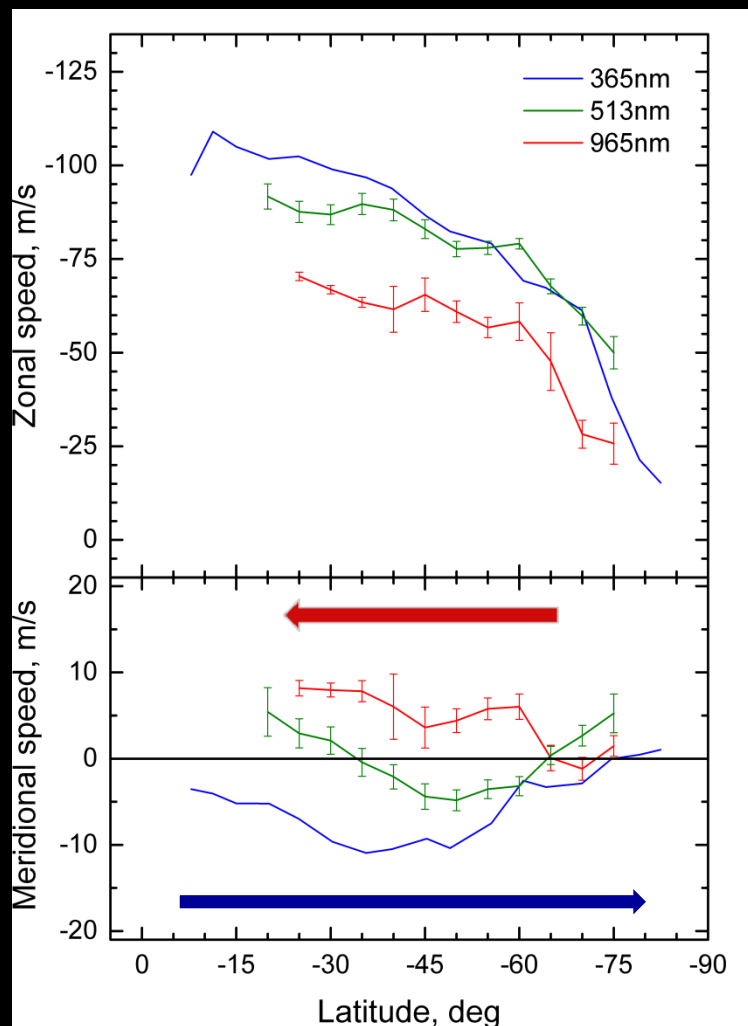
- Закон Миннарта для твердых поверхностей:

$$I(\mu, \mu_0) = I_0 \mu^{k-1} \mu_0^k$$

- где $I(\mu, \mu_0)$ – яркость пикселя исходного изображения, I_0 – яркость пикселя, когда Солнце в зените и наблюдения в надир, μ – косинус угла наблюдения, μ_0 – косинус зенитного угла Солнца, k – коэффициент регрессии
- Коэффициент регрессии меняется от изображения к изображению в диапазоне от 0.9 до 1
- В большинстве случаев для коррекции изображений можно использовать $k=0.95$



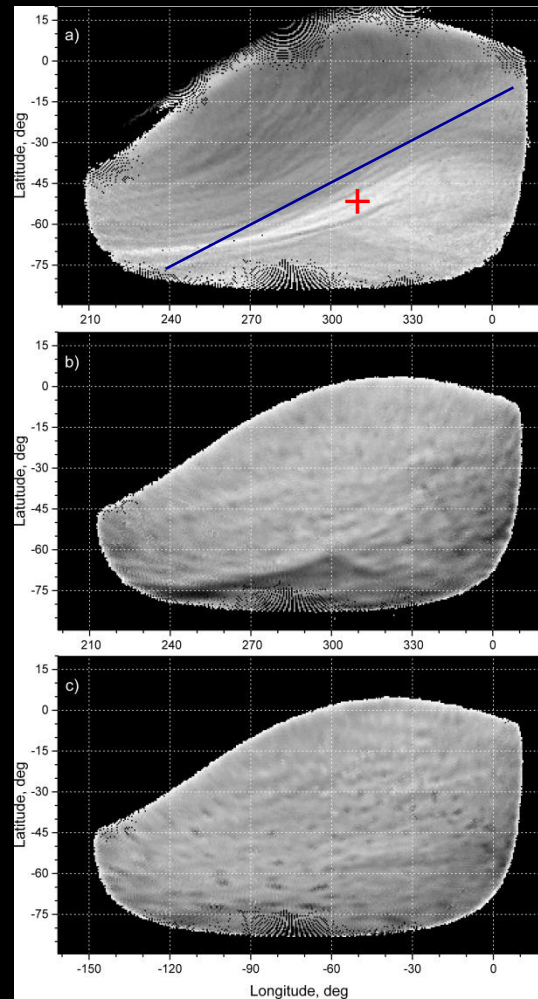
Примеры орбит: #1113



365 нм

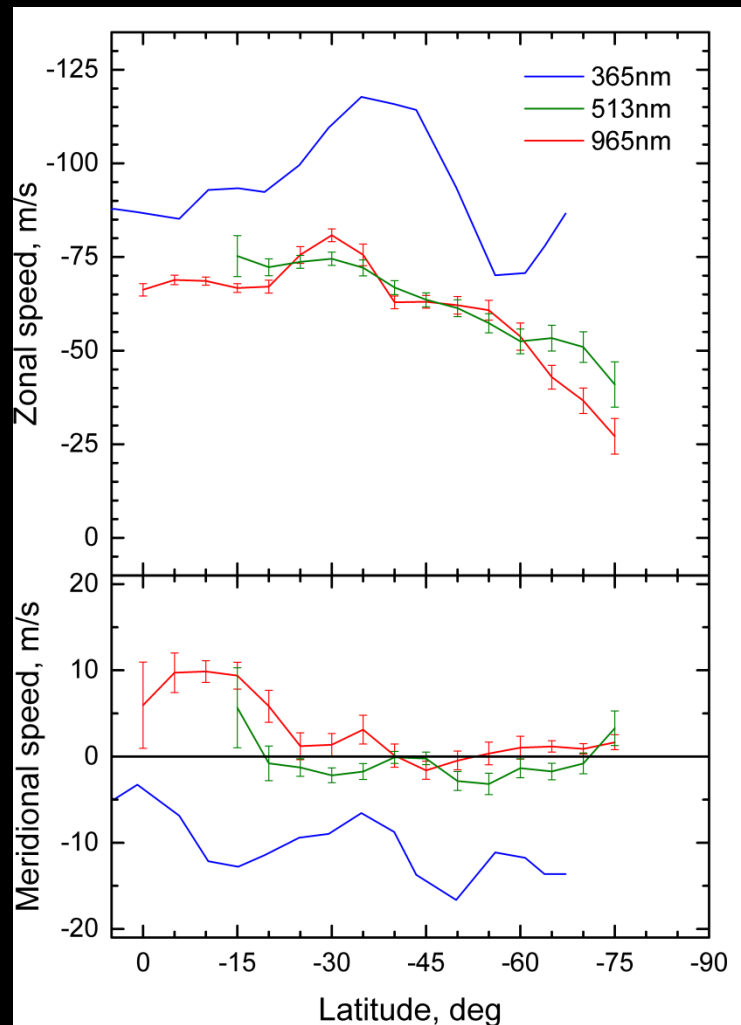
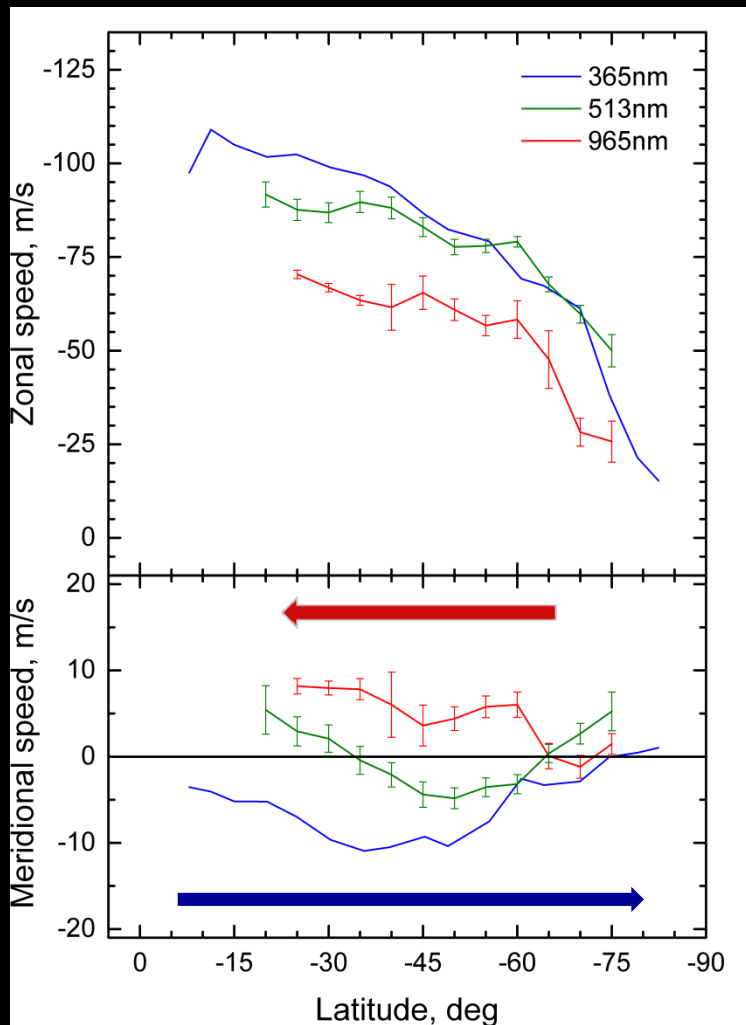
513 нм

963 нм



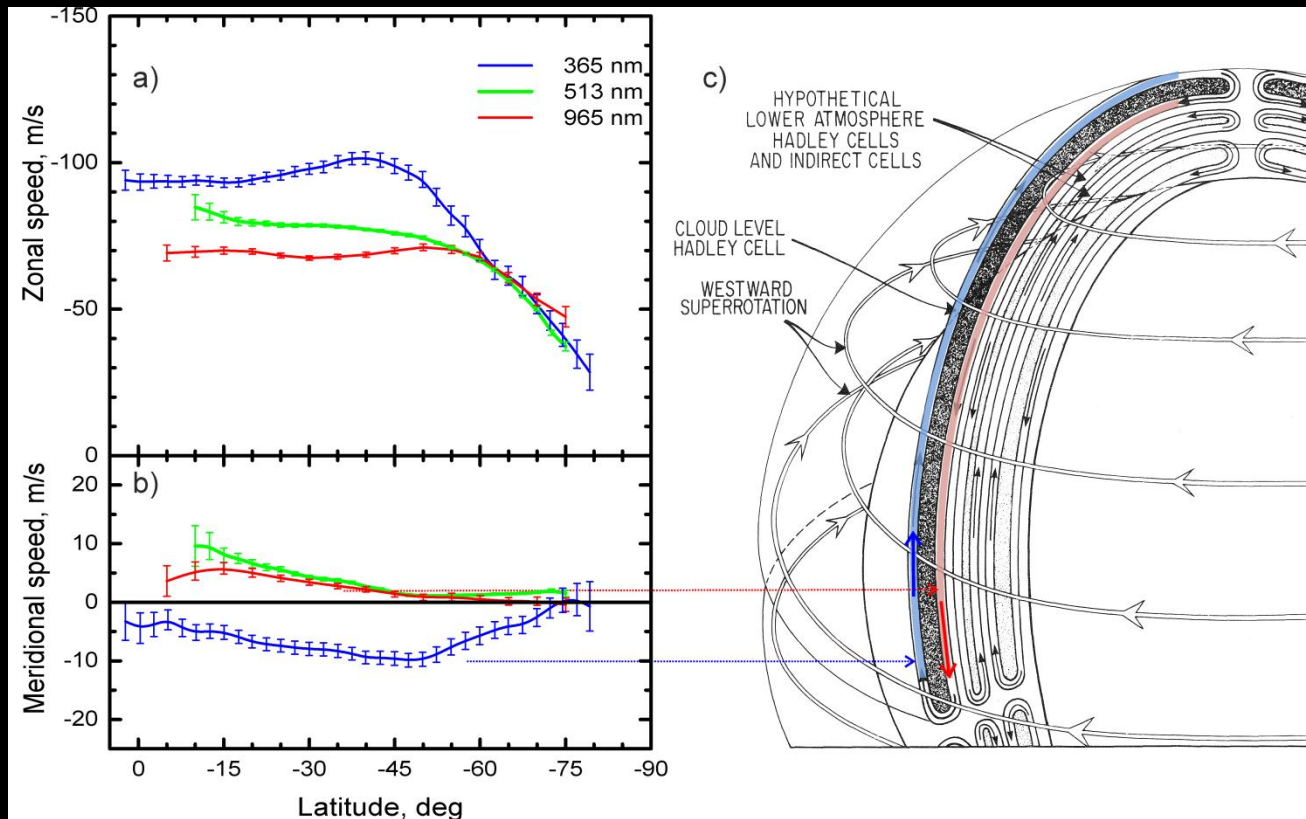
Ветвь Y-структуры проходит через все поле зрения (быстрая фаза), поэтому зональная компонента имеет характерный убывающий тренд в области низких-средних широт.

Примеры орбит: #1113 и #0922



- Для орбиты #0922 в поле зрения наблюдается «ножка» Υ (медленная фаза), поэтому зональная компонента в области низких-средних широт близка к константе или слабо растет по абсолютной величине.
- В быстрой фазе экваториального пояса (слева) средняя зональная скорость $\langle u \rangle$ в видимом диапазоне близка к значениям, полученным в УФ; в медленной фазе (справа) – значениям, полученным в ИК.

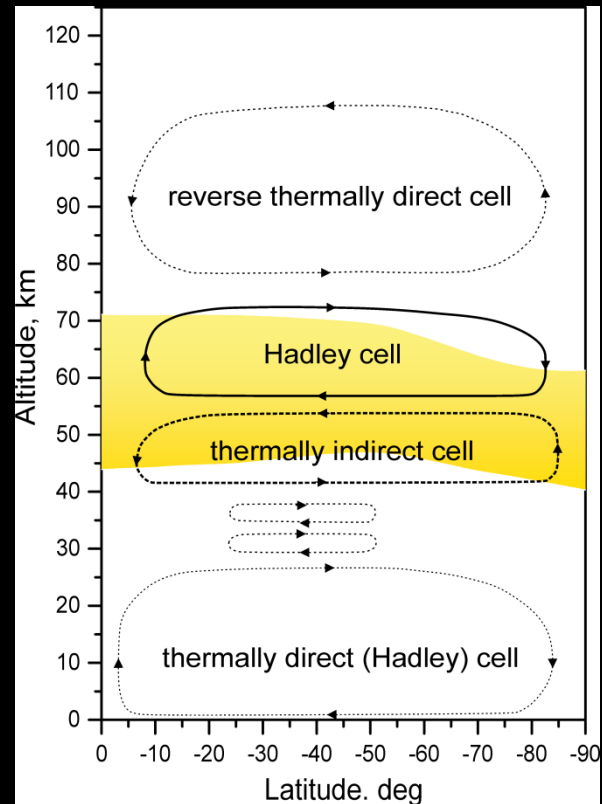
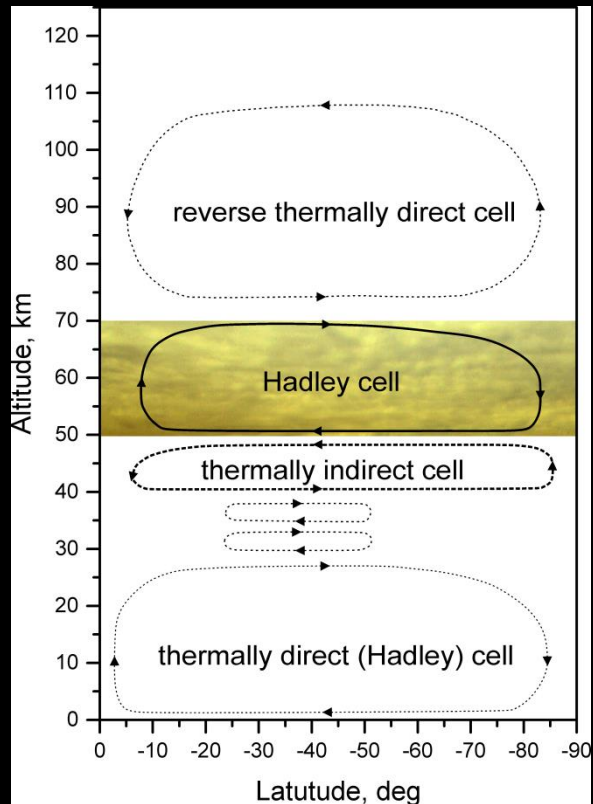
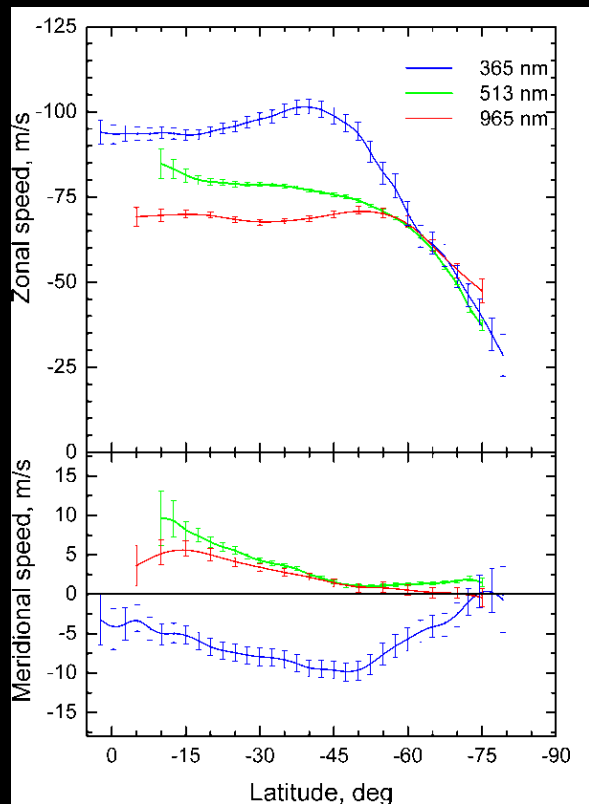
Циркуляция атмосферы Венеры на дневной стороне внутри облачного слоя



Средний зональный (a) и меридиональный (b) широтный профили скорости ветра. Синим обозначены данные, полученные в УФ (Khatuntsev et al., 2013) на верхней границе облаков, красным – данные из глубины облачного слоя по ИК измерениям (Khatuntsev et al., 2017), зеленым – данные, полученные в видимом диапазоне. с – схематическое изображение ячеек Хедли в атмосфере Венеры согласно Schubert et al. (1983)

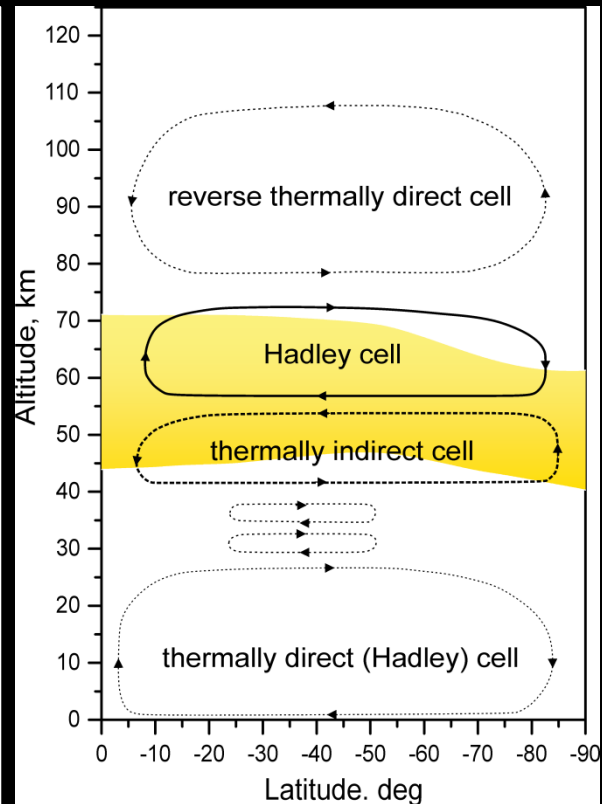
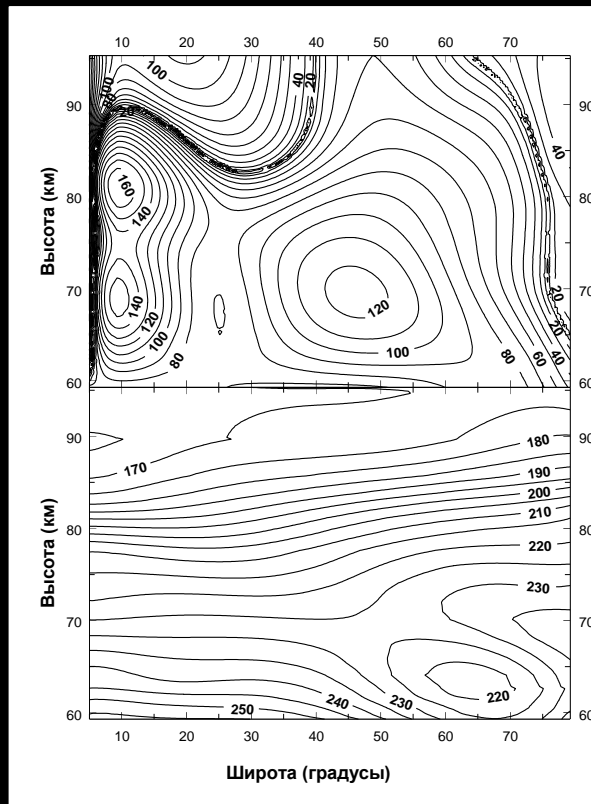
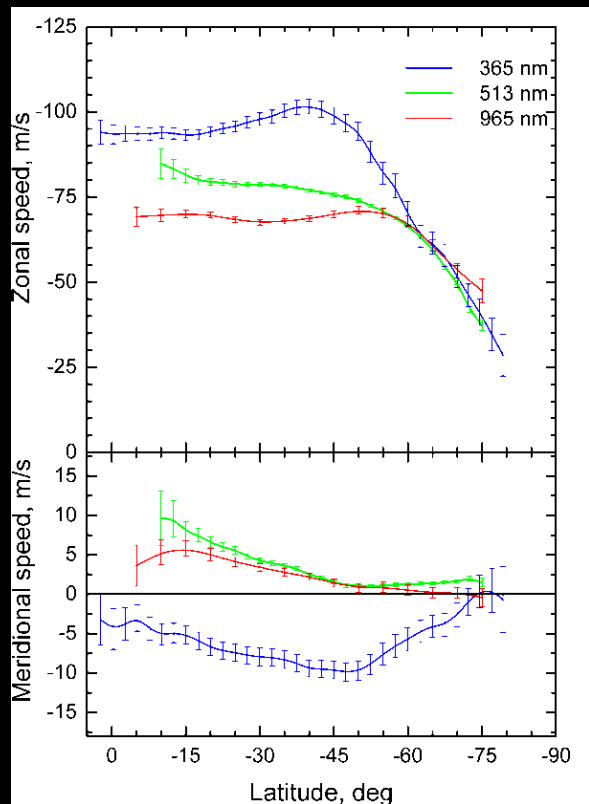
- По изображениям дневной, освещенной, стороны облачного покрова Венеры, полученным VMC с борта Venus Express проведены многолетние наблюдения (2006-2013) ячейки Хедли облачного слоя.
- В УФ вблизи верхней границы облаков наблюдается меридиональный перенос от экватора к полюсу – восходящая ветвь ячейки.
- В видимом диапазоне и ИК наблюдается меридиональный перенос от полюса к экватору – нисходящие ветви.

Средние широтные профили и меридиональная циркуляция



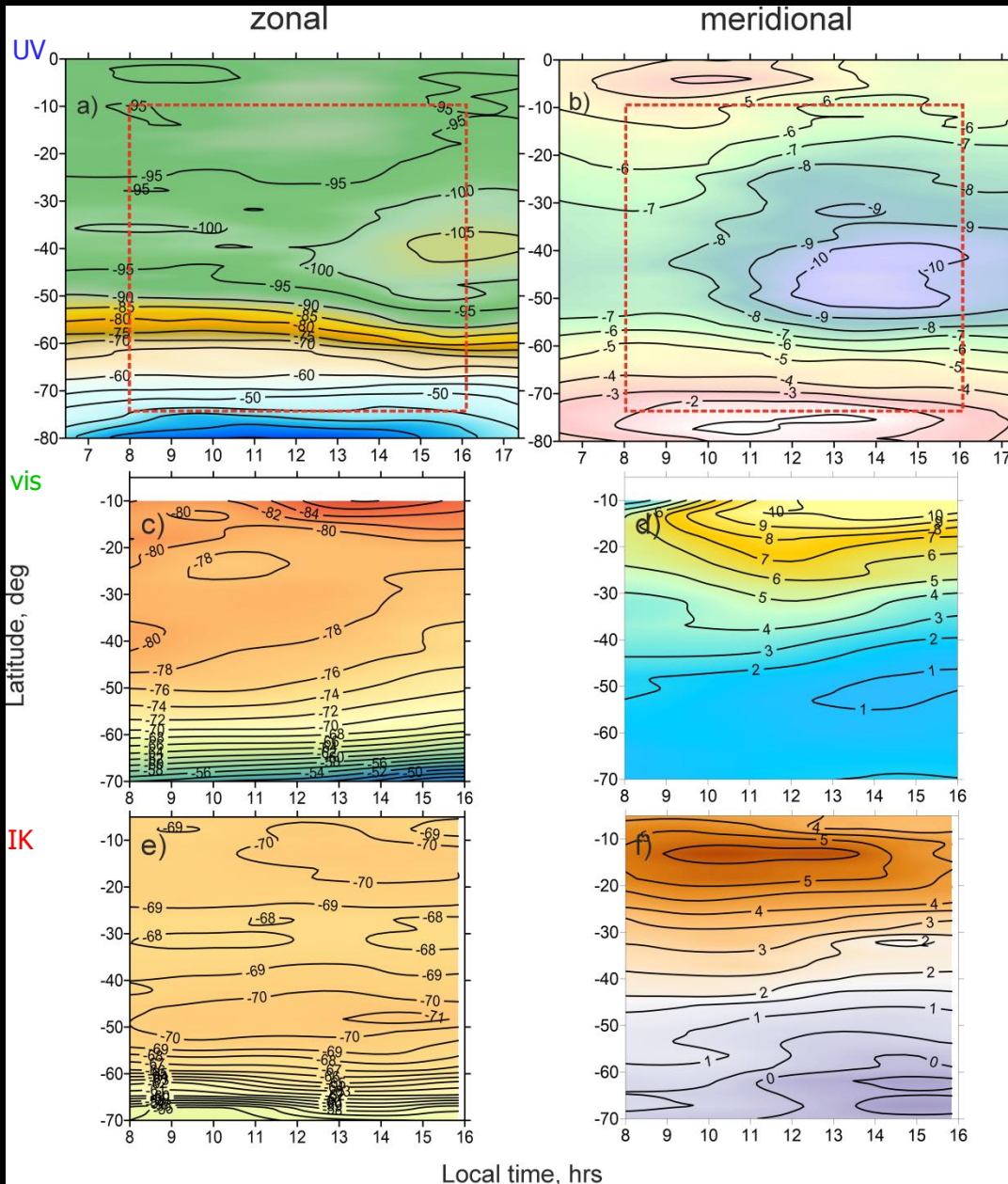
- Векторные поля скорости горизонтального потока, полученные по изображениям в видимом диапазоне (513 нм) предоставили информацию о динамике наблюдаемого слоя между УФ и ИК слоями на высоте 59-63 км.
- Нижняя граница ячейки Хедли не совпадает с нижней границей облачного слоя.

Средние широтные профили и меридиональная циркуляция



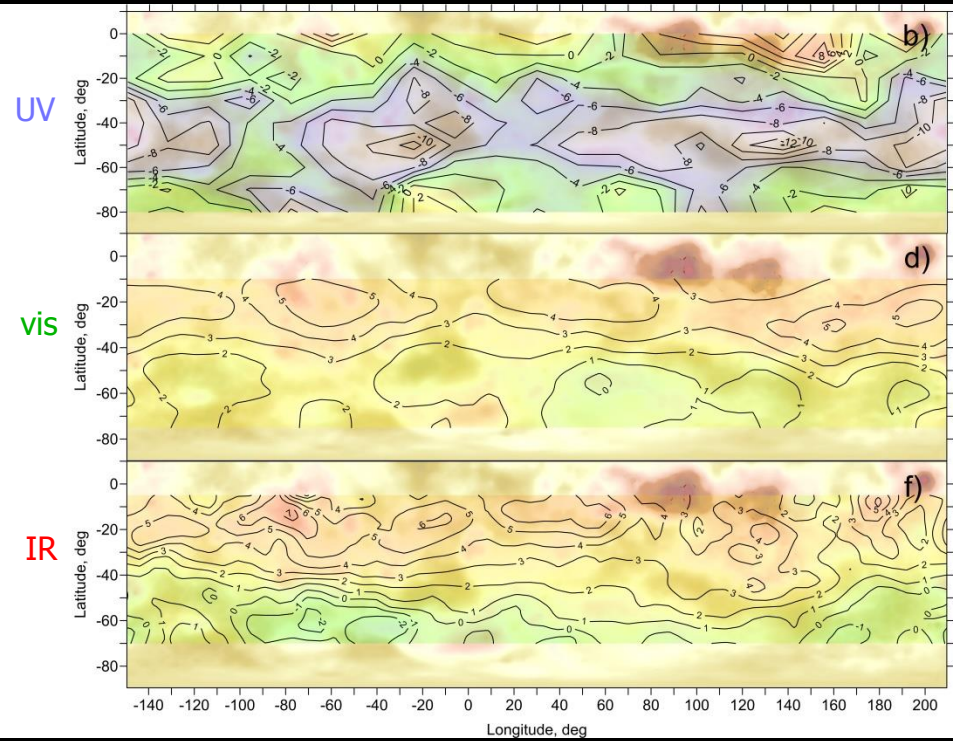
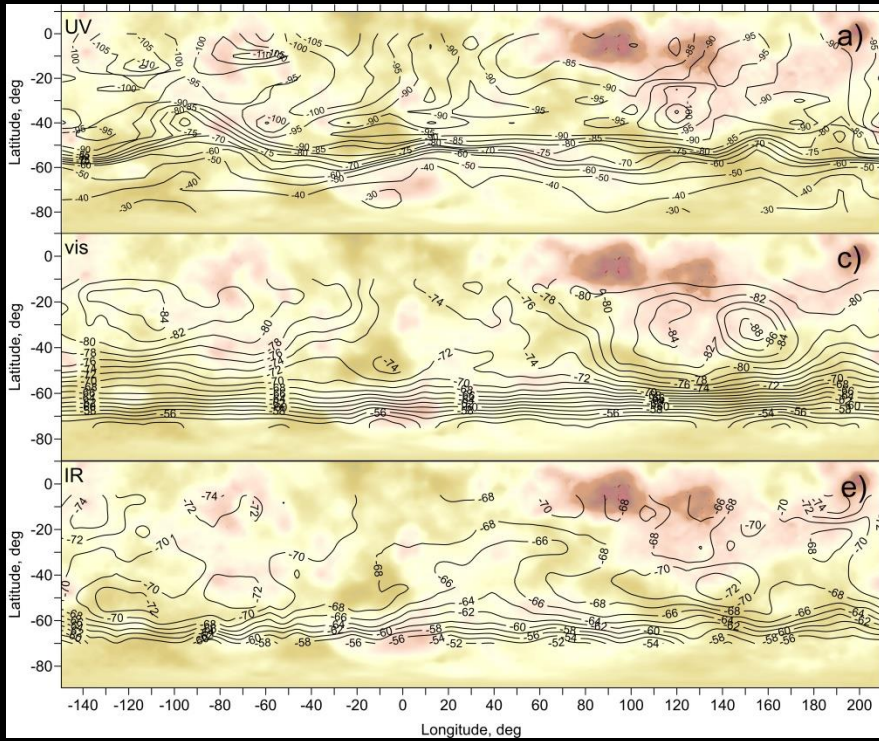
- Рост средней зональной скорости в низких широтах согласуется с результатами расчетов термического ветра, полученным по температурным полям ФС/Венера-15.
- Также этот результат согласуется с результатами моделирования GCM, предсказывающими существование «экваториального джета».

Зависимость от местного солнечного времени



- Сравнение двумерных полей в координатах местное время – широта для трех каналов свидетельствует о быстром снижении роли солнечно-связанных эффектов по мере погружения в глубину венерианских облаков.
- Наиболее существенные вариации скорости наблюдаются в УФ, на верхней границе облаков, где поглощается более трети солнечной энергии неизвестным УФ поглотителем.
- В видимом диапазоне как зональные, так и меридиональные компоненты имеют дневной максимум около -15° ю.ш. Более-менее значимые вариации наблюдаются в низких широтах.
- В ИК диапазоне солнечно-связанные вариации наблюдаются на пределе точности измерений. Т.е. практически отсутствуют.

Зависимость от долготы



- Горизонтальный поток в низких широтах демонстрирует вариации скорости, которые могут быть связаны с рельефом подстилающей поверхности.
- Внешние проявления влияния рельефа на динамические процессы в атмосфере усиливаются с высотой наблюдаемого слоя. На верхней границе облаков гравитационные волны, порождаемые рельефом, приводят к торможению среднего зонального потока.
- Особенно заметно влияние рельефа материковой возвышенности Земли Афродиты .

Выводы

- По многолетним сериям последовательных изображений облачного покрова дневной стороны Венеры, сделанным камерой VMC, получены важные сведения о циркуляции атмосферы на разных высотах (55 ± 4 , 61 ± 2 и 70 ± 2 км).
- Проведены многолетние наблюдения ячейки Хедли облачного слоя на дневной, освещенной, стороне Венеры.
- Сравнение поведения меридиональной компоненты скорости в видимом и ИК каналах свидетельствует в пользу того, что нижняя граница ячейки Хедли не совпадает с нижней границей облачного слоя, и находится на высоте около 60 км.
- Возможно, в ИК диапазоне (~ 55 км) внутри облачного слоя наблюдается верхняя ветвь уже следующей, ниже лежащей, ячейки Хедли. Т.е. в облачном слое существует более одной ячейки Хедли.
- Сравнение двумерных полей в координатах местное время – широта для трех каналов свидетельствует о быстром снижении роли солнечно-связанных эффектов по мере погружения в глубину венерианских облаков.
- Проведено детальное исследование влияния рельефа подстилающей поверхности на динамические процессы в облачном слое. Внешние проявления влияния рельефа на динамические процессы в атмосфере усиливаются с высотой наблюдаемого слоя. На верхней границе облаков волновые процессы, порождаемые рельефом, приводят к торможению среднего зонального потока над Землей Афродиты.