

**Международная конференция "Физика атмосферы и климата",
посвященная 70-летию Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН**

Структурная устойчивость композитных вихрей в бароклинных моделях Большого Красного Пятна Юпитера

Аракелян Е.М. (1,4), Жмур В.В. (1,2,4) Чхетиани О.Г. (3) Фомин Ю.В. (4)

1 - Московский физико-технический институт

2 - Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

3 - Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

4 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

6-9 апреля 2026

г. Кисловодск

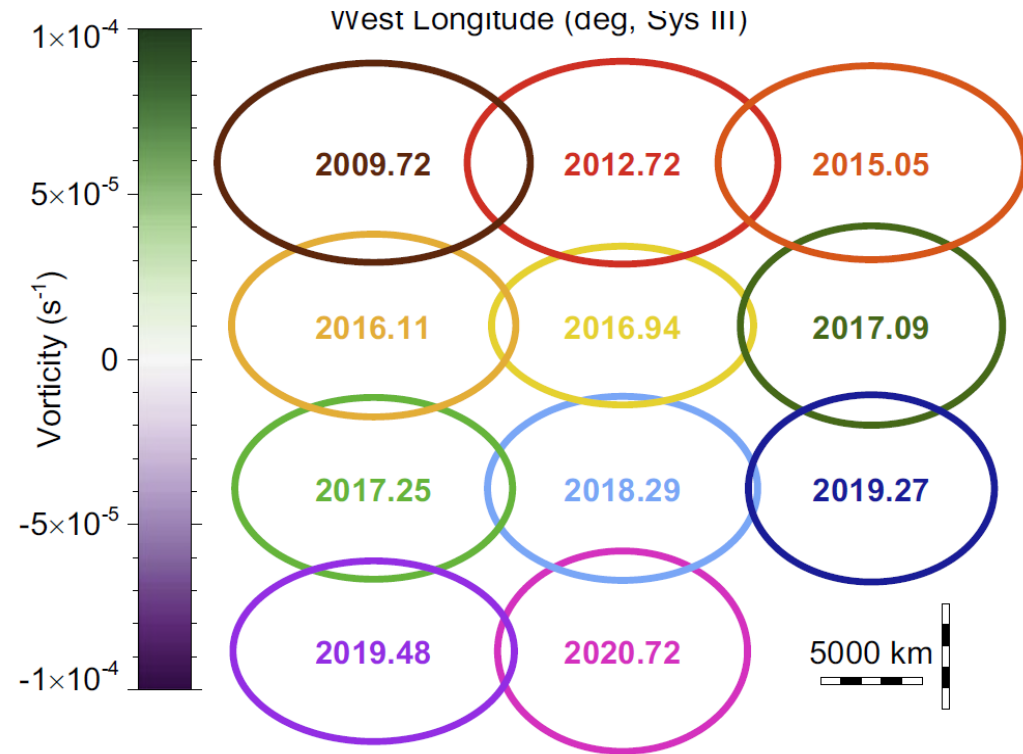


Hubble Space Telescope Wide Field Camera 3 (HST/WFC3)

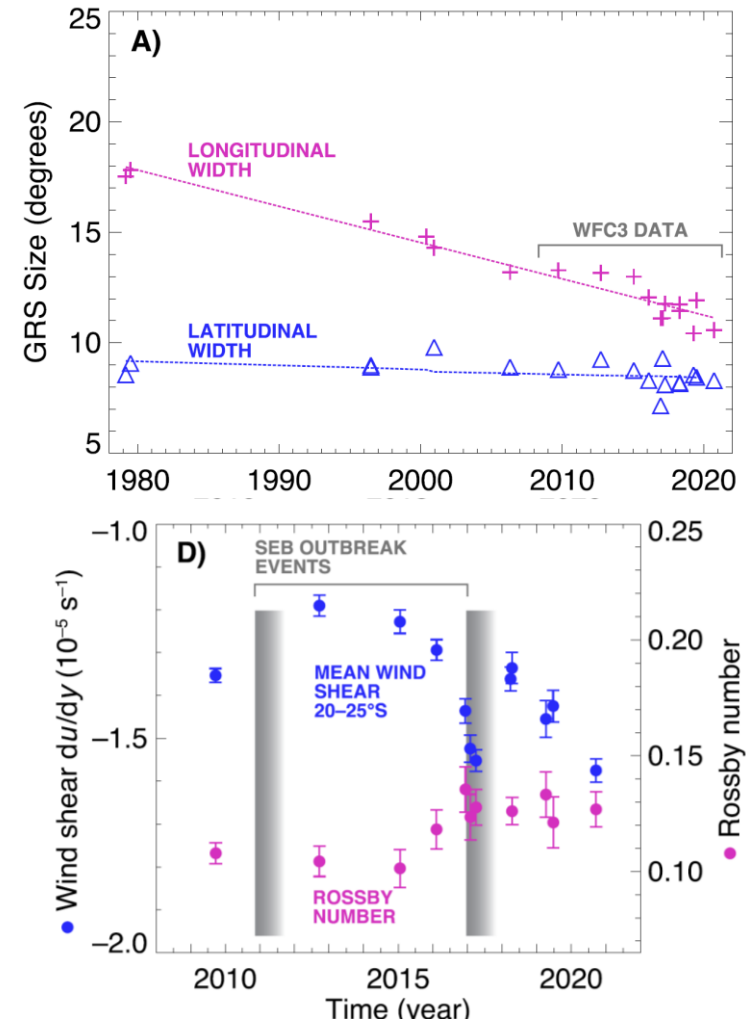
Спектральный диапазон от ультрафиолета до ближнего инфракрасного
длины волн от 200 до 900 нм, 8 фильтров.

Пространственное разрешение ~ 160 км/пкс.

Возможность анализа отдельных регионов в соответствии с морфологией облаков.



Относительная завихренность, форма, размеры, сдвиг и число Россби БКПЮ 2009-2020 (*Wong et al. 2021*)



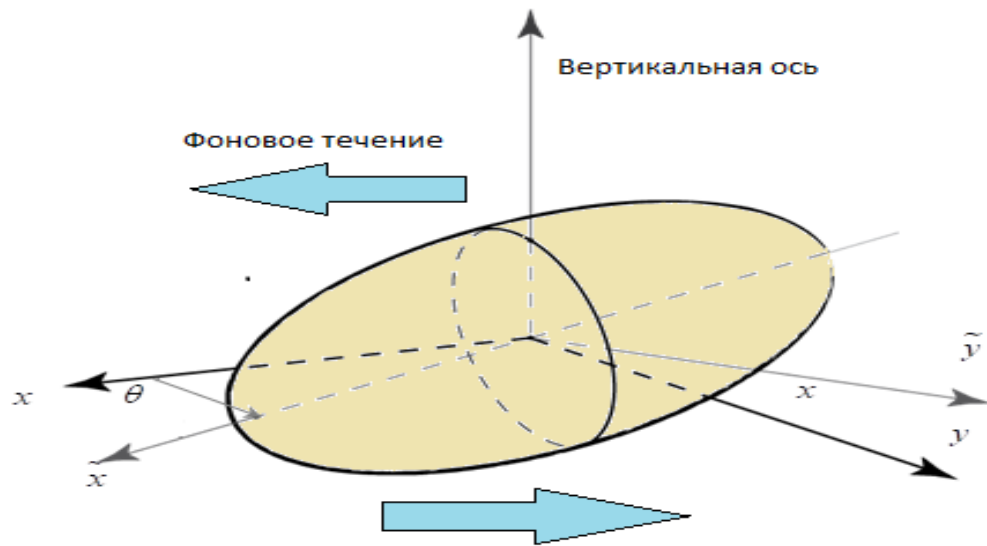
Космические аппараты	Voyager 1979	Galileo 1996	Cassini 2000	HST 2006
----------------------	--------------	--------------	--------------	----------

Теоретические Модели Большого Красного Пятна Юпитера

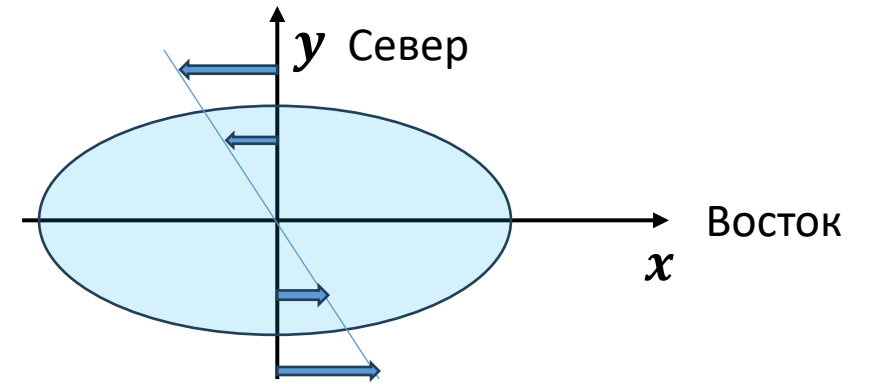
- Тэйлоровская колонка: *Hide* 1961; *Ingersoll* 1969
- Долгоживущий вихрь: *Golitsyn* 1970
- Эллиптический вихрь с учетом экмановского трения: *Шулейкин* 1976
- Солитон на сдвиговом потоке: *Maxworthy, Redekopp* 1976; *Петвиашвили* 1980; Ларичев, Резник
- Солитон на сдвиговом потоке с учетом бароклинности: *Beaumont* 1980; *Незлин* 1981
- Вихрь Россби на тангенциальном разрыве: *Волокитин, Красносельских* 1981
- Статистическая механика, состояния с максимальной энтропией:
Miller et al. 1992; *Michele, Robert* 1994; *Bouchet, Sommeria* 2002; *Chavanis* 2005
- Бароклинная модель БКПЮ: *Суетин, Жмур, Чхетиани* 2023
- Композитная модель БКПЮ: *Аракелян, Жмур, Чхетиани* 2026 (в печати)

Характеристики неоднородного горизонтального течения, линейного по горизонтальным координатам в районе расположения БКПЮ

$$u(x, y) = -\Gamma y$$
$$v(x, y) = 0$$



Схематическое изображение ядра эллипсоидального вихря



Эллипсоидальная модель вихря с однородной потенциальной завихренностью ядра
Жмур, Панкратов 1989;
Жмур, Щепеткин 1992;
Meacham и др. 1994

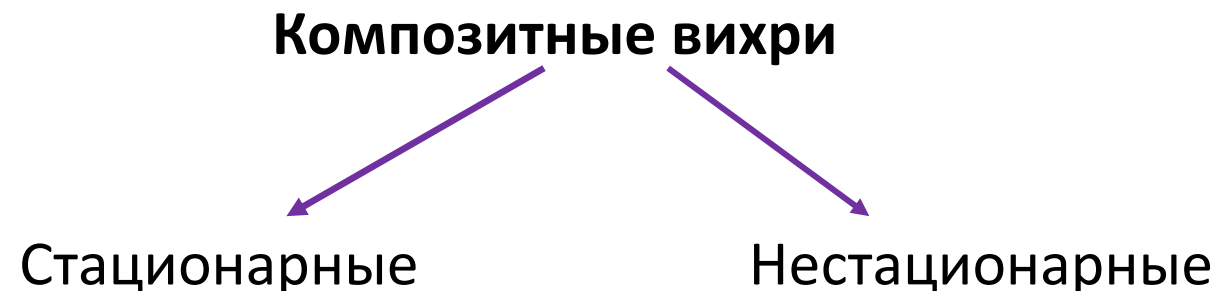
Однако в некоторых других исследованиях авторы увидели более **двухкомпонентное** строение ядра

“Changes in Jupiter’s Great Red Spot (1979–2006) and Oval BA (2000–2006)” Sushil Shetty *, Philip S. Marcus.
Икар, том 210, выпуск 1, ноябрь 2010 г., страницы 182–201),

“Mapping potential-vorticity dynamics on Jupiter. II: the Great Red Spot from Voyager 1 and 2 data” By PETER L. READ, PETER J. GIERASCH and BARNEY J. CONRATH. Q. J. R. Meteorol. Soc. (2006), 132, pp. 1605–1625,

“Velocity and vorticity measurements of Jupiter’s Great Red Spot using automated cloud feature tracking”
David S. Choi , Don Banfield , Peter Gierasch , Adam P. Showman.

В первой из цитируемой тройке работ авторы полагают, что ядро БКПЮ можно представить в виде двух соосных вихрей, вложенных в друг друга, с отличающимися завихренностями ядер этих образований. Далее такой вихрь назовем **компози́тным**.



Космические аппараты	Voyager 1979	Galileo 1996	Cassini 2000	HST 2006
$a_1, \text{ км}$	9750	9050	8200	7700
$b_1, \text{ км}$	4430	4765	5125	4815
$\varepsilon_1 = a_1/b_1$	2.2	1.9	1.6	1.6
$a_2, \text{ км}$	6000	5200	4500	4150
$b_2, \text{ км}$	2725	2735	2815	2595
$\varepsilon_2 = a_2/b_2$	2.2	1.9	1.6	1.6
Коэффициент подобия	1.625	1.74	1.82	1.86
	0.62	0.57	0.52	0.54
$M = S_2/S_1$	0.38	0.32	0.27	0.29
λ'	2.18	2.46	2.58	2.72

Элементы теории эллипсоидальных вихрей

Применимость квазигеострофического подхода в приближении f -плоскости для стратифицированной атмосферы с постоянной частотой Вайселя-Брента

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\Delta_h \psi + \frac{\partial}{\partial z} \frac{f^2}{N^2} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + J_h \left(\psi, \Delta_h \psi + \frac{\partial}{\partial z} \frac{f^2}{N^2} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

(x, y) горизонтальные координаты; z - вертикальная координата; t – время; $N = \text{const}$ частота Вайселя-Брента;

$f = \text{const}$ – параметр Кориолиса;

$\Delta_h = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ – оператор Лапласа по горизонтальным координатам;

$J_h(A, B) = \frac{\partial A}{\partial x} \frac{\partial B}{\partial y} - \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial B}{\partial x}$ – определитель Якоби (якобиан).

Потенциальная завихренность σ , является лагранжевым инвариантом.

$$\sigma = \Delta_h \psi + \frac{\partial}{\partial z} \frac{f^2}{N^2} \frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial \tilde{z}^2} = \Delta \psi \quad (2)$$

$\tilde{z}$ “растянутая” вертикальная координата $\tilde{z} = \frac{N}{f} z$

Вихрь на течении

$$\Delta \psi = \begin{cases} \sigma_{in}, & \text{если } (x, y, \tilde{z}) \in V \\ \sigma_{out}, & \text{если } (x, y, \tilde{z}) \notin V \end{cases} \quad \psi = \psi_f + \psi_v \quad (3)$$

Общее решение для вихря произвольной формы

$$\psi_v(x, y, \tilde{z}, t) = -\frac{(\sigma_{in} - \sigma_{out})}{4\pi} \iiint_V \frac{dx' dy' d\tilde{z}'}{\sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (\tilde{z} - \tilde{z}')^2}} \quad (4)$$

Функция тока для вихря эллипсоидальной формы ядра
точное решение в рамках уравнения (1)

$$\psi_v(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, t) = -\frac{1}{4}(\sigma_{in} - \sigma_{out})abc \int_{\lambda}^{\infty} \left(1 - \frac{\tilde{x}^2}{a^2 + \mu} - \frac{\tilde{y}^2}{b^2 + \mu} - \frac{\tilde{z}^2}{\tilde{c}^2 + \mu}\right) \frac{d\mu}{\sqrt{(a^2 + \mu)(b^2 + \mu)(\tilde{c}^2 + \mu)}}. \quad (5)$$

$a, b, \tilde{c}$ полуоси

Нижний предел $\lambda(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ в интеграле (5) – положительный корень кубического уравнения для внешней к ядру области

$$\frac{\tilde{x}^2}{a^2 + \lambda} + \frac{\tilde{y}^2}{b^2 + \lambda} + \frac{\tilde{z}^2}{\tilde{c}^2 + \lambda} = 1. \quad (6)$$

Для внутренних точек $\lambda = 0$. Поверхность $\lambda = \text{const}$ софокусный эллипсоид.

$$u_v = -\frac{\sigma}{2} ab\tilde{c} \int_{\lambda}^{\infty} \frac{d\mu}{(b^2 + \mu)\sqrt{(a^2 + \mu)(b^2 + \mu)(\tilde{c}^2 + \mu)}} \tilde{y} \quad (7a)$$

$$v_v = \frac{\sigma}{2} ab\tilde{c} \int_{\lambda}^{\infty} \frac{d\mu}{(a^2 + \mu)\sqrt{(a^2 + \mu)(b^2 + \mu)(\tilde{c}^2 + \mu)}} \tilde{x} \quad (7b)$$

На поверхности софокусного эллипсоида $\lambda = \text{const} > 0$ индуцированные скорости течения линейны по координатам.

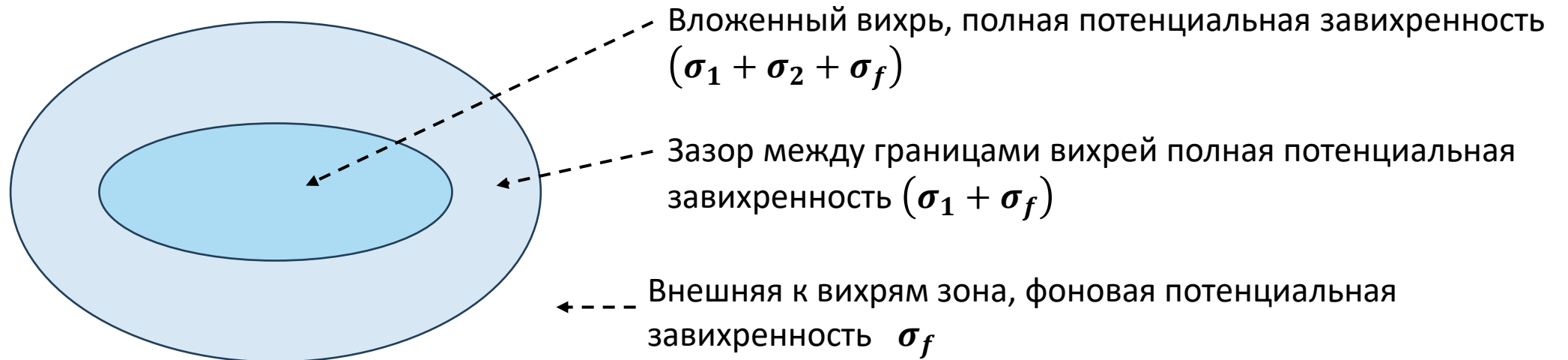
Математическая формулировка задачи о **двухкомпонентном** композитном вихре на фоновом течении.

$$\Delta\psi = \begin{cases} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_f), & \text{если точка } (x, y, \tilde{z}) \text{ попадает в область } V_2 \\ (\sigma_1 + \sigma_f), & \text{если точка } (x, y, \tilde{z}) \text{ попадает в область } V_1 \cap V_2 \\ \sigma_f, & \text{если точка } (x, y, \tilde{z}) \text{ окажется вне области } V_1 \end{cases} \quad (8)$$

V_1 - область ядра внешнего (основного) вихря, σ_2 - собственная потенциальная завихренность основного вихря;

V_2 - область ядра внутреннего (вложенного) вихря, σ_2 - собственная потенциальная завихренность вложенного вихря;

σ_f - потенциальная завихренность фонового течения.



Граничные условия границах двухкомпонентного вихря

Динамическое условие – в данном подходе выполняется автоматически

Кинематическое на двух границах $F_{1,2}(x, y, \tilde{z}, t) = 0$. Кинематическое условие непротекания частиц жидкости через границу

$$\cancel{\frac{\partial F_{1,2}}{\partial t}} + u \frac{\partial F_{1,2}}{\partial x} + v \frac{\partial F_{1,2}}{\partial y} + \cancel{w \frac{\partial F_{1,2}}{\partial z}} = 0$$

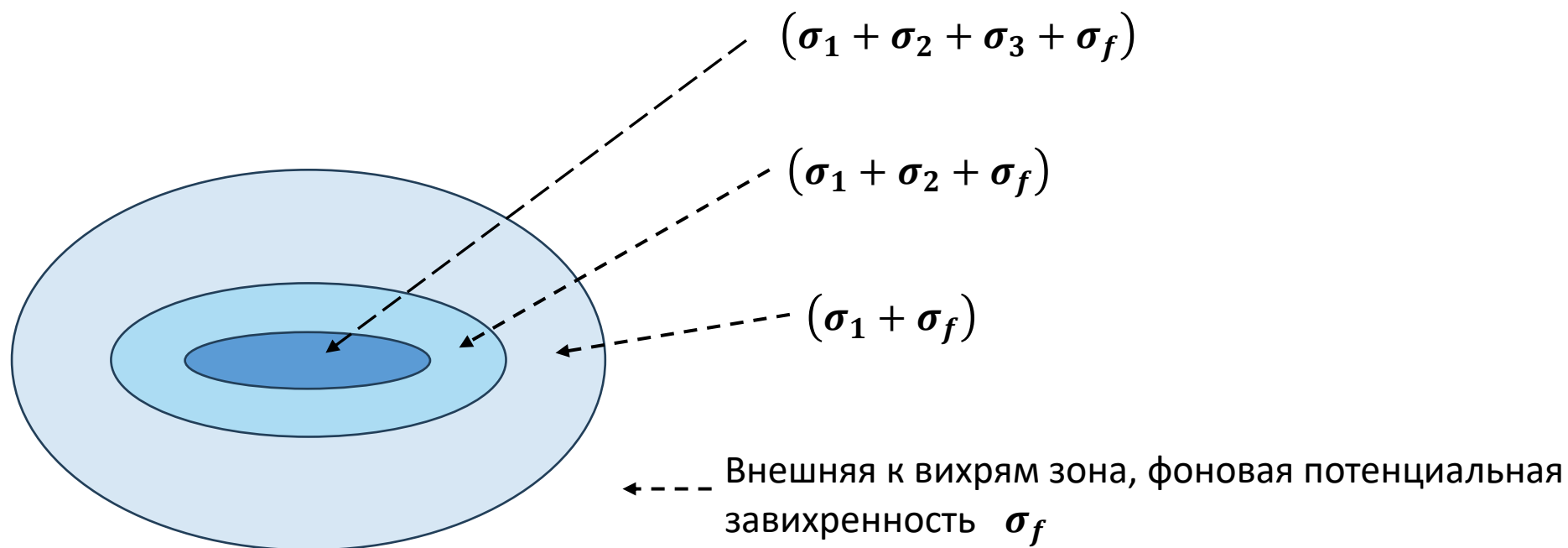
Кинематическое условие на границах **двухкомпонентного** вихря, $\Gamma_1 = \frac{\sigma_1}{\Gamma}$ $\Gamma_2 = \frac{\sigma_2}{\Gamma}$

$$\begin{cases} \Gamma_1 \left(-\beta_0^{(1)} + \varepsilon_1^2 \alpha_0^{(1)} \right) + \Gamma_2 \left(-\beta_\lambda^{(2)} + \varepsilon_1^2 \alpha_\lambda^{(2)} \right) = 2 \\ \Gamma_1 \left(-\beta_0^{(1)} + \varepsilon_2^2 \alpha_0^{(1)} \right) + \Gamma_2 \left(-\beta_0^{(2)} + \varepsilon_2^2 \alpha_0^{(2)} \right) = 2 \end{cases} \quad (8)$$

При заданной геометрии вихрей потенциальные завихренности Γ_1 и Γ_2 определяются однозначно

Математическая формулировка задачи о **трехкомпонентном** композитном вихре на фоновом течении.

$$\Delta\psi = \begin{cases} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_f) \\ (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_f) \\ (\sigma_1 + \sigma_f) \\ \sigma_f \end{cases} \quad (13)$$



Граничные условия на границах **трехкомпонентного** вихря

Кинематическое на трех границах $F_{1,2,3}(x, y, \tilde{z}, t) = 0$. Кинематическое условие непротекания частиц жидкости через три границы

$$\cancel{\frac{\partial F_{1,2,3}}{\partial t}} + u \frac{\partial F_{1,2,3}}{\partial x} + v \frac{\partial F_{1,2,3}}{\partial y} + \cancel{w \frac{\partial F_{1,2,3}}{\partial z}} = 0$$

Кинематическое условие на границах **трехкомпонентного** вихря, $\Gamma_1 = \frac{\sigma_1}{\Gamma}$ $\Gamma_2 = \frac{\sigma_2}{\Gamma}$ $\Gamma_3 = \frac{\sigma_3}{\Gamma}$

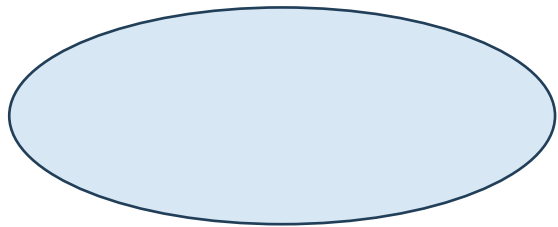
$$\begin{cases} \Gamma_1 \left(-\beta_0^{(1)} + \varepsilon_1^2 \alpha_0^{(1)} \right) + \Gamma_2 \left(-\beta_{\lambda_{21}}^{(2)} + \varepsilon_1^2 \alpha_{\lambda_{21}}^{(2)} \right) + \Gamma_3 \left(-\beta_{\lambda_{31}}^{(3)} + \varepsilon_1^2 \alpha_{\lambda_{31}}^{(3)} \right) = 2 \\ \Gamma_1 \left(-\beta_0^{(1)} + \varepsilon_2^2 \alpha_0^{(1)} \right) + \Gamma_2 \left(-\beta_0^{(2)} + \varepsilon_2^2 \alpha_0^{(2)} \right) + \Gamma_3 \left(-\beta_{\lambda_{32}}^{(3)} + \varepsilon_2^2 \alpha_{\lambda_{32}}^{(3)} \right) = 2 \\ \Gamma_1 \left(-\beta_0^{(1)} + \varepsilon_3^2 \alpha_0^{(1)} \right) + \Gamma_2 \left(-\beta_0^{(2)} + \varepsilon_3^2 \alpha_0^{(2)} \right) + \Gamma_3 \left(-\beta_0^{(3)} + \varepsilon_3^2 \alpha_0^{(3)} \right) = 2 \end{cases} \quad (9)$$

При заданной геометрии вихрей потенциальные завихренности $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ определяются однозначно

Кинематические граничные условия

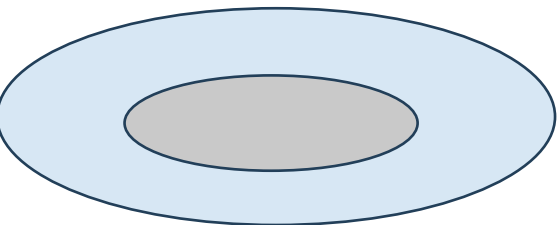
Однородный вихрь

$$\Gamma_1 \left(-\beta_0^{(1)} + \varepsilon_1^2 \alpha_0^{(1)} \right) = 2$$



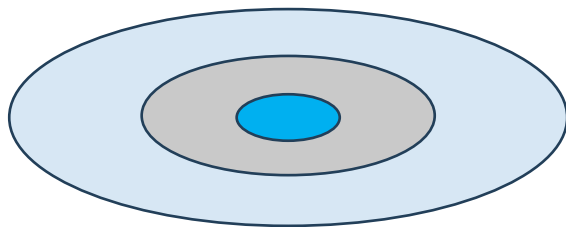
Двухкомпонентный композитный вихрь

$$\begin{cases} \Gamma_1 \left(-\beta_0^{(1)} + \varepsilon_1^2 \alpha_0^{(1)} \right) + \Gamma_2 \left(-\beta_{\lambda}^{(2)} + \varepsilon_1^2 \alpha_{\lambda}^{(2)} \right) = 2 \\ \Gamma_1 \left(-\beta_0^{(1)} + \varepsilon_2^2 \alpha_0^{(1)} \right) + \Gamma_2 \left(-\beta_0^{(2)} + \varepsilon_2^2 \alpha_0^{(2)} \right) = 2 \end{cases}$$



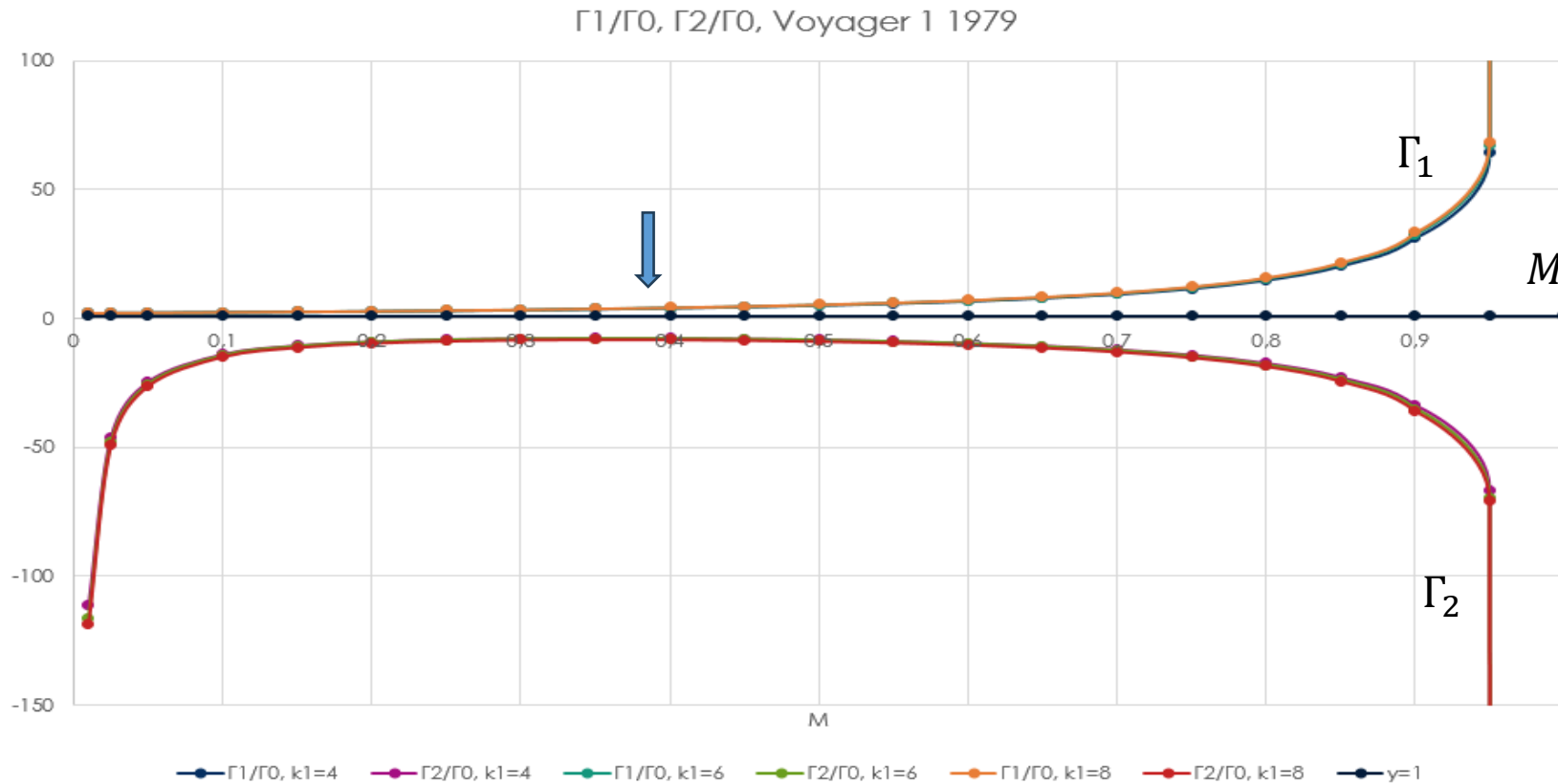
Трехкомпонентный композитный вихрь

$$\begin{cases} \Gamma_1 \left(-\beta_0^{(1)} + \varepsilon_1^2 \alpha_0^{(1)} \right) + \Gamma_2 \left(-\beta_{\lambda_{21}}^{(2)} + \varepsilon_1^2 \alpha_{\lambda_{21}}^{(2)} \right) + \Gamma_3 \left(-\beta_{\lambda_{31}}^{(3)} + \varepsilon_1^2 \alpha_{\lambda_{31}}^{(3)} \right) = 2 \\ \Gamma_1 \left(-\beta_0^{(1)} + \varepsilon_2^2 \alpha_0^{(1)} \right) + \Gamma_2 \left(-\beta_0^{(2)} + \varepsilon_2^2 \alpha_0^{(2)} \right) + \Gamma_3 \left(-\beta_{\lambda_{32}}^{(3)} + \varepsilon_2^2 \alpha_{\lambda_{32}}^{(3)} \right) = 2 \\ \Gamma_1 \left(-\beta_0^{(1)} + \varepsilon_3^2 \alpha_0^{(1)} \right) + \Gamma_2 \left(-\beta_0^{(2)} + \varepsilon_3^2 \alpha_0^{(2)} \right) + \Gamma_3 \left(-\beta_0^{(3)} + \varepsilon_3^2 \alpha_0^{(3)} \right) = 2 \end{cases}$$



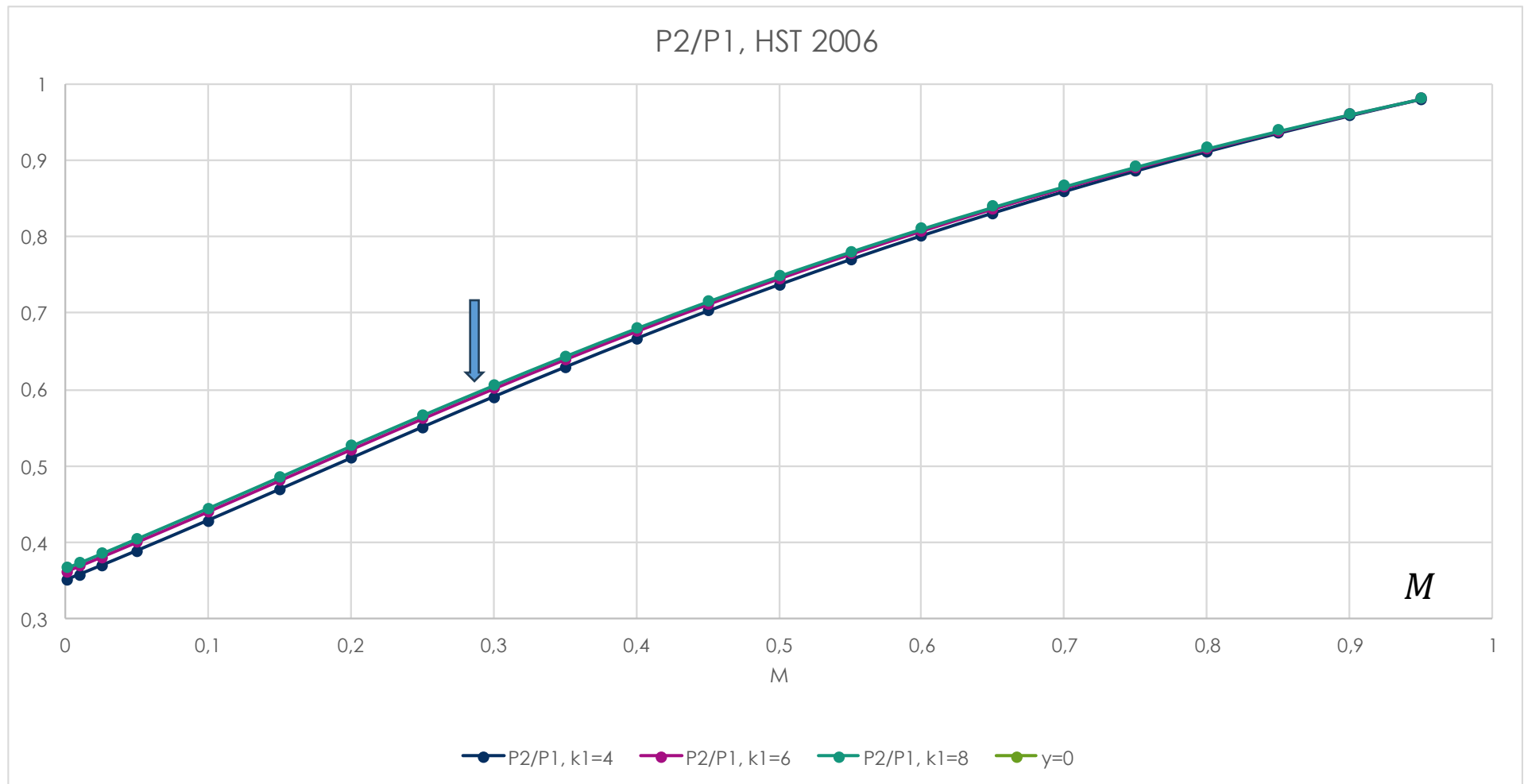
Стационарный двухкомпонентный композитный вихрь

Зависимость Γ_1 и Γ_2 БКПЮ от размера внутреннего вихря $0 < M < 1$, $M = s_2/s_1$



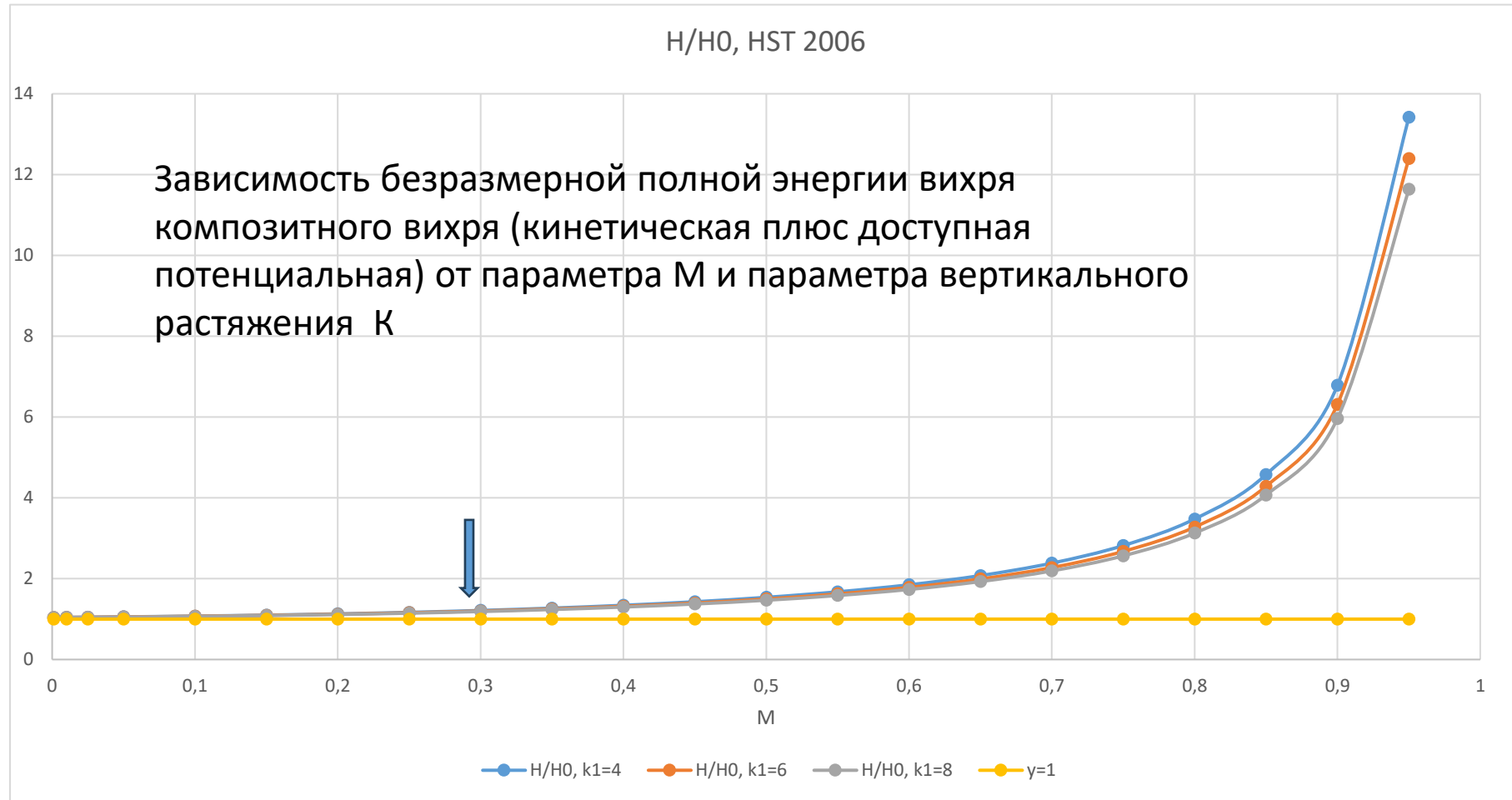
Миссия Voyager 1 1979

Собственные безразмерные завихренности внутреннего (нижняя ветвь) вихря и основного вихря (верхняя ветвь) в зависимости от безразмерного параметра $0 < M < 1$, где отношение площади вложенного вихря к площади основного вихря при виде сверху.

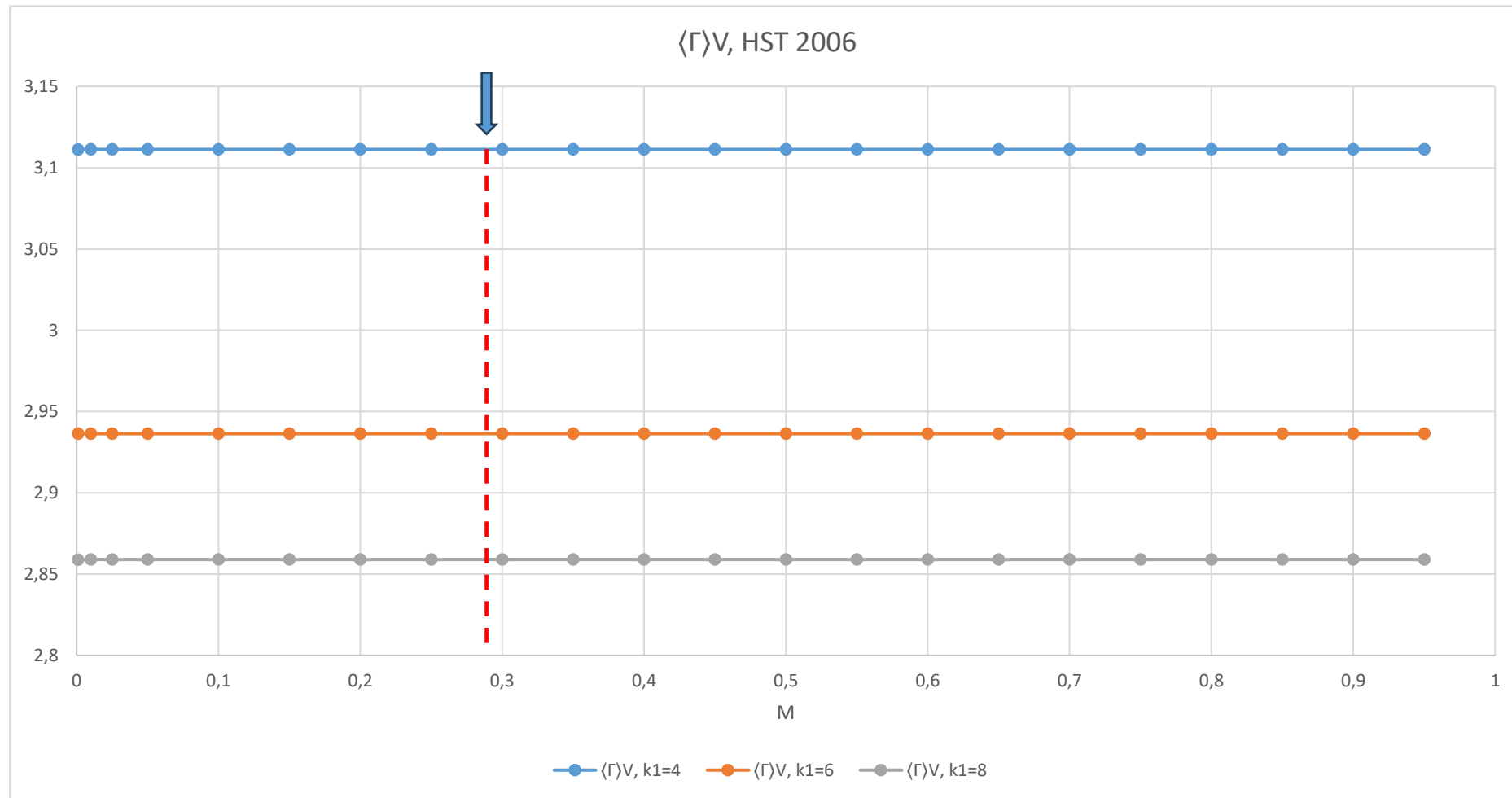


Отношение интегральных потенциальных завихренностей внутреннего вихря к внешнему $\left| \frac{\sigma_2 a_2 b_2 \tilde{c}_2}{\sigma_1 a_1 b_1 \tilde{c}_1} \right|$ для условий миссии HST 2006 для трех значений $K_1 = 4, 6, 8$. При $M \rightarrow 0$ это отношение остается конечным, несмотря на уменьшающийся объем ядра второго вихря.

С ростом параметра K_1 при фиксированном M значение $\left| \frac{\sigma_2 a_2 b_2 \tilde{c}_2}{\sigma_1 a_1 b_1 \tilde{c}_1} \right|$ немного возрастает

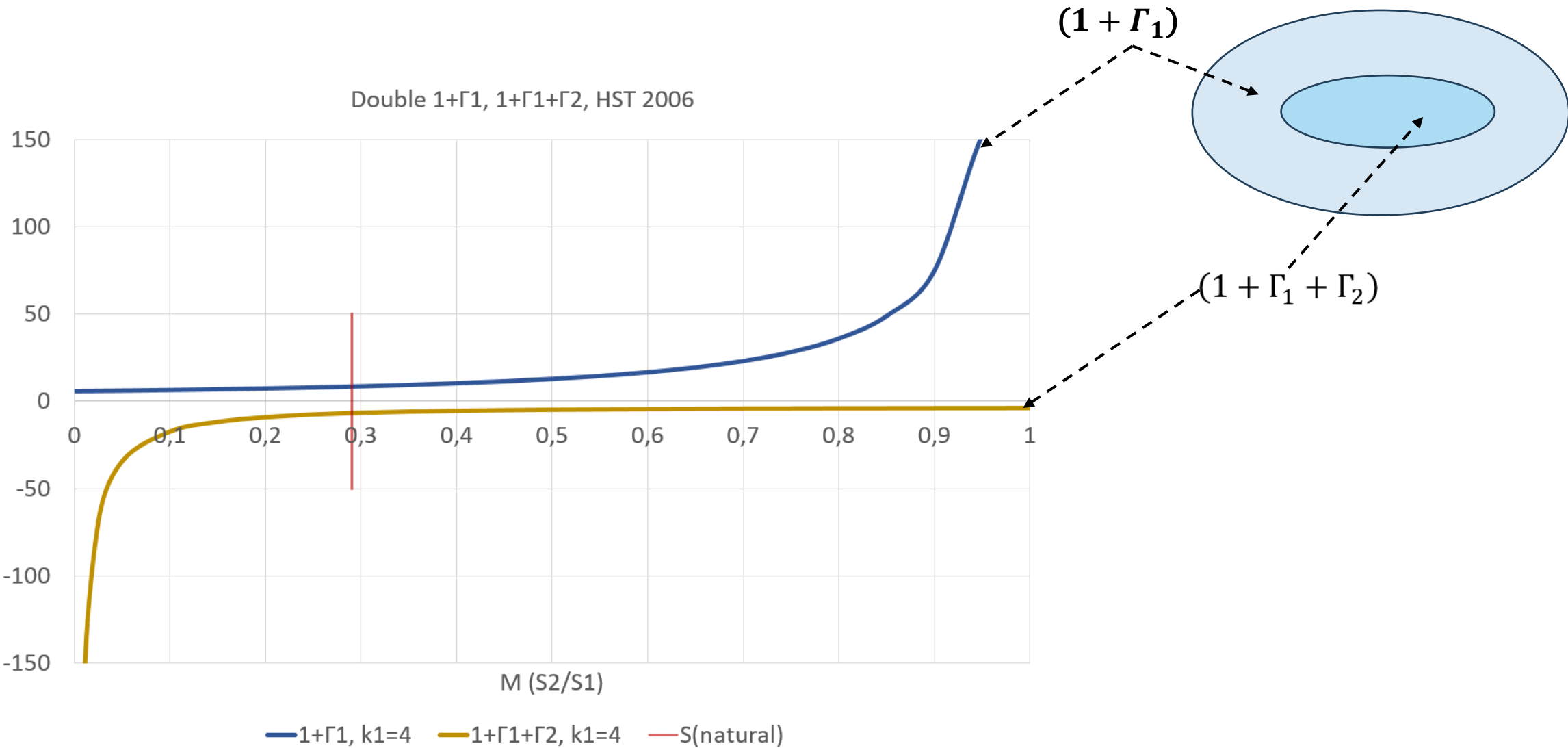


Желтая линия соответствует энергии вихря без вложений. Отметим несколько особенностей. Везде энергия вихря с вложением превышает энергию вихря без вложений. Энергия вихря с вложением монотонно возрастает с ростом M , т.е. с увеличивается размера вложенного вихря. На левом краю интервала при $M \rightarrow 0$ это превышение энергии незначительно, на правом $M \rightarrow 1$ энергия вихря с вложением неограниченно растет.

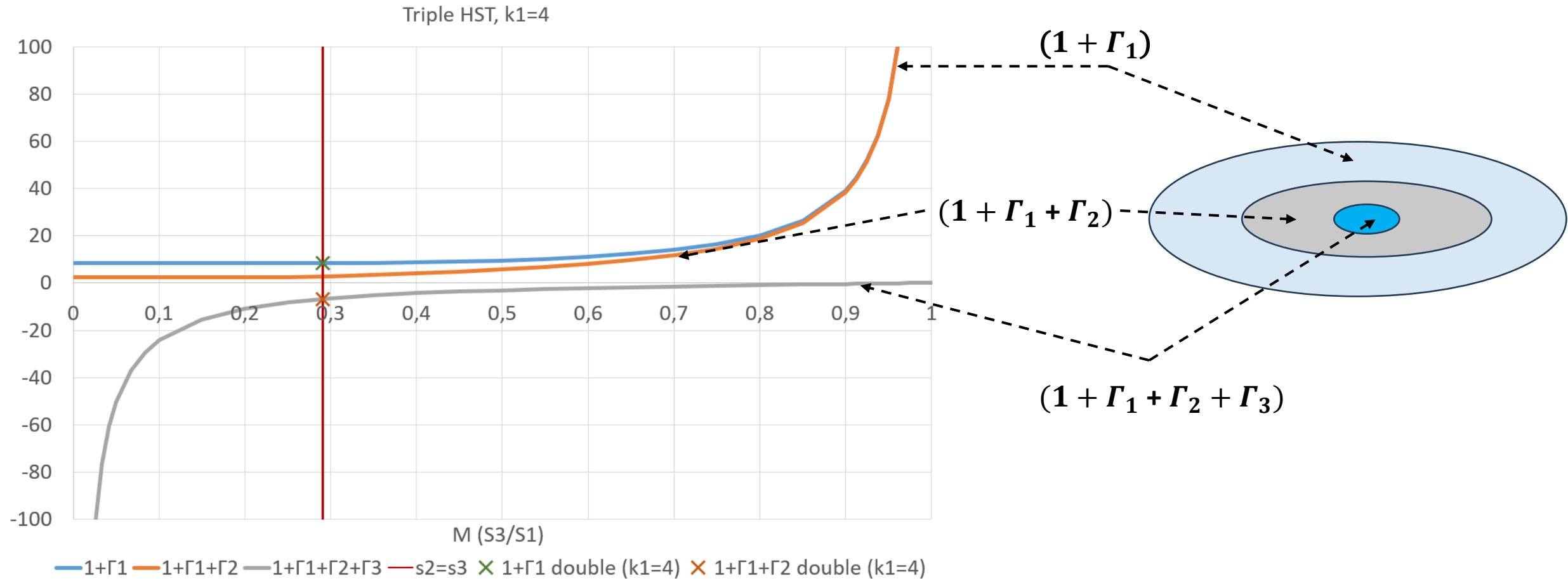


Средняя завихренность по объему всего вихревого ядра отнесенная к завихренности однородного вихря без вложений для условий миссии HST 2006 для трех значений $K_1 = 4, 6, 8$. Вложенный вихрь увеличивает среднюю завихренность $\langle \Gamma \rangle_V$ примерно в три раза. При этом $\langle \Gamma \rangle_V$ не зависит от размеров внутреннего вихря, но незначительно увеличивается с ростом K_1 .

Суммарная потенциальная завихренность $(1 + \Gamma_1)$ частиц в зазоре между границами вихрей и в центральной части $(1 + \Gamma_1 + \Gamma_2)$ двухкомпонентного композитного вихря в безразмерном виде. Миссия HST 2006. $K_1 = 4$



Суммарная потенциальная завихренность $(1 + \Gamma_1)$ и $(1 + \Gamma_1 + \Gamma_2)$ частиц в зазоре между границами вихрей и в центральной части $(1 + \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3)$ трехкомпонентного композитного вихря в безразмерном виде. Миссия HST 2006. $K_1 = 4$



Композитный вихрь с нестационарным вложением

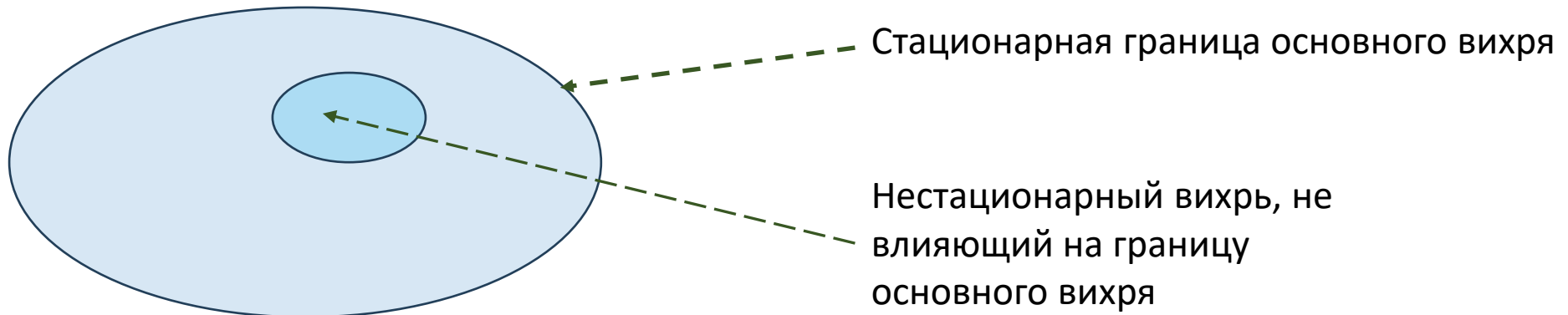
Проблемы в задаче о композитном стационарном вихре.

1. Условие софокусности приводит к очень жестким условиям на собственные потенциальные завихренности обоих вихрей с особенностями на границах интервала по параметру M .
2. Форма вложенного вихря для малых значений M слишком вытянута.
3. Для M , близких к 1, энергия композитного вихря уходит в бесконечность.
4. Условие стационарности совместно с требованием софокусности обоих вихрей, диктует однозначность определения собственных потенциальных завихренностей Γ_1 и Γ_2 .

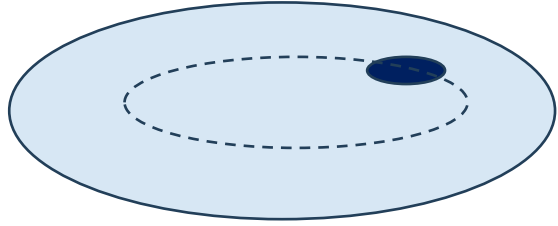
Казалось бы мы должны иметь произвол в выборе как размеров вложенного вихря, так и в потенциальной завихренности его ядра.

Из наблюдений: Граница основного вихря стационарна. Внутри ядра основного вихря имеются более мелкие вихревые образования, которые практически не влияют на границу основного вихря.

Вывод: нужно построить теорию слабых вихрей, вложенных в ядро основного вихря, с условием слабого влияния на границу основного вихря.

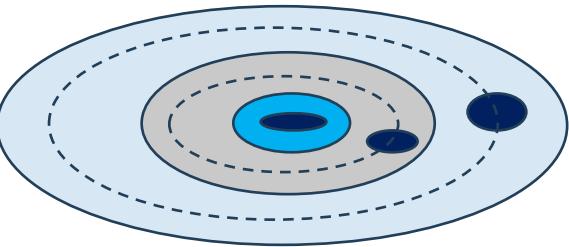
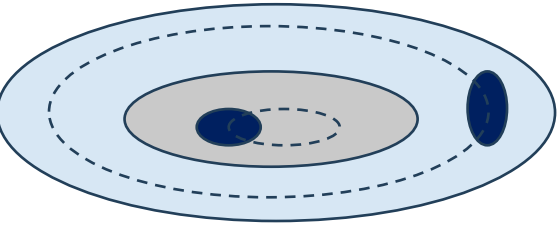


Слабый нестационарный вложенный вихрь, не влияющий на границу основного вихря



Общие свойства слабых вложенных вихрей

1. Движение вихрей как целого - по замкнутым траекториям
2. Деформация формы ядер вихрей:
 - Квазипериодическое вращение с ограниченной деформацией полуосей
 - Квазипериодические нутационные колебания с ограниченной деформацией полуосей
 - Неограниченное вытягивание одной из осей оси (образование вихревых нитей) и наматывание нити на траекторию



Энергия вложенных вихрей остается слабой. Для вихревых нитей монотонно уменьшается до нуля.

Оценка энергии для модели нестационарного композитного вихря

Обозначения. Положительные функции A и B , зависящие от параметров вихрей

$$A = M^{5/2} \frac{K_2 \chi_0'^{(2)}}{K_1 \chi_0'^{(1)}} \quad B = M^{3/2} \frac{K_2}{K_1} + M \frac{\chi_{\lambda'}'^{(2)}}{\chi_0'^{(1)}} + \frac{1}{2} M K_2 \frac{\lambda_2'}{\chi_0'^{(1)} \sqrt{(\varepsilon_2 + \lambda_2')(\varepsilon_2^{-1} + \lambda_2')(K_2^2 + \lambda_2')}}}$$

Индекс “1” - основной вихрь, индекс “2” - вложенный вихрь.

Безразмерная энергия $\frac{H}{H_0}$ отнесенная к энергии вихря без вложений H_0 :

$$\frac{H}{H_0} = 1 + \frac{\Gamma_2^2}{\Gamma_1^{(0)2}} A + \frac{\Gamma_2}{\Gamma_1^{(0)}} B .$$

Средняя по периоду обращения энергия

$$\frac{\langle H \rangle}{H_0} = 1 + \frac{\Gamma_2^2}{\Gamma_1^{(0)2}} \langle A \rangle + \frac{\Gamma_2}{\Gamma_1^{(0)}} \langle B \rangle$$

Величины $\langle A \rangle$ и $\langle B \rangle$ можно оценить из данных вышеупомянутых миссий.

Главный вывод - энергия зависит от знака безразмерного параметра $\frac{\Gamma_2}{\Gamma_1^{(0)}}$.

При отрицательной завихренности вложенного вихря в диапазоне $-\frac{\langle B \rangle}{\langle A \rangle} < \frac{\Gamma_2}{\Gamma_1^{(0)}} < 0$ энергия композитного вихря будет меньше энергии вихря без вложений.

Для значения

$$\Gamma_2 = -\frac{1}{2} \Gamma_1^{(0)} \frac{\langle B \rangle}{\langle A \rangle}$$

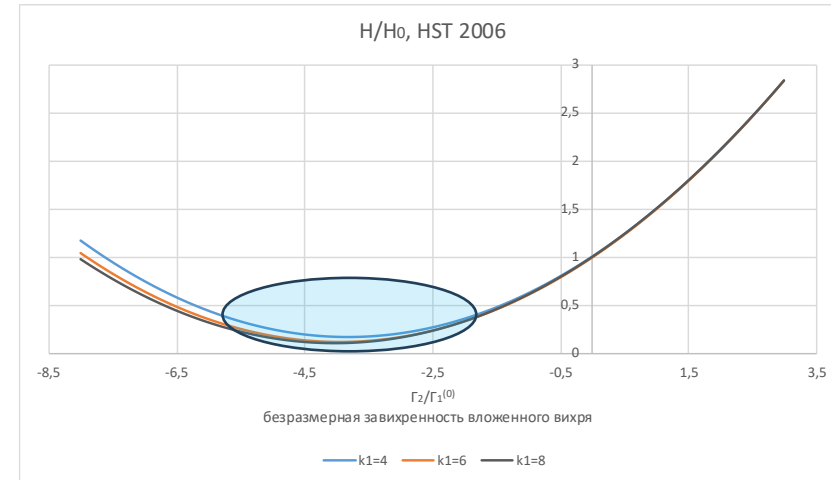
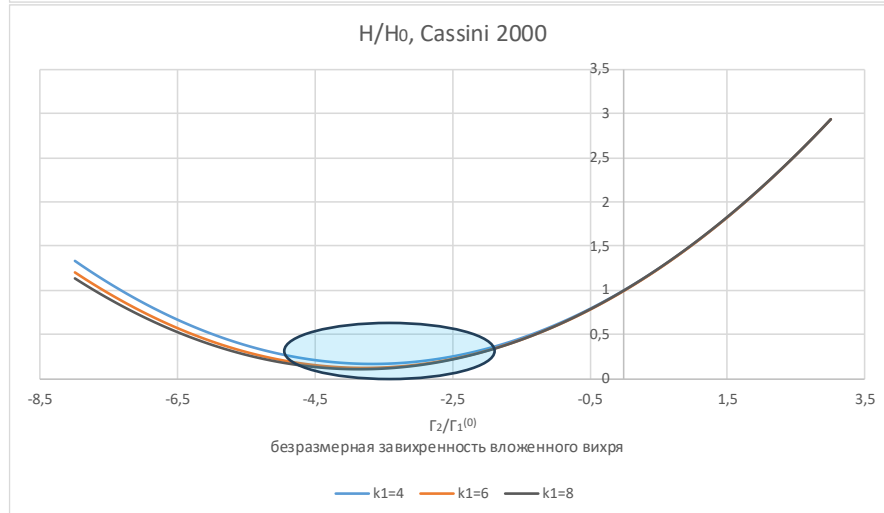
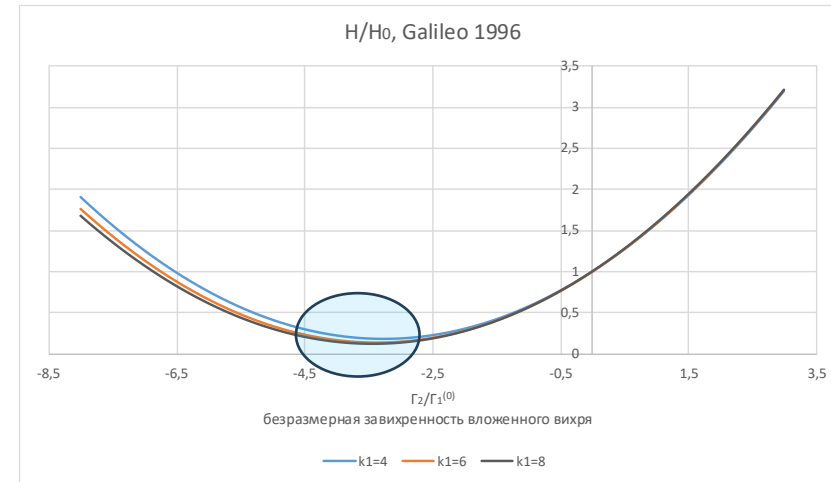
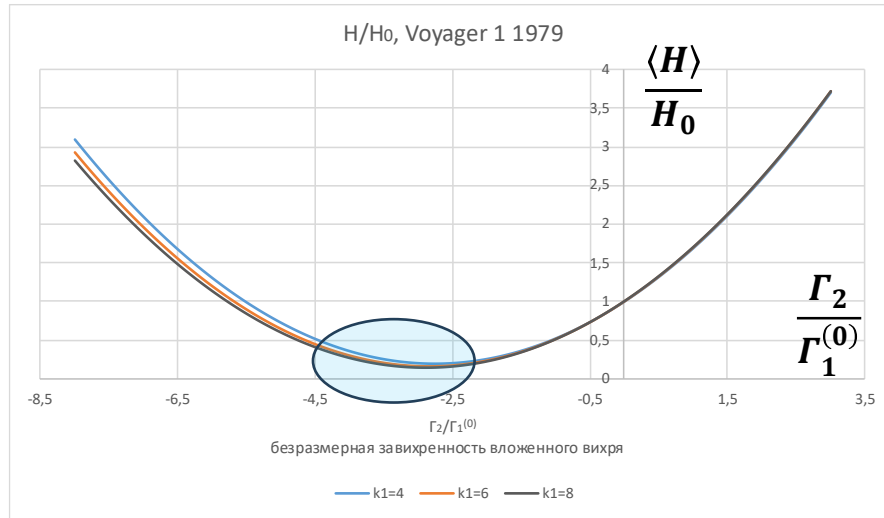
Энергия принимает минимальное значение

$$\frac{\langle H \rangle_{min}}{H_0} = 1 - \frac{1}{4} \frac{\langle B \rangle^2}{\langle A \rangle}$$

Промежуточный вывод

Композитный вихрь, составленный из стационарного однородного по потенциальной завихренности вихря №1 и погруженного в него вихря №2 с условием, что вихрь №2 слабо влияет на поведение границы основного вихря №1, может **энергетически более выгодным**, чем однородный стационарный вихрь без внутреннего вложения. Этот эффект имеет место, когда завихренность ядра вихря №2 противоположна по знаку завихренности основного вихря №1 и лежит в некотором диапазоне значений. Одновременно с уменьшением общей энергии в зазоре между границами вихрей №1 и №2 должна наблюдаться более интенсивная по скорости нестационарная струя. Если потенциальная завихренность вихря №2 лежит в середине указанного диапазона, то такой композитный вихрь имеет минимальную энергию и соответственно наиболее интенсивную периферийную струю.

Зависимость энергии нестационарного композитного вихря $\frac{\langle H \rangle}{H_0}$ от завихренности вложенного вихревого образования $\frac{\Gamma_2}{\Gamma_1^{(0)}}$



Вывод по расчетам . Во всех расчетах по всем миссиям минимум энергии наблюдается для $\frac{\Gamma_2}{\Gamma_1^{(0)}} \approx -3$. Значению $\frac{\Gamma_2}{\Gamma_1^{(0)}} \approx -2$ соответствует покой в центре БКПЮ и выигрыш по энергии порядка 50%. Диапазону значения $-3 < \frac{\Gamma_2}{\Gamma_1^{(0)}} < -2$ соответствует слабый циклон в центре БКПЮ. При этом выигрыш по энергии до 70%.

Натурные наблюдения

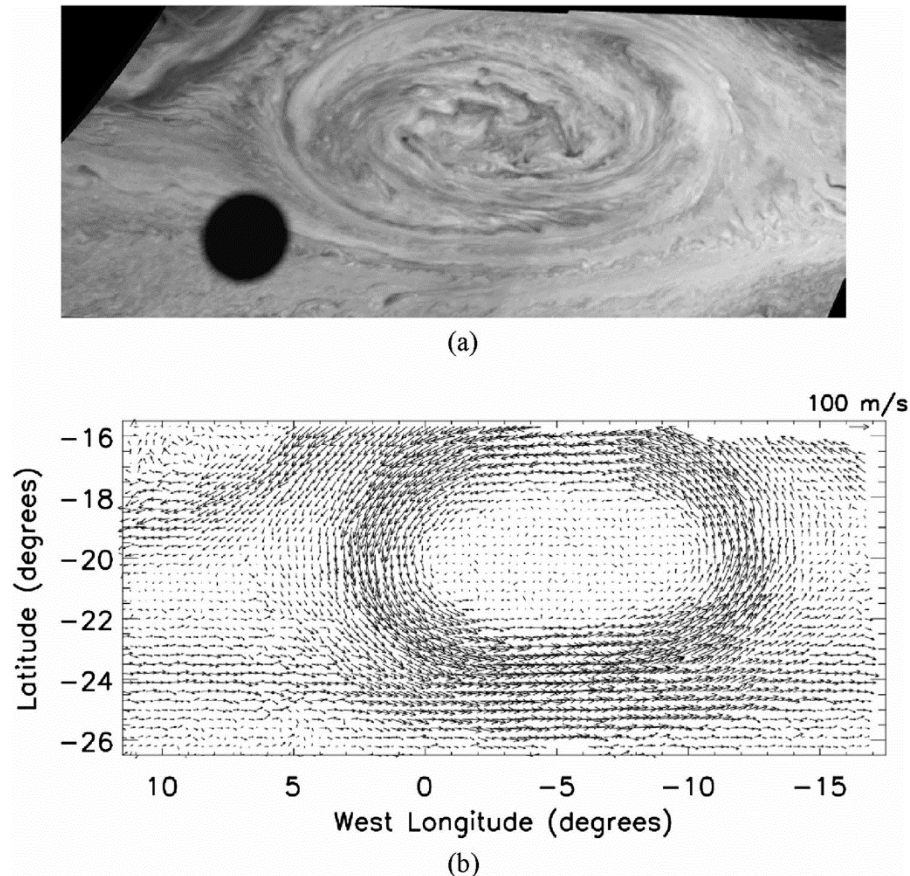
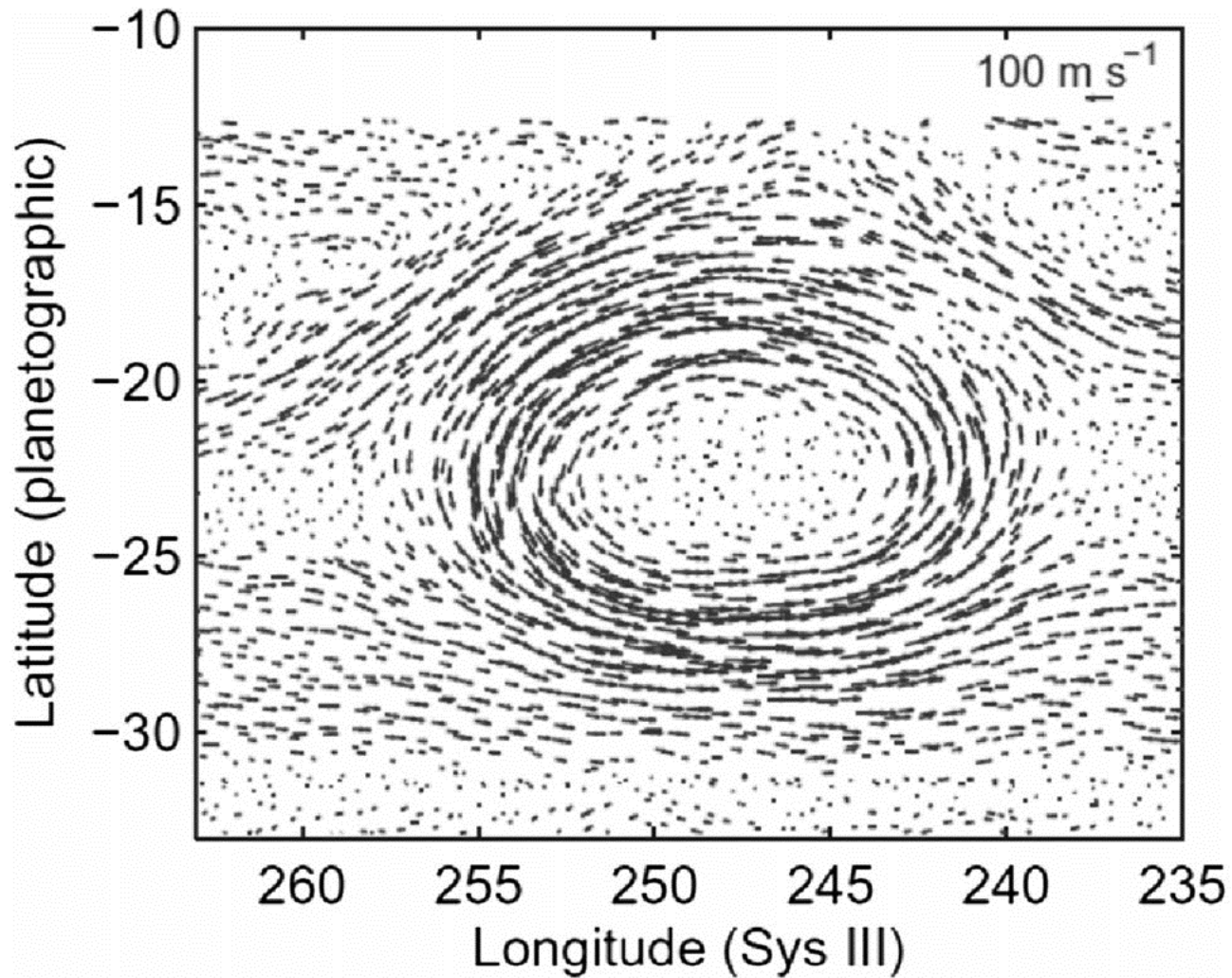


Рис. 13.

Изображение БКПЮ и векторы скорости векторы скорости, полученные с помощью CIV: а) одно из трех изображений Галилео, полученных в мае 2000 г. мозаики, где тень в мозаике принадлежит Европе, и б) векторы скорости ветра БКПЮ . Из работы Choi и др. (2007)

В центре БКПЮ слабый циклон. По периферии интенсивная антициклоническая струя

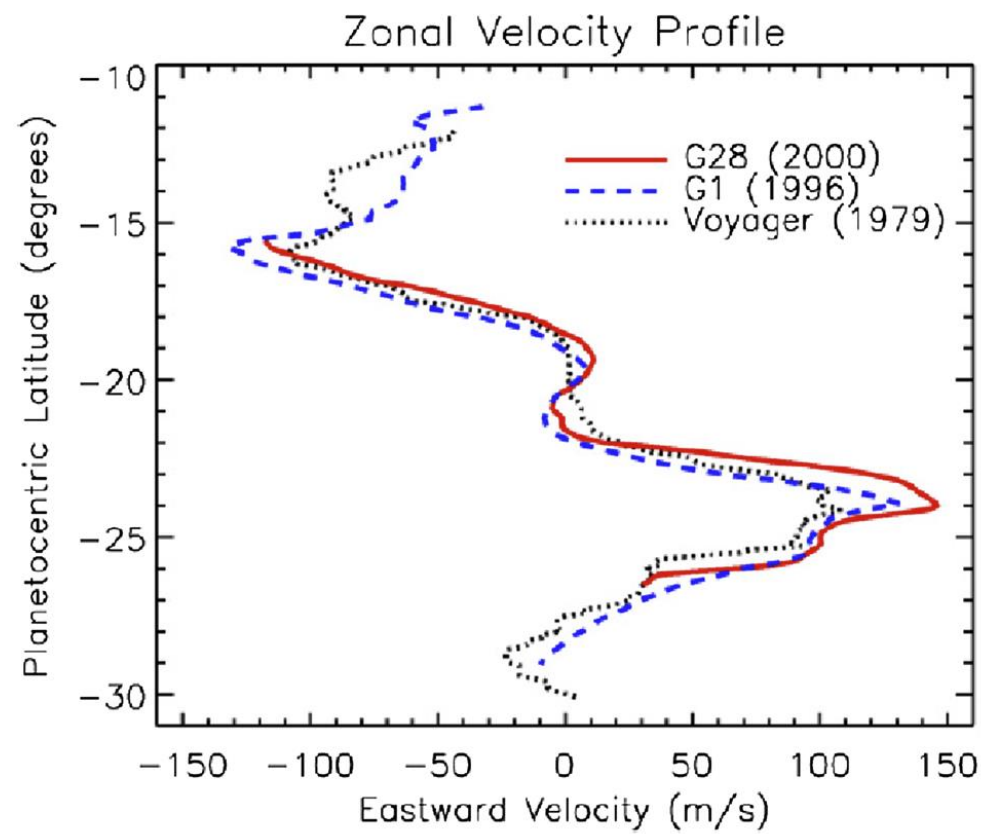


В центре БКПЮ слабый циклон. По периферии интенсивная антициклоническая струя

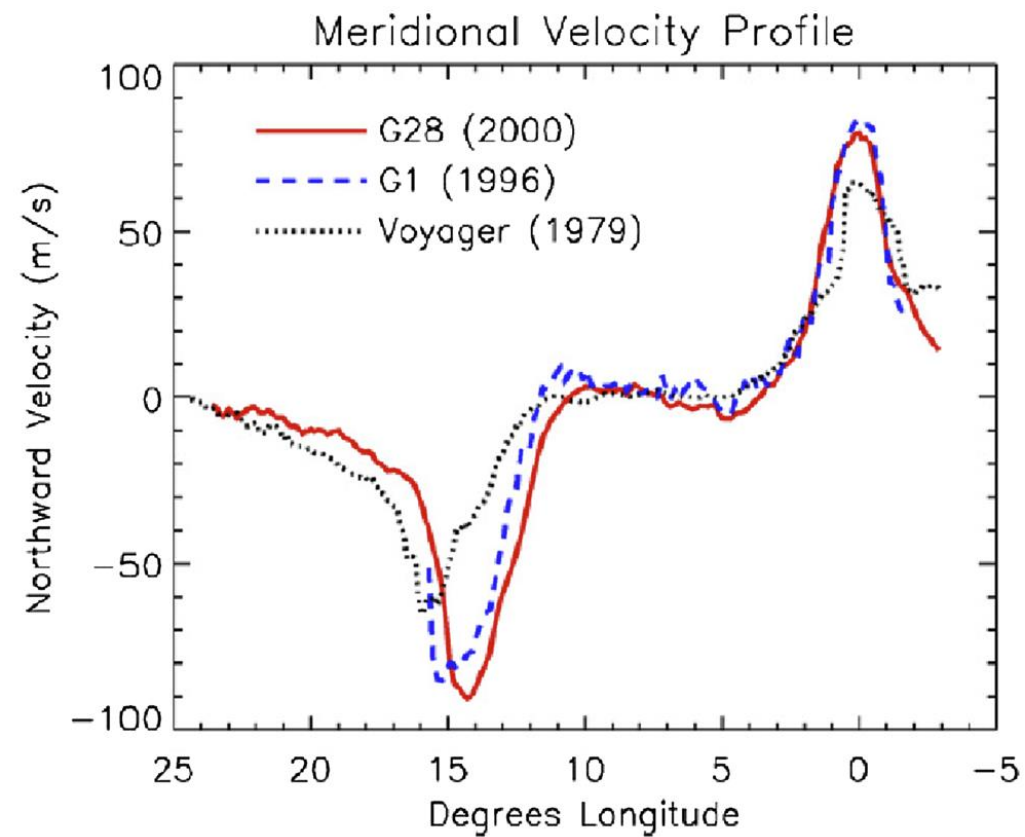
Рис. 15 Tianshu Liu, David M. Salazar «Planetary cloud tracking» Experiments in Fluids (2022) 63:76

<https://doi.org/10.1007/s00348-022-03425-6>

Векторы скоростей, полученные ACCIV по данным HST_БКПЮ_06 по снимкам, разделенным примерно 10 ч. Для наглядности показаны 3000 из 140 000 векторов скоростей. Из работы Asay-Davis et al. (2009)



(a)

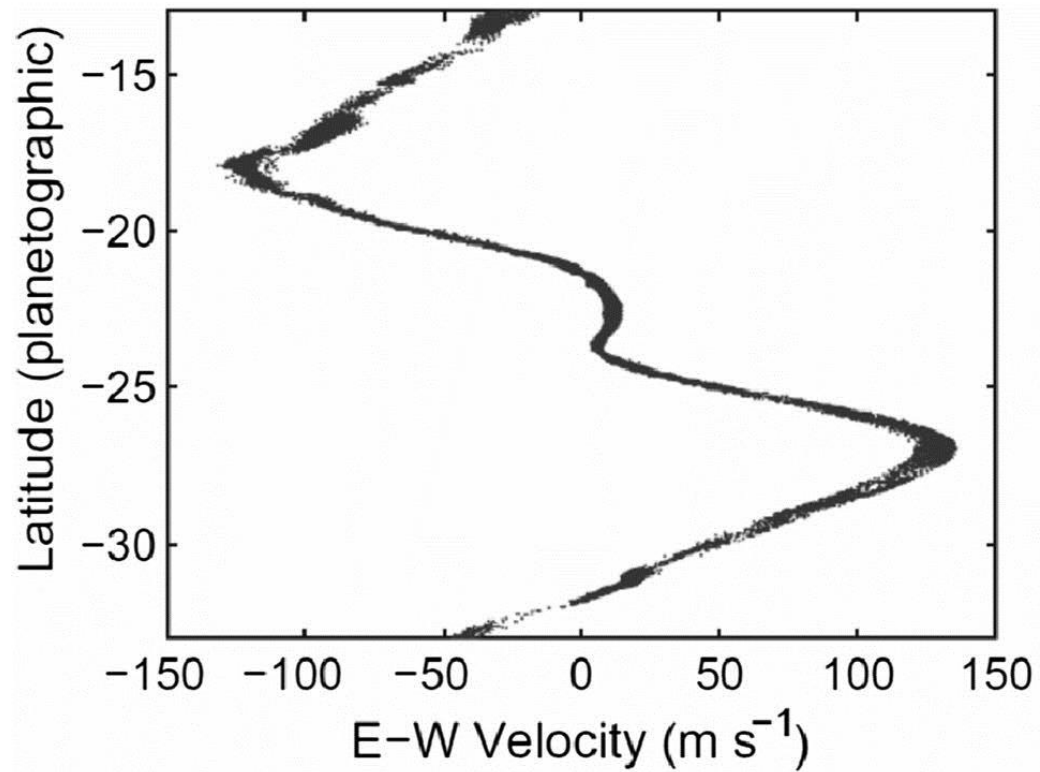


(b)

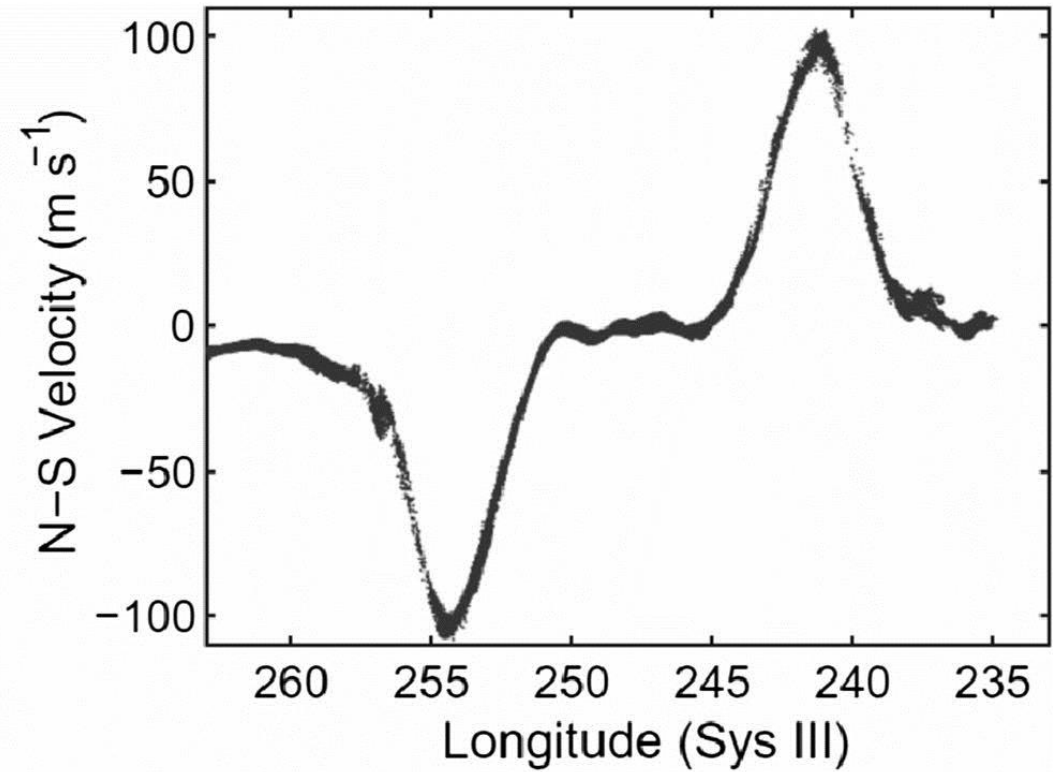
Рис. 14 Tianshu Liu, David M. Salazar «Planetary cloud tracking» Experiments in Fluids (2022) 63:76

<https://doi.org/10.1007/s00348-022-03425-6>

Профили скоростей БКПЮ по осям, полученные с помощью CIV: а) зональная (восток-запад) скорость и б) меридиональная (север-юг) скорость. Сплошная линия рассчитана Choi et al. (2007) по данным G28. Профили скоростей, полученные Vasavada et al.1998) по данным G1 показаны пунктирной линией. Пунктирная линия - это данные "Вояджера" из Dowling and Ingersoll (1988). Из работы Choi et al. (2007)



(a)

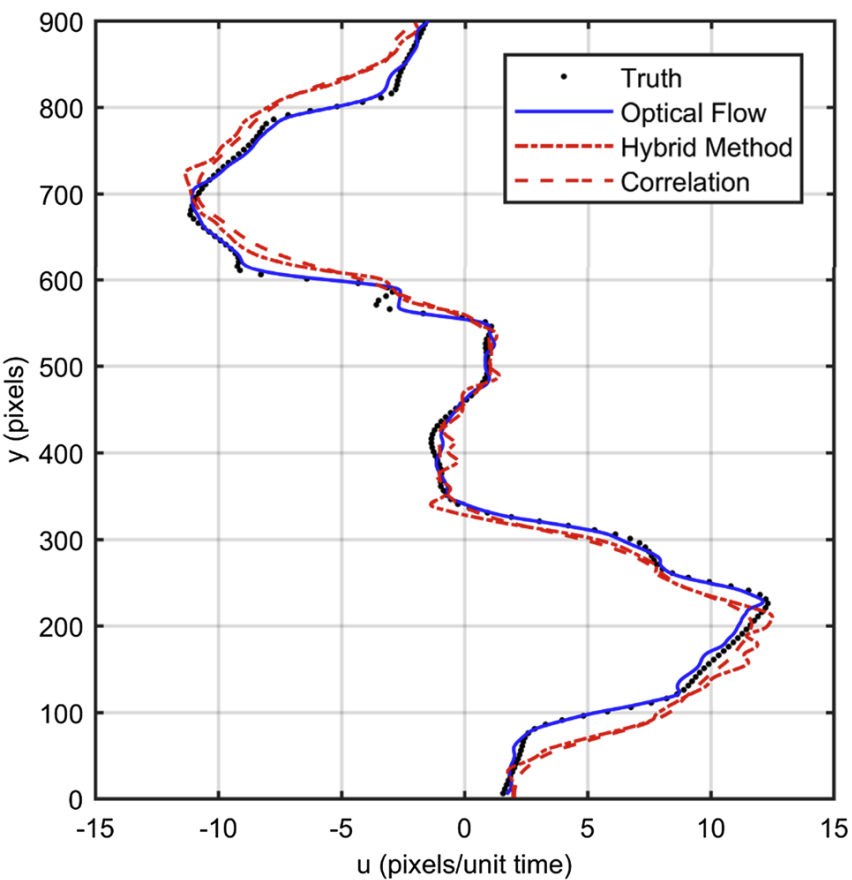


(b)

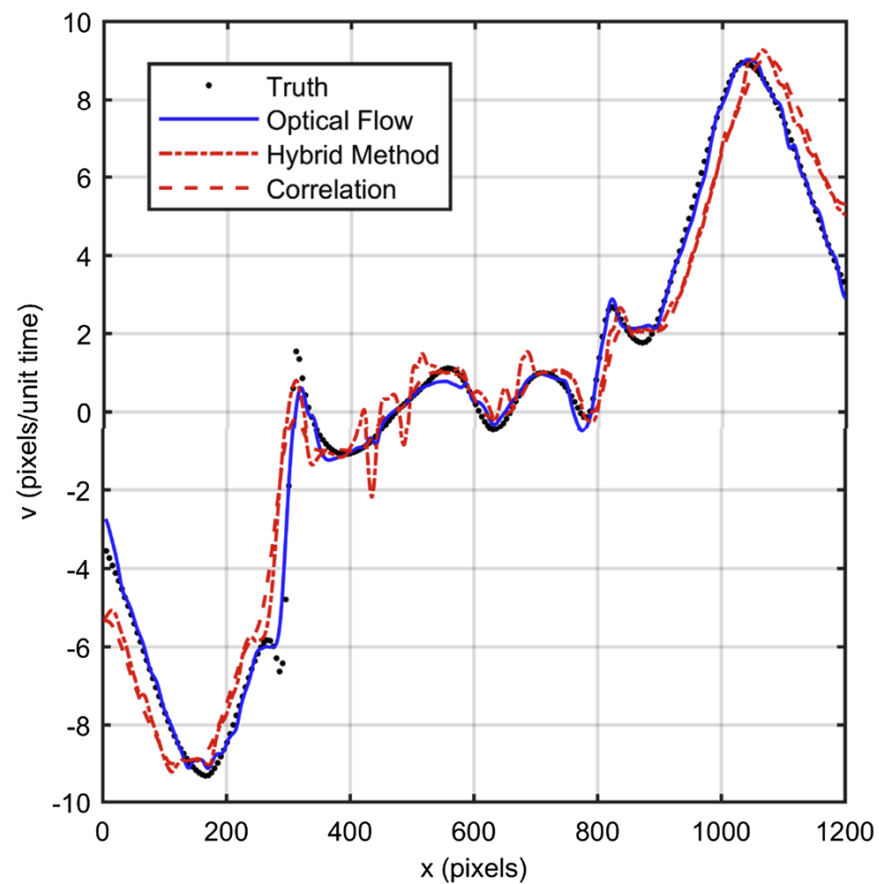
Рис. 16

Профили скоростей БКПЮ по центральным осям, полученные в результате применения метода ACCIV к данным HST_БКПЮ_06: а) компоненты восток-запад всех векторов скорости в пределах $0,2^\circ$ от оси север-юг (248° долготы) БКПЮ , и б) северо-южные компоненты всех векторов скорости в пределах $0,2^\circ$ от оси восток-запад (23° южной планетографической широты широты) БКПЮ . Из работы Asay-Davis et al. (2009)

В центре БКПЮ слабый циклон. По периферии интенсивная антициклоническая струя



(a)



(b)

Профили скоростей в центре синтетических изображений БКПЮ : а) - ось y (малая ось), b) - ось x (большая ось).

В центре БКПЮ слабый циклон. По периферии интенсивная антициклоническая струя

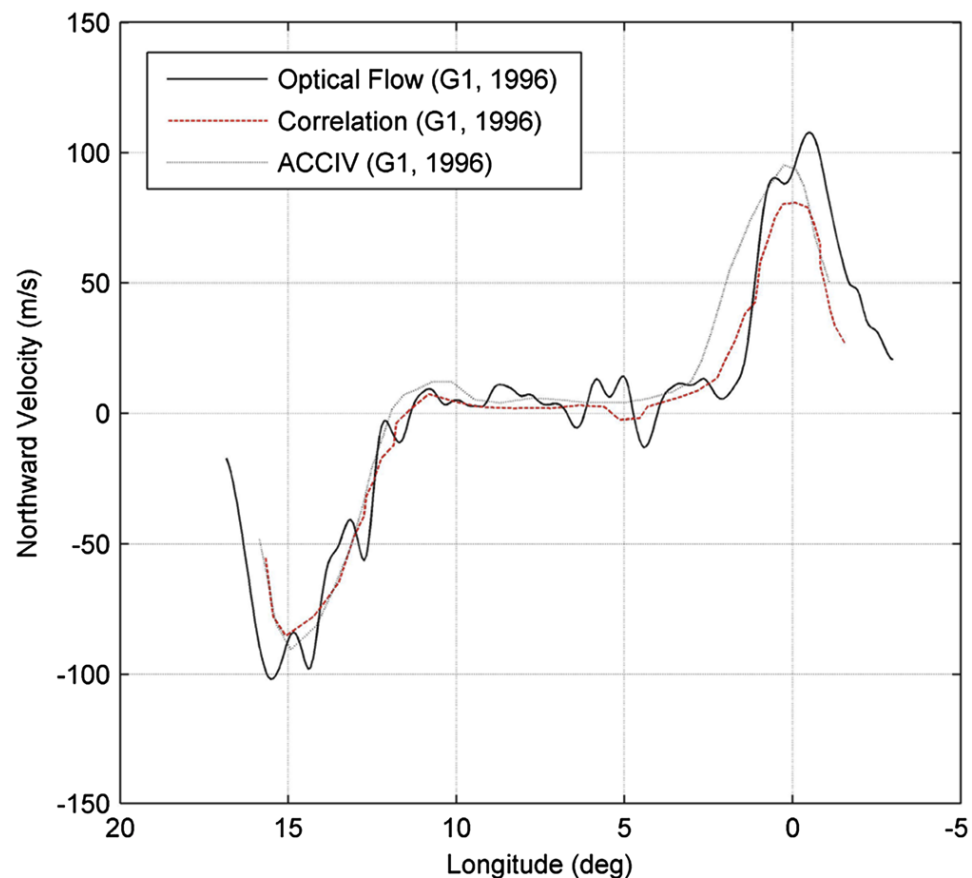
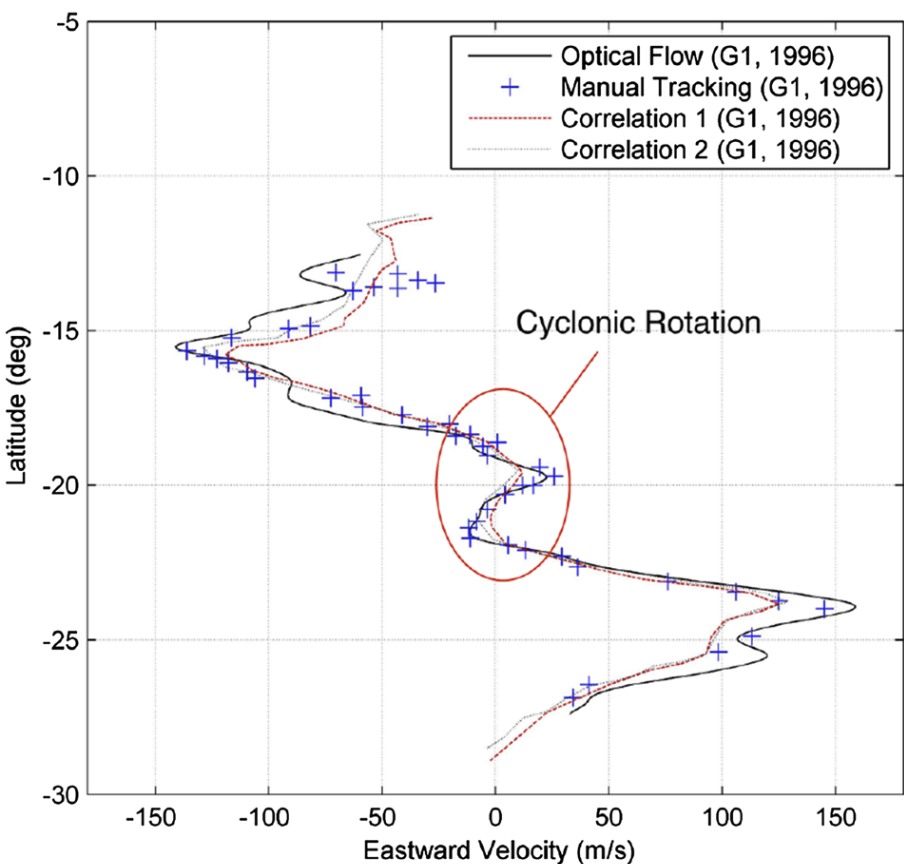


Fig25

(a)

(b)

Профили а) зональных и б) меридиональных скоростей, усредненные по полосе 2° вдоль малой и большой осей через БКПЮ, соответственно. Зональные данные для сравнения получены Vasavada et al. (1998) с использованием ручного визуального трекинга и корреляционного метода 1 и в работе Choi et al. (2007) с использованием корреляционного метода 2. Меридиональные данные для сравнения получены Choi et al. (2007) и Asay-Davis et al. (2009) для ACCIV. Из Liu et al. (2012a, b)

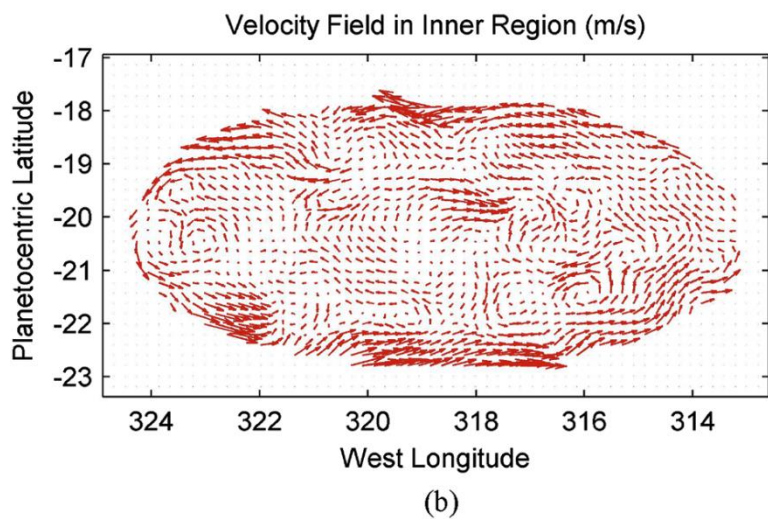
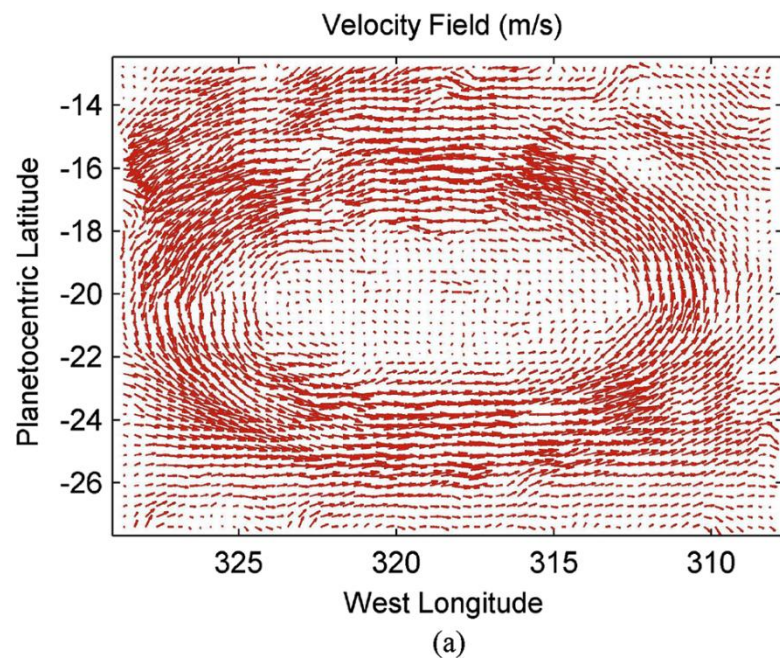


Рис.24

Поля скоростей ГРС, извлеченные с помощью OFM: а) глобальный вид и б) вид внутренней области

Наполнение БКПЮ мелкими вихрями

Выводы. Предложено два подхода к описанию композитного вихря : **теория стационарных вложенных вихрей** и теория **нестационарных вложенных вихрей**, слабо влияющих на поведение границы основного вихря.

В теории **стационарных двухкомпонентных вихрей** потенциальные завихренности обоих вихревых образований однозначно вычисляется по сдвигу фонового течения.

Основной вихрь – антициклон имеет собственную завихренность того же знака что и фоновое течение. Стационарный вложенный вихрь – противоположен по знаку как фоновому течению, так и основному вихрю. Все основные характеристики композитного вихря зависят от размера вложенного вихря. Однако средняя завихренность по объему вихря от размера вложения не зависит. Вложенный вихрь имеет особенность в потенциальной завихренности как при больших так и при малых размерах вложенного вихря. Полная энергия композитного вихря больше энергии одиночного вихря и нарастает с ростом размера вложенного вихря. В пределе для больших размеров обращается в бесконечность.

Нестационарный вихрь, вложенный в основной вихрь, и не сильно влияющий на границу основного вихря, может обладать произвольной допустимой интенсивностью и быть любого допустимого размера. Такой вихрь эволюционирует внутри основного вихря, оставаясь локализованным образованием. Средняя за период обращения энергия такого композитного вихря при циклонической завихренности малого вихря меньше энергии однородного вихря без вложений при условии, что собственная завихренность вложенного вихря отрицательна и принадлежит некоторому диапазону значений. Середина этого диапазона соответствует минимуму энергии композитного вихря .

Нестационарная модель композитного вихря энергетически более выгодна, чем стационарная модель БКПЮ.

Однородный вихрь структурно неустойчив, двухкомпонентный структурно устойчив.