

Особенности проявления вихревых течений в геометрии маркирующих их сликовых структур

Шомина О.В. (1), Тарасова Т. В. (2), Даниличева О.А. (1), Капустин И.А. (1)

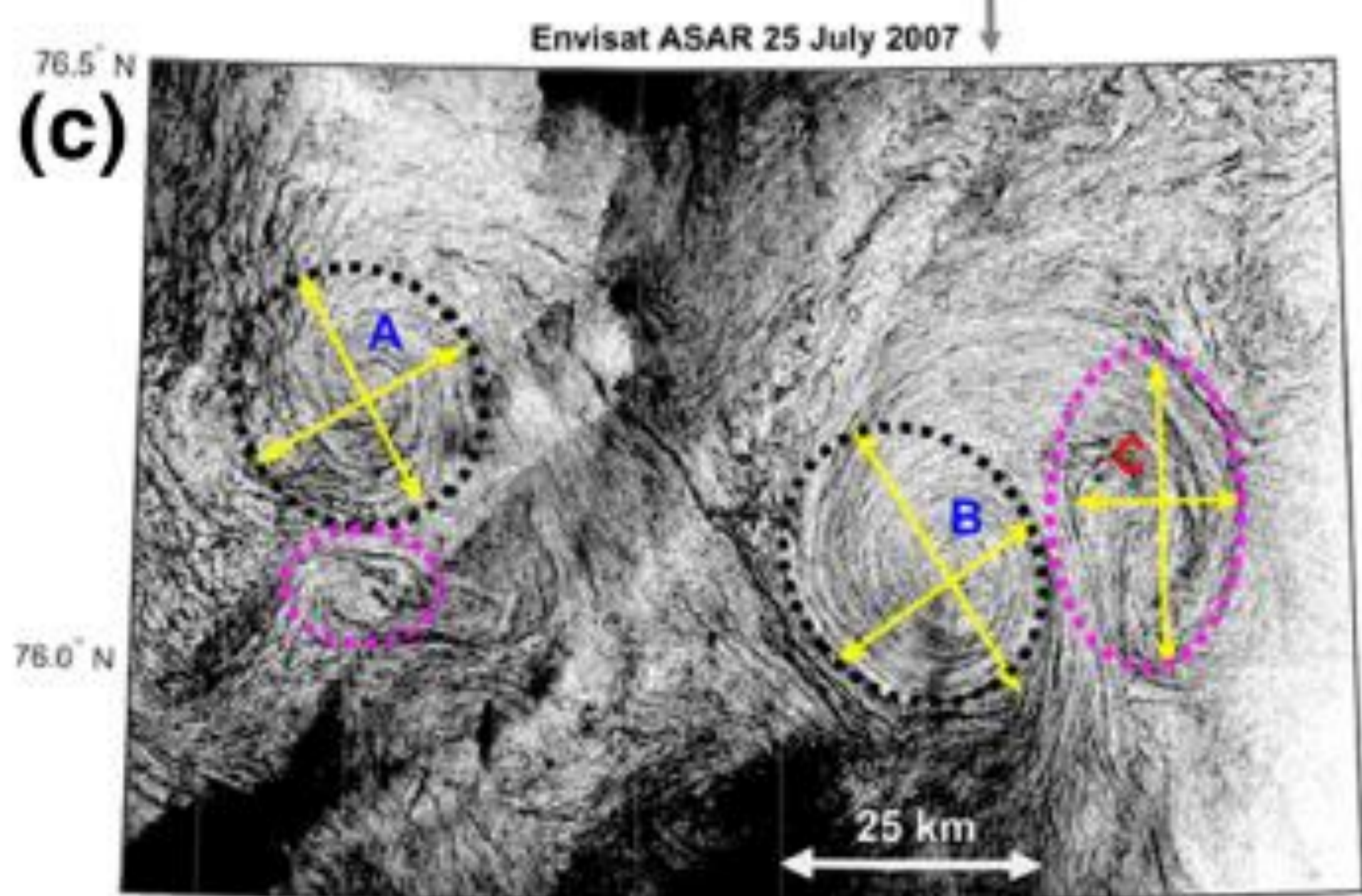
(1) Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

(2) Национальный исследовательский университет, Высшая школа экономики, Нижний Новгород, РФ

Ключевые слова: пленки на морской поверхности, течения, океанические вихри

Широкая распространенность сликов биогенной природы на морской поверхности позволяет использовать их в качестве маркеров приповерхностных процессов – неоднородных течений, внутренних волн, суб- и мезомасштабных вихревых структур (Gade et al. 2013; Mitnik et al. 2007). В последнем случае внешний масштаб вытянутых и закрученных полос ПАВ часто напрямую ассоциируется с масштабом маркируемого морского вихря (например, (Bashmachnikov et al., 2020)). Однако такой подход характеризуется рядом проблем: так, не учитываются зависимость размера формируемой спиральной структуры от положения источника ПАВ относительно центра реального вихря, а также влияние ветра на кинематику элементов слика. Это может приводить к некорректной оценке истинных масштабов наблюдаемых вихревых структур. При распространении ПАВ от точечного неподвижного и постоянного источника геометрия сликовой спирали в отсутствие процессов растекания, когда ПАВ может рассматриваться как пассивная примесь, будет отображать геометрию линии тока в приповерхностном слое. Для описания кинематики распространения ПАВ была сформулирована и проанализирована в общем виде система нелинейных дифференциальных уравнений линий тока в стационарных полях однородного ветра и спирального морского вихря. Показано, что для морских осесимметричных вихрей, модуль скорости которых демонстрирует рост внутри ядра вихря и спадание при удалении от него, при наложении однородного дрейфового течения со скоростью, меньшей максимальной скорости течения вихря, картина линий тока в приповерхностном слое демонстрирует 2 критические точки. Первая из них, являющаяся узлом или фокусом и расположенная внутри ядра вихря, является устойчивой в случае, если в ее малой окрестности двумерная дивергенция поля скорости отрицательна, и неустойчивой, если – положительна. Вторая особая точка, локализованная вне ядра вихря, является седлом для любого направления вращения вихря. Такое поведение линий тока качественно согласуется с особенностями сликовых структур, наблюдаемых на спутниковых изображениях морской поверхности. Аналитически и численно показано, что истинный центр морского вихря и центр сликовой спирали могут не совпадать, а расстояние между ними может достигать порядка радиуса ядра вихря. Продемонстрировано наличие «пороговой» скорости ветра, при превышении которой спиральная сликовая структура не может образоваться при неизменных характеристиках вихря. На основании численного моделирования продемонстрировано, что при заданных характеристиках вихря масштаб проявляемой спиральной структуры сильно зависит от положения источника ПАВ относительно центра вихря, величины и направления однородного течения и может варьироваться в широких пределах.

- Сложности дистанционного определения характеристик вихревых структур в северных регионах → РЛ
- Морские вихри часто проявляются на РЛ панорамах благодаря сликовому механизму (~70% случаев, (Karimova, 2012))
- Традиционный подход – отождествление масштабов



(Bashmachnikov et al. 2020)

- Не учитывалось влияние положение источника примеси на масштаб формируемой сликовой спирали

$$\vec{u}_c = \vec{u} + 0.03\vec{W} \quad \begin{cases} |\vec{u}| \sim 0.1 - 0.8 \text{ m/s} \\ 0.03\vec{W} \sim 0.1 - 0.2 \text{ m/s} \end{cases}$$

(Капустин et al. RS 2019)

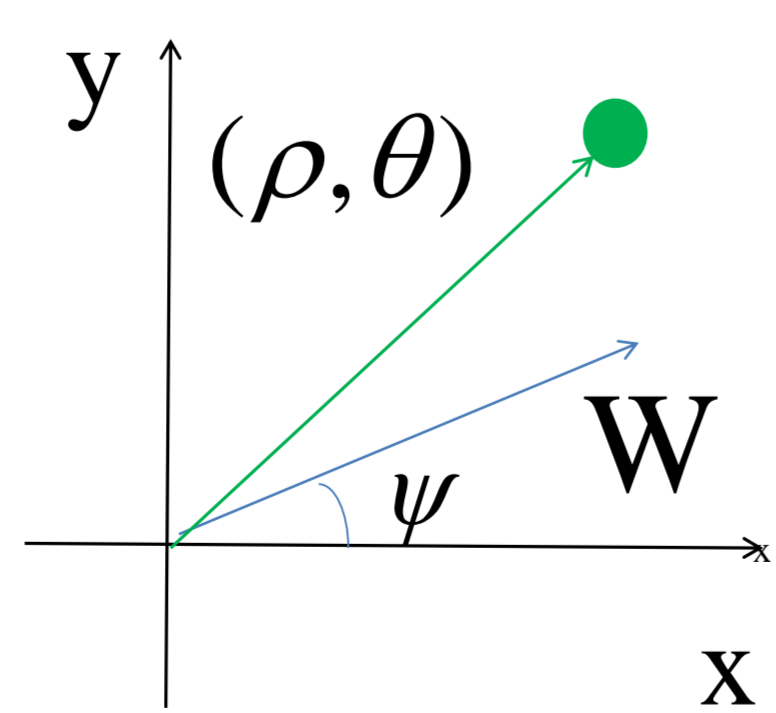
- Влияние ветра на кинематику примеси может быть значительно

некорректная интерпретация

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Уравнение для линии тока поля приповерхностных течений:

$$\frac{dx}{V_x} = \frac{dy}{V_y} = dt$$



В полярной СК, связанной с центром вихря, с учетом ветрового дрейфа:

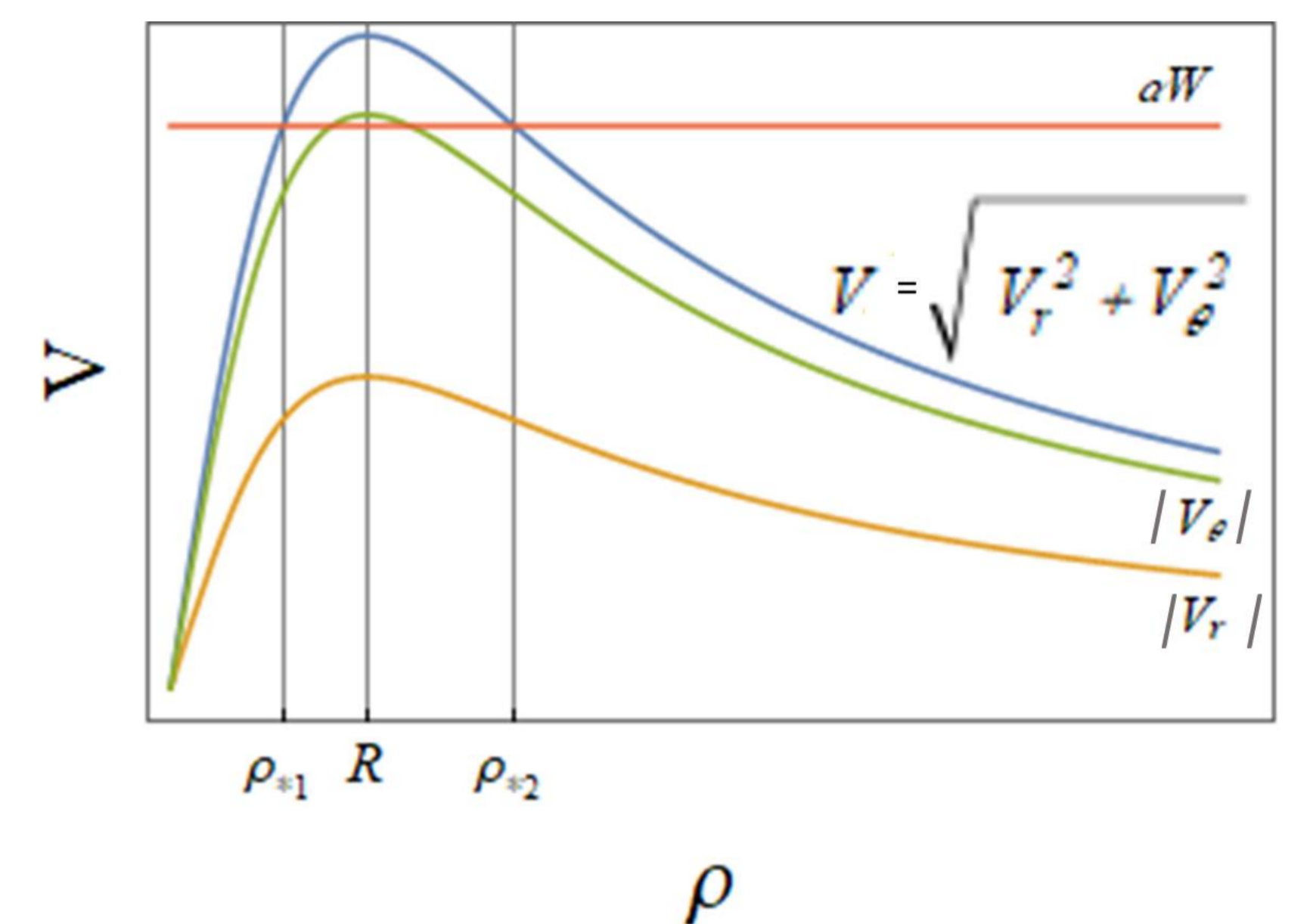
$$\begin{cases} \dot{\rho} = V_r(\rho) + \alpha W \cos(\psi - \theta) \\ \dot{\theta} = \frac{V_\theta(\rho)}{\rho} + \frac{\alpha W}{\rho} \sin(\psi - \theta) \end{cases}$$

Условие на критические точки (ρ_*, θ_*) :

$$\begin{cases} V_r^2(\rho_*) + V_\theta^2(\rho_*) = (\alpha W)^2 \\ \tan(\psi - \theta_*) = -\frac{V_\theta(\rho_*)}{V_r(\rho_*)} \end{cases}$$

Особые точки 0, 1, 2

0 невозможность формирования спирали

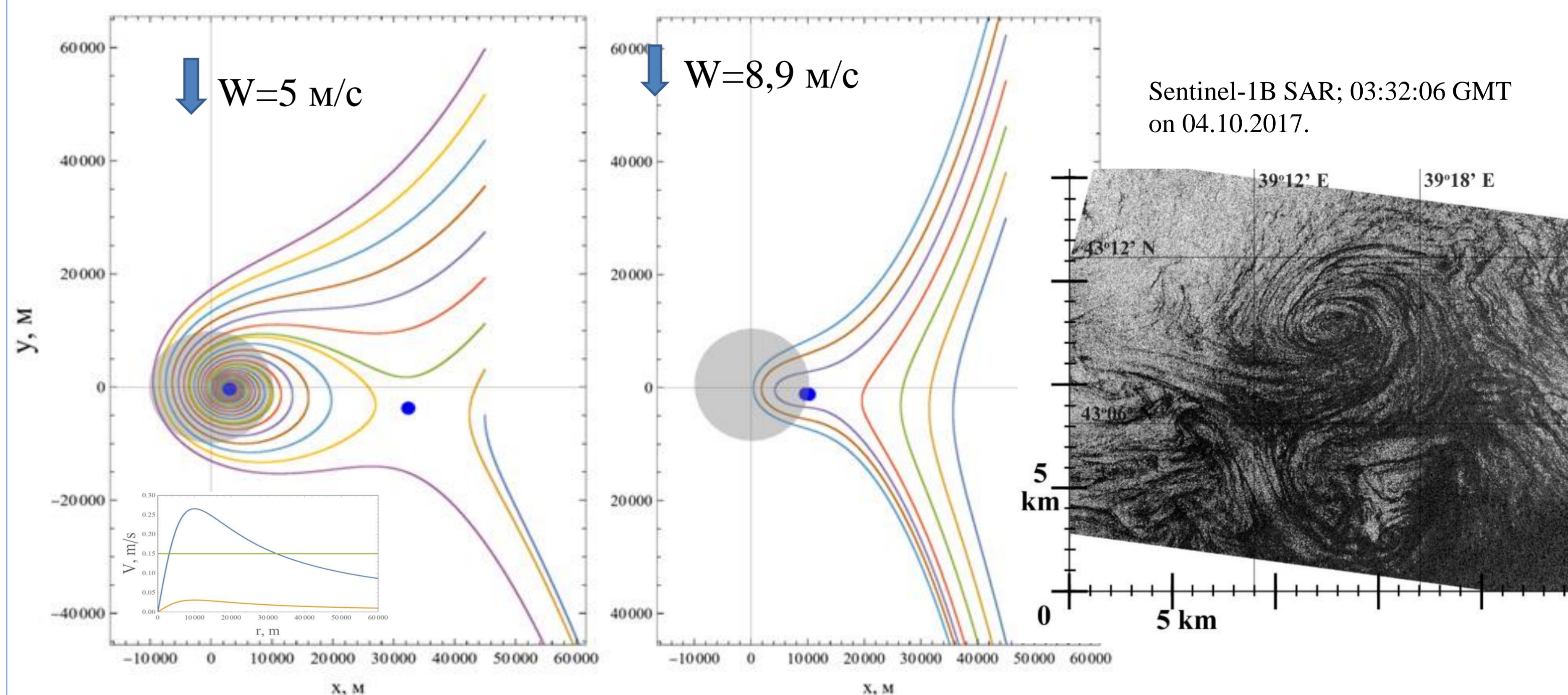


$$\lambda^2 - \lambda \left(\frac{V_r(\rho_*)}{\rho_*} + \frac{\partial V_r(\rho_*)}{\partial \rho} \right) + \frac{V_r(\rho_*)}{\rho_*} \frac{\partial V_r}{\partial \rho} \Big|_{\rho_*} + \frac{V_\theta(\rho_*)}{\rho_*} \frac{\partial V_\theta}{\partial \rho} \Big|_{\rho_*} = 0$$

Первая особая точка: фокус/узел, устойчивость определяется знаком $\nabla \cdot \vec{V} \Big|_{\rho_*}$

Вторая особая точка: седло

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАБЛЮДЕНИЯ



ОБСУЖДЕНИЕ

- Две критические точки приповерхностного течения
- Центр спиральной структуры может не совпадать с центром вихря
- Расстояние между ними может достигать радиуса ядра вихря

- Существование пороговой скорости поверхностного дрейфа, при которой возможно формирование спиральной структуры
- Геометрия и масштаб сликовой спирали сильно зависит от положения источника ПАВ и скорости дрейфового течения
- Результаты аналитического описания и моделирования качественно описывают особенности наблюдаемых на РЛ панорамах морской поверхности спиральных структур

