

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ КОГЕРЕНТНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В МОДЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

В. С. Кошкина^{1,2}, А. В. Гавриков¹

¹ *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: gavr@sail.msk.ru;*

² *Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет),
Россия, 141701, Долгопрудный, Институтский пер., д. 9,
e-mail: koshkina.vs@phystech.edu*

Когерентные вихревые структуры (КВС) – устойчивые во времени вихри, которые оказывают существенное влияние на процессы переноса импульса, тепла и массы в любой жидкой среде, включая атмосферу и океан. В настоящий момент наиболее изученными в геофизике являются крупные вихри (циклоны), в то время как мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в атмосфере и океане остаются в «серой зоне», особенно мало информации об их влиянии на климатическом масштабе. Для климатической оценки требуется умение автоматически выделять КВС в пространственных данных (например, в данных численного моделирования). Главное препятствие для развития этого направления – отсутствие строгого математического определения вихря. Некоторые разработки в этом направлении были проведены в области мелкомасштабной турбулентности, в которой разрабатывается ряд эйлеровых критериев вихревого состояния. Главным преимуществом этой методологии является способность идентифицировать вихревые движения любого масштаба и в любой сплошной среде, минимальный размер вихря определяется исключительно пространственным разрешением используемых данных. Данная работа посвящена исследованию применимости эйлеровых методов идентификации к значительно более крупномасштабным геофизическим данным.

Для исследования были выбраны наиболее широко используемые локальные (эйлеровы) методы идентификации вихрей – Q , Δ , λ_2 , λ_{ci} и *Rortex* критерии. Работа демонстрирует сравнение трех поколений методов идентификации вихря (МИВ), примененных на идеализированных двух- и трехмерных вихрях.

Исследование показало, что *Rortex*-критерий является наиболее перспективным в случае идентификации атмосферных мезомасштабных процессов: он наиболее надежно определяет КВС, а также направление и ось ее вращения. Для разделения полученных данных на отдельные структуры использовался метод кластеризации DBSCAN, что дает возможность оценить геометрические свойства и различные статистики вихрей. Разработанный подход может быть использован для климатического анализа динамики мезомасштабных вихрей.

Ключевые слова: когерентные структуры, идеализированные вихри, мезомасштабные атмосферные процессы, идентификация вихрей, численное моделирование

Введение

Когерентные структуры играют важную роль в различных процессах динамики жидкости и часто ассоциируются с вихрями. В геофизике подобные когерентные вихревые структуры (КВС) оказывают влияние на всех масштабах движения. В атмосфере, на синоптических и мезомасштабах, вихри обеспечивают перенос импульса, температуры и массы (см. работу (Zhang et al., 2019) и цитируемые в ней источники) и, как следствие, определяют локальную погоду и климат (Schielicke, 2017). В океане вихри также играют важную роль в переносе свойств водных масс (Prants et al., 2011), что влияет на термохалинную циркуляцию. Они также могут влиять на биологическую продуктивность, обеспечивая перенос питательных веществ (Stramma et al., 2013; Bosse et al., 2017). Помимо этого, знание динамики мелкомасштабных вихрей значительно улучшает понимание механизмов турбулентного взаимодействия, включая перемешивание, тепло- и массообмен (Jiang et al., 2022). В результате концепция вихря является одним из самых важных понятий в динамике жидкости, не только в рамках наук о Земле, но и в динамике сплошных сред в целом. Следовательно, достоверные методы идентификации вихрей (МИВ) необходимы для развития понимания геофизических процессов и их динамики.

В 1960-х годах, (Монин, Яглом, 1965) впервые определили когерентную структуру как «неслучайную нелинейную устойчивую суперпозицию крупномасштабных компонент турбулентности». Альтернативное понятие привел Робинсон (Robinson, 1991), оно характеризует когерентную структуру как «трехмерную область потока, в которой, по крайней мере, одна фундаментальная переменная потока (компонента скорости, плотность, температура и т. д.) проявляет значительную корреляцию с самой собой или с другой переменной на пространственном и/или временном диапазоне, который значительно больше, чем самые мелкие локальные масштабы потока». Здесь и далее понятия «вихрь» и «когерентная вихревая структура» (КВС) являются синонимичными и характеризуют явления, мало изменяющие свою структуру на масштабах времени, превышающем временной интервал поступления данных. Кроме того, размеры вихрей должны более, чем в 5 раз, превышать пространственный шаг поступающих данных.

Одной из основных трудностей в понимании концепции вихря является отсутствие его общепринятого математического определения, что отмечено многими авторами (Lugt, 1979; Jeong, Hussain, 1995; Haller, 2005). Проблема объективной идентификации КВС в основном вызвана неоднозначностью в определении их внешних границ.

За последние 60 лет было предпринято множество попыток разработать объективные критерии для идентификации когерентных структур. Эти подходы можно условно разделить на две основные группы: эйлеровы и лагранжевы. Лагранжев подход (Haller, Yuan, 2000) включает в себя изучение траекторий отдельных частиц жидкости с помощью методов, берущих начало в теории динамических систем. Хотя лагранжев подход предоставляет более подробную информацию, он значительно более трудоемок с точки зрения вычислений. Эйлеровы методы (см., к примеру, (Jeong,

Hussain, 1995; Liu et al., 2018)) изначально использовались в мелкомасштабных турбулентных потоках, они основываются на топологическом анализе полей динамических переменных.

Актуальность данной проблемы подчеркивается разработкой различных эйлеровых критериев за последние 60 лет. Некоторые методы основаны на разложении тензора градиента скорости более высоких порядков (3-го порядка и выше), в то время как другие анализируют топологию других гидродинамических полей. Хотя эти критерии дают качественно схожие результаты, геометрия когерентных структур, выделенных различными методами, может отличаться.

В данной работе мы рассматриваем несколько наиболее популярных эйлеровых критериев, чтобы определить, какие из них наиболее достоверны для решения проблемы идентификации вихрей в данных геофизического пространственного масштаба (порядка 10–30 км). Эйлеровы методы обнаруживают КВС локально, используя топологический анализ мгновенных полей скалярных величин, таких как завихренность, кинетическая энергия или энстрофия. Исторически эйлеровы критерии можно разделить на три поколения (Ahrens Velásquez, 2023). Самые ранние МИВ опираются на концепцию завихренности (ω). Однако, у этого подхода есть серьезный недостаток. Значения завихренности не позволяют различить сдвиговое движение и движение, обусловленное вращением твердого тела, что может привести к ложным идентификациям. Кроме того, завихренность не обладает галилеевой инвариантностью.

Второе поколение эйлеровых МИВ основывается на анализе тензора градиента скорости $\nabla \mathbf{u}$. Исторически Q -критерий (Hunt et al., 1988), который использует разложение тензора градиента скорости на симметричную и антисимметричную части, был первым трехмерным критерием вихря (его двумерная версия – критерий Окубо-Вейсса (Okubo, 1970; Weiss, 1991), используется в океанологии). Он был выведен в предположении несжимаемого потока, а вихрь определялся как область с положительным вторым инвариантом тензора $\nabla \mathbf{u}$.

Луг (Lugt, 1979) определил вихрь как «множество материальных частиц, вращающихся вокруг общего центра» и предложил использовать замкнутые или спиралевидные линии тока для обнаружения вихрей. Однако, линии тока не являются галилеевыми инвариантами. Чтобы решить эту проблему, Перри и его коллеги (Perry, Chong, 1987) дали свое определение области вихря как области с комплексными собственными значениями $\nabla \mathbf{u}$, что привело к возникновению Δ -критерия. Чжоу с коллегами (Zhou et al., 1999) предложили расширение Δ -критерия. Критерий интенсивности вращения λ_{ci} (*swirling strength*) основан на диагонализации тензора градиента скорости и существовании двух комплексных собственных значений $\nabla \mathbf{u}$, но, помимо детектирования области вихря, данный метод также предоставляет численную меру вращения, λ_{ci} , и плоскость вращения.

Критерий λ_2 (Jeong, Hussain, 1995), как и вышеупомянутые критерии, базируется на разложении тензора градиента скорости, однако требует наличия локального минимума давления. Этот критерий, в отличие от предыдущих, был выведен из динамических соображений.

Все эти методы идентификации когерентных структур (КВС) будут подробно обсуждены далее. Однако важно отметить определенные ограничения второго поколения методов идентификации вихрей. Во-первых, результатом применения многих критериев является положительное скалярное значение, которое не дает информацию о направлении и оси вращения. Кроме того, пренебрежение несжимаемостью и нестационарностью потока часто приводит к необходимости применения эмпирических пороговых значений вместо строгих математических условий для определения границ вихря. В большинстве исследований выбор этих пороговых значений является произвольным и субъективным.

Третье поколение МИВ основано на новом, более строгом определении вихря, известном как *Rortex (Liutex)* (Liu et al., 2018), которое предоставляет не только абсолютную величину вращения вихря, но также знак и ось вращения.

В данном исследовании рассмотрена применимость эйлеровых МИВ для нескольких случаев численных данных: аналитически заданный стационарный двумерный вихрь и идеализированный случай тропического циклона, основанный на реальной атмосферной динамике. Однако, стоит отметить, что применение данных методов не ограничивается идентификацией процессов в атмосфере, и все рассматриваемые критерии могут быть в равной степени использованы в задачах океанологии.

Данные

Методы идентификации когерентных структур в основном применялись в турбулентной гидродинамике. Как следствие, существует необходимость исследования области применимости эйлеровых критериев к данным более крупного масштаба, а также оценки устойчивости методов идентификации КВС к шуму и сдвигам. С этой целью в данном исследовании эйлеровы методы были проверены на нескольких идеализированных потоках. Были рассмотрены следующие способы генерации вихревых полей: синтетический вихрь – заданное аналитически двумерное поле скорости, основанное на модели вихря Лэмба-Осеена (ЛО) (Oseen, 1912) и физически обоснованный случай трехмерного идеализированного тропического циклона (Jordan et al., 1960), полученный с помощью модели WRF (Skamarock et al., 2008).

Вихрь Лэмба-Осеена (ЛО)

В первую очередь результаты идентификации КВС различными методами сравнивались на примере простых аналитических двумерных потоков с вихрями. Модель вихря Лэмба-Осеена (Oseen, 1912) определяется следующих полем скорости в полярных координатах (Cuissa, Steiner, 2022):

$$u_{\theta} = u_{\max} \left(1 + \frac{1}{2\alpha} \right) \frac{r_{\max}}{r} \left(1 - \exp \left(-\alpha \frac{r^2}{r_{\max}^2} \right) \right), u_r = 0, \quad (1)$$

где, в случае $\alpha = 1.256$, параметр r_{\max} определяет границу вихря и радиус, соответствующий наибольшей скорости вращения u_{\max} .

Модель ЛО была использована для создания пары стационарных вихрей (циклонических и антициклонических) на фоне сдвигового потока Куэтта с наложенным сглаженным нормальным шумом со стандартным отклонением $\sigma = 0.08$. Затем итоговое поле скорости было сглажено Гауссовым ядром ($\sigma = 2$). Также были заданы следующие параметры ЛО-вихрей (1): $u_{\max} = 1$ и $r_{\max} = 0.15$.

Идеализированный тропический циклон (ТЦ)

WRF (Weather Research and Forecast) – численная модель атмосферы, которая позволяет описывать реальные атмосферные процессы и проводить большое количество идеализированных численных экспериментов. Мы воспользовались идеализированным случаем тропического циклона, основанным на тайфуне Дэйзи (Jordan, 1958). Его идеализация заключается в том, что в качестве начальных и граничных условий эксперимента используются упрощенные условия для возникновения тропического циклона, а не реальные атмосферные данные, сопровождающие тайфун. Этот эксперимент подразумевает негидростатическую постановку с горизонтальным разрешением 15 км, схемой Кэсслера (Kessler, 1969) для описания микрофизики, отключенной параметризацией радиационных процессов, MM5 схемой (Fairall et al., 2003) приземного слоя и нелокальной схемой параметризации коэффициента вертикального турбулентного обмена YSU (Hong et al., 2006). Основное отличие от модели ЛО-вихря, описанной ранее, состоит в том, что данный случай идеализированного ТЦ нестационарный и трехмерный, что гораздо ближе к реальным физическим процессам.

Методология

Среди многообразия методов выделения когерентных структур в полях скорости наиболее популярными являются Q , Δ , λ_2 , λ_{ci} и, наиболее современный, *Rortex*, критерии. Поэтому в настоящей работе мы исследуем применимость именно этих решений. Они используют эйлеров подход в предположении несжимаемой жидкости и стационарного потока. Первые три критерия основаны на разложении тензора градиента скорости ($\nabla \mathbf{u}$), который будучи тензором второго порядка может быть разложен на симметричную и сдвиговую части:

$$\nabla \mathbf{u} = \mathbf{S} + \mathbf{\Omega},$$
$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$
$$\mathbf{\Omega} = \frac{1}{2} \left(\nabla \mathbf{u} - (\nabla \mathbf{u})^T \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

где симметричная часть (\mathbf{S}) – тензор скоростей деформации, сдвиговая часть ($\mathbf{\Omega}$) – тензор завихренности. Здесь и далее (где это необходимо) для удобства записи будет

использоваться правило суммирования Эйнштейна, в котором $i, j = 1, 2, 3$ есть система координат.

Характеристическое уравнение для $\nabla \mathbf{u}$ записывается в виде:

$$\lambda^3 + P\lambda^2 + Q\lambda + R = 0, \quad (2)$$

где P , Q и R – три инварианта тензора градиента скорости. Пользуясь разложением на симметричную и сдвиговую части, их можно записать как:

$$\begin{aligned} P &= -(\nabla \mathbf{u}), \\ Q &= \frac{1}{2}((\nabla \mathbf{u})^2 - (\nabla \mathbf{u}^2)) = \frac{1}{2}(\|\boldsymbol{\Omega}\|^2 - \|\mathbf{S}\|^2), \\ R &= -\det(\nabla \mathbf{u}). \end{aligned}$$

Q-критерий

В этом критерии вихревые образования определяются как области течения, в которых выполняется неравенство $Q > 0$, то есть антисимметричная часть преобладает над симметричной, что гарантирует наличие вихревого вращения. Математически это эквивалентно преобладанию евклидовой нормы тензора завихренности над нормой тензора скоростей деформации (Hunt et al., 1988). Таким образом, Q -критерий определяется неравенством:

$$Q = \frac{1}{2}(\|\boldsymbol{\Omega}\|^2 - \|\mathbf{S}\|^2) > 0. \quad (3)$$

Δ-критерий

Δ -критерий определяет вихри как области, в которых линии тока имеют спиральную или замкнутую форму в локальной системе отчета, движущейся вместе с точкой (Kolář, 2007). Для этого требуется, чтобы выполнялось условие комплексности собственных значений $\nabla \mathbf{u}$. Для несжимаемой жидкости ($P = 0$) характеристическое уравнение (2) принимает вид:

$$\lambda^3 + Q\lambda + R = 0.$$

Для того, чтобы удовлетворить условию комплексности собственных значений, необходимо, чтобы дискриминант был больше нуля:

$$\Delta = \frac{Q^3}{3} + \frac{R^2}{2} > 0. \quad (4)$$

Сравнивая уравнения (3) и (4), очевидно, что условие $Q > 0$ является более строгим, чем $\Delta > 0$ (Chakraborty et al., 2005). То есть ожидается, что Δ -критерий покажет большее количество вихревых структур.

λ_2 -критерий

Подход Чона и Хусейна (Jeong, Hussain, 1995) основан на использовании уравнений Навье-Стокса. Таким образом, этот критерий является единственным, полученным из динамических соображений. Для существования вихря требуется наличие экстремума давления в плоскости, перпендикулярной оси вихря. Математически это условие может быть получено при применении градиента к уравнениям Навье-Стокса:

$$a_{i,j} = -\frac{1}{\rho} p_{,ij} + \nu u_{i,jkk},$$

где $a_{i,j}$ – градиент ускорения, а $p_{,ij} = \nabla(\nabla p)_{ij} = \partial^2 p / \partial x_i \partial x_j$ – симметричный гессиан давления. Далее $a_{i,j}$ можно разложить на симметричную и сдвиговую части:

$$a_{i,j} = \left[\frac{DS_{ij}}{Dt} + \Omega_{ik}\Omega_{kj} + S_{ik}S_{kj} \right] + \left[\frac{D\Omega_{ij}}{Dt} + \Omega_{ik}S_{kj} + S_{ik}\Omega_{kj} \right]. \quad (5)$$

симметричная часть сдвиговая часть

Сдвиговая часть (5) есть хорошо известное уравнение завихренности, а симметричная часть – уравнение для скоростей деформации:

$$\frac{DS_{ij}}{Dt} - \nu S_{ij,kk} + \Omega_{ik}\Omega_{kj} + S_{ik}S_{kj} = -\frac{1}{\rho} p_{,ij}. \quad (6)$$

Компонента с гессианом давления $-\frac{1}{\rho} p_{,ij}$ в правой части показывает локальные экстремумы. Для выполнения условия локального минимума необходимо, чтобы гессиан имел два положительных собственных значения. На этом этапе в уравнении (6) не рассматривается влияние нестационарной безвихревой деформации (потому что безвихревой поток может создать минимум давления без присутствия вихря) и эффектов вязкости (которые способны сгладить минимум давления при наличии вращения), поэтому первыми двумя членами пренебрегают. В результате получаем уравнение:

$$\Omega_{ik}\Omega_{kj} + S_{ik}S_{kj} = \mathbf{\Omega}^2 + \mathbf{S}^2 = -\frac{1}{\rho} p_{,ij}.$$

Учитывая, что тензор $\mathbf{\Omega}^2 + \mathbf{S}^2$ является симметричным, он имеет только действительные собственные значения (λ_1, λ_2 и λ_3) и $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$, то для соблюдения условия вихря достаточно требования $\lambda_2 < 0$, что и определило название критерия.

λ_{ci} -критерий

Аналогично Δ -критерию, λ_{ci} -критерий (другое название – *swirling strength*) определяет ядро вихря как область, в которой $\nabla \mathbf{u}$ имеет комплексные собственные значения. Идея данного метода основана на диагонализации тензора градиента скорости $\nabla \mathbf{u}$ в декартовых координатах:

$$\nabla \mathbf{u} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{e}_r & \mathbf{e}_+ & \mathbf{e}_- \end{bmatrix}}_{\mathbf{P}} \underbrace{\begin{bmatrix} \lambda_r & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_+ & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_- \end{bmatrix}}_{\Lambda} \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{e}_r & \mathbf{e}_+ & \mathbf{e}_- \end{bmatrix}^{-1}}_{\mathbf{P}^{-1}},$$

где \mathbf{e}_r и \mathbf{e}_\pm – собственные вектора $\nabla \mathbf{u}$, образующие матрицу перехода \mathbf{P} , а λ_r и $\lambda_\pm = \lambda_{cr} \pm i\lambda_{ci}$ – соответствующие им собственные значения (СЗ), образующие матрицу Λ .

В приведенных выше обозначениях локальный поток характеризуется удлинением или сжатием вдоль оси \mathbf{e}_r , в то время как плоскость, в которой поток вращается, определяется \mathbf{e}_\pm . Сила локального вращательного движения измеряется величиной λ_{ci} , то есть мнимой частью комплексно-сопряженной пары СЗ. Ученые в работе (Zhou et al., 1999) определяют λ_{ci} как локальную силу вращения вихря (*swirling strength*). Итоговое условие вихря выглядит следующим образом:

$$\lambda_{ci} > 0.$$

Следует заметить, что, как отмечено в работе Куиссы (Cuissa, Steiner, 2022), данный метод решает проблему, связанную с чисто сдвиговыми потоками. Тем не менее, он недостаточно корректен в случае наличия в потоке одновременно и твердотельной компоненты, и внутренних сдвигов.

Rortex-критерий

Наиболее современные методы идентификации когерентных структур базируются на разложении завихренности $\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{u}$ на вихревую (твердотельное вращение, \mathbf{R}) и невихревую (внутренние сдвиги, \mathbf{S}) компоненты:

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{R} + \mathbf{S}.$$

Данное определение завихренности было предложено в работах Лю (Liu et al., 2016), а также Коларжа и Вита (Kolář et al., 2010).

Стоит отметить, что величины описанных выше критериев зависят от выбора системы координат, то есть не являются галилеевыми инвариантами. Это возникает из-за использования частных производных, которые зависят от системы отсчета. Для того, чтобы избавиться от этого недостатка и получить более физически наглядную интерпретацию тензора градиента скорости, в работе (Yu et al., 2020) было предложено использовать разложение по главным компонентам тензора градиента скорости $\nabla \mathbf{u}$:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \lambda_{cr} & -\frac{R}{2} & 0 \\ \frac{R}{2} + \epsilon & \lambda_{cr} & 0 \\ \xi & \eta & \lambda_r \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -\frac{R}{2} & 0 \\ \frac{R}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\text{вращение}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \epsilon & 0 & 0 \\ \xi & \eta & 0 \end{bmatrix}}_{\text{сдвиг}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \lambda_{cr} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{cr} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_r \end{bmatrix}}_{\text{растяжение}}.$$

Матрица \mathbf{V} является тензором градиента скорости $\nabla \mathbf{u}$ во вращающейся системе отсчета. Эта система имеет ось вращения, направленную вдоль новой оси z , определяемой нормализованным собственным вектором, соответствующим действительному СЗ λ_r тензора $\nabla \mathbf{u}$. Более подробную информацию можно найти в работе (Xu et al., 2019).

Rortex-критерий, также называемый *Liutex*, – это предложенная (Liu et al., 2018) математическая величина \mathbf{R} , позволяющая точно рассчитать отдельно локальное твердотельное вращение потока. *Rortex*-критерий определяется как компонента твердотельного вращения в фиксированной точке и может быть рассчитан как:

$$R = \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{e}_r - \sqrt{(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{e}_r)^2 - 4\lambda_{ci}^2},$$

где $\boldsymbol{\omega}$ – вектор завихренности, \mathbf{e}_r – нормализованный собственный вектор $\nabla \mathbf{u}$. Вихрем определяется область, в которой $R \neq 0$.

Кроме того, используя \mathbf{e}_r , мы можем определить ось вращения локального потока в точке. Тогда *Rortex*-вектором будет являться величина:

$$\mathbf{R} = R \cdot \mathbf{e}_r.$$

Важной особенностью этого критерия служит возможность определения направления вращения вокруг вертикальной оси (\mathbf{e}_r) по знаку величины R . А именно, если $R > 0$, то движение является циклоническим, а при $R < 0$ – антициклоническим.

Стоит отметить, что хотя все рассмотренные критерии были изначально разработаны для трехмерных потоков, их применение к двумерным движениям приводит к аналогичным результатам.

Результаты

Ниже будет показана применимость описанных выше критериев на данных синтетического двумерного вихря (ЛЮ) и результатах идеализированного тропического циклона. Поскольку для определения вихря важен только знак критериев, то в этом разделе на рисунках не показаны абсолютные значения.

Вихрь Лэмба-Осеена

На рисунке 1 представлены результаты вычисления МИВ на двумерном потоке Куэтта, в который встроены синтетические циклонический и антициклонический ЛЮ-вихри. Черная окружность – заданный аналитически радиус вихря. Можно заметить, что вихревые области, которые идентифицированы Q , Δ и λ_2 критериями (рисунок 1 а–в) определяют заметно меньшие размеры вихря, чем аналитическое условие. Хорошо размер вихря определяется с помощью λ_{ci} , *Rortex* и ω_z (рисунок 1 г–е), однако направление вращения дают только *Rortex* и ω_z . При этом

для использования ω_z требуется задание порогового значения, без которого нельзя определить внешнюю границу вихря. Что делает относительную завихренность неприменимой в общем случае, поскольку это пороговое значение будет варьироваться с высотой, формой и типами вихря. Кроме того, завихренность не является галилеевым инвариантом.

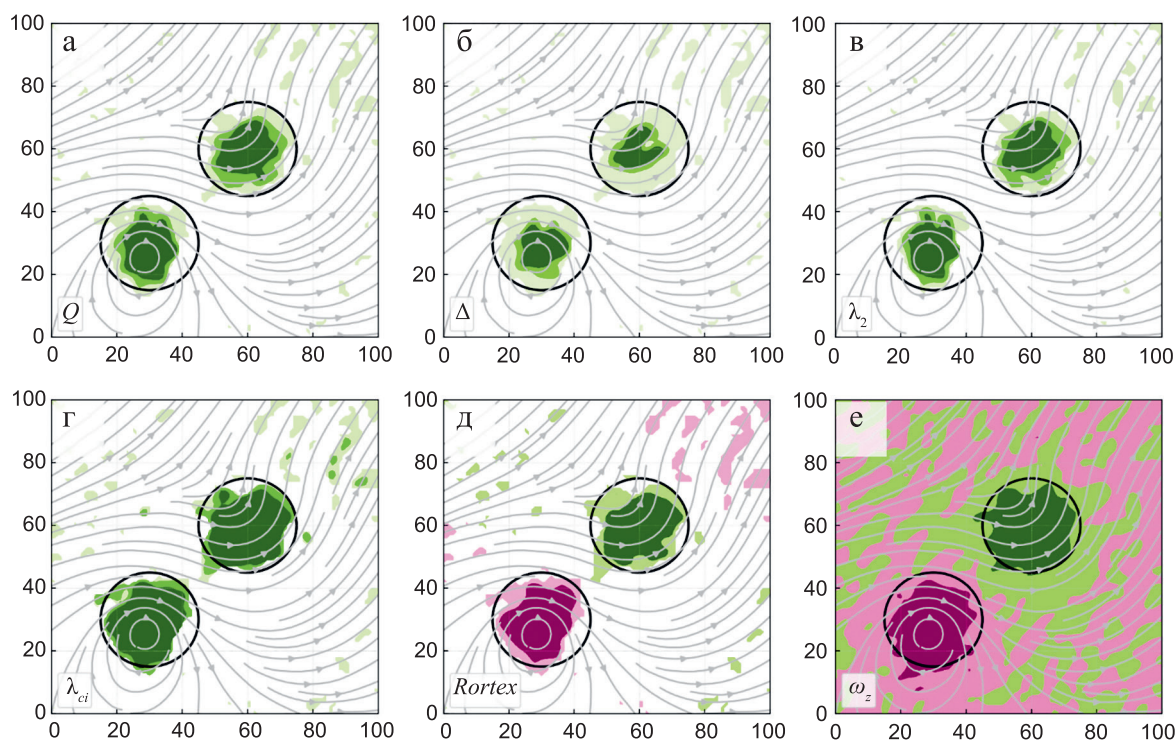


Рис. 1 – Иллюстрация применения Q (а), Δ (б), λ_2 (в), λ_{ci} (г), $Rortex$ (д) и ω_z (е) критериев для данных с ЛО-вихрями. Для (а–г) зеленой заливкой выделены области, удовлетворяющие условию когерентной структуры (> 0). Для (д–е) зеленой заливкой обозначено циклоническое вращение локального потока, розовой – антициклоническое. Серые стрелки – линии тока. Черные круги – аналитически заданный радиус вихрей ($r_{max} = 15$)

Идеализированный тропический циклон

Идеализированное моделирование тропического циклона является удобным инструментом для исследования критериев выделения вихря, поскольку, с динамической точки зрения, эксперимент был проделан с использованием полной системы уравнений Навье-Стокса, т. е. он максимально приближен к реальным условиям. Тем не менее, положение вихря контролируется начальными и граничными условиями так, чтобы циклон находился все время в центре расчетной сетки.

Для оптимизации расчета $Rortex$ -критерия в текущем исследовании мы предполагаем, что все КВС имеют вертикальную ось вращения. Ввиду квазидвумерности, это предположение остается верным для большинства синоптических и мезомасштабных структур в атмосфере и океане.

На рисунке 2 приведена иллюстрация применения критериев на высоте 500 гПа. Хорошо видно, что результаты применения Δ -критерия (б) наиболее зашумлены, как следствие, использование более строгого условия Q -критерия значительно корректнее. Применение относительной завихренности (е) также приводит к большому количеству шума, который затрудняет поиск вихревых структур. Много шума, хотя и в меньшей степени, производят и Q (а) с λ_2 (в) критерии. Наиболее подходящими методами для случая реальной атмосферы видятся λ_{ci} (г) и *Rortex* (д). Поскольку *Rortex* предоставляет информацию и о направлении вращения, наиболее подходящим критерием является именно он.

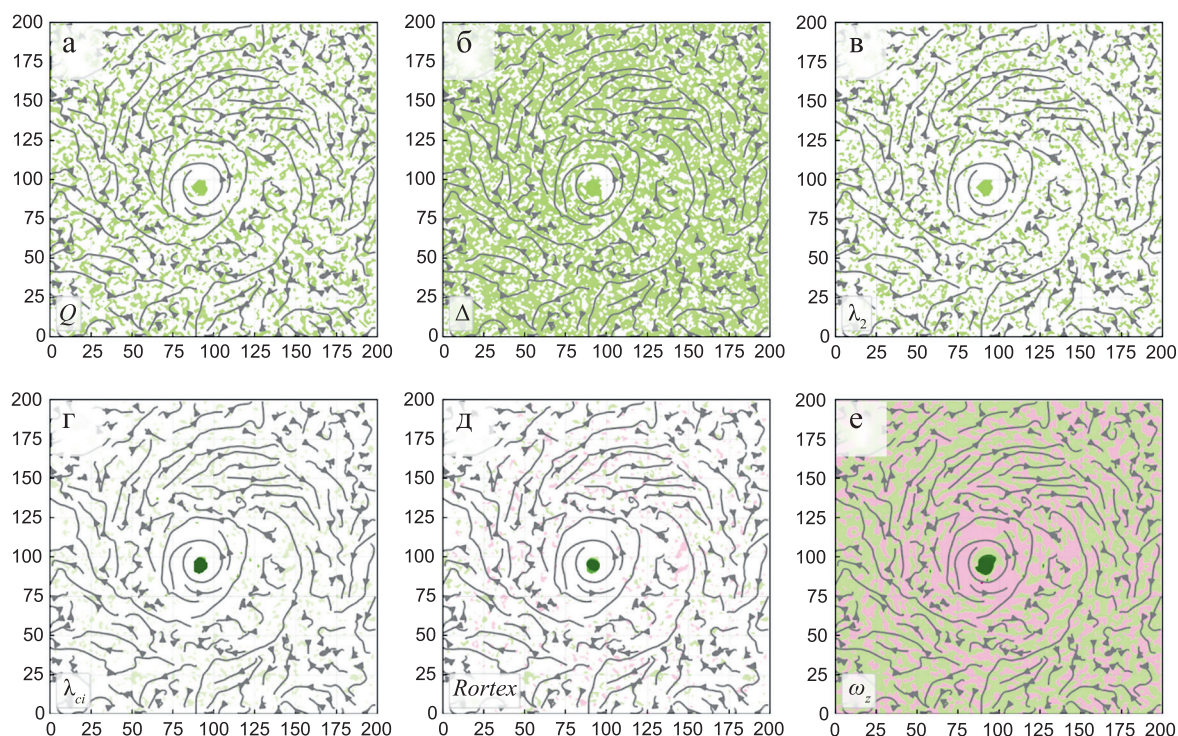


Рис. 2 – Иллюстрация применения Q (а), Δ (б), λ_2 (в), λ_{ci} (г), *Rortex* (д) и ω_z (е) критериев для данных идеализированного ТЦ на высоте 500 гПа на 6 день (стадия максимального развития). Для (а–г) зеленой заливкой выделены области, удовлетворяющие условию когерентной структуры (> 0). Для (д–е) зеленой заливкой обозначено циклоническое вращение локального потока, розовой – антициклоническое. Яркость заливки характеризует интенсивность вращения. Серые стрелки – линии тока

Таким образом, как и в случае синтетического вихря, наиболее ярко ядро вихря выделяется с помощью λ_{ci} и *Rortex* критериев. Значения этих критериев позволяют отчетливо отделить его от окружающего потока. Однако имеющаяся у *Rortex*-критерия возможность дополнительно предоставлять информацию о направлении вращения и отсутствие необходимости использовать пороговые значения, делает его выбор более предпочтительным.

Следует отметить, что математическая постановка *Rortex*-критерия вынуждает его срабатывать только в присутствии твердотельного вращения. В гидродинамике

жидкости такое вращение соответствует только ядру вихря. Таким образом, проблема границ все еще остается открытой. Эту задачу планируется решить в будущем с помощью топологического анализа поля скорости или лагранжевого подхода к выделению вихря. Тем не менее, полученные результаты потенциально позволяют получить большое количество полезной информации. Ниже будет представлена методология определения размеров выделенных структур.

Геометрические характеристики вихрей

Аналогично проведенному ранее исследованию (Koshkina et al., 2023), для независимого выделения каждой когерентной структуры в данной работе предлагается применение алгоритма машинного обучения для плотностной кластеризации данных (DBSCAN, (Schubert et al., 2017)). Алгоритм позволяет выделять группы точек (кластеры) произвольной формы, а также идентифицировать шумовые точки, которые не принадлежат ни одному кластеру. Для упрощения восприятия результатов кластеризация проводилась на каждом из вертикальных уровней в отдельности. В качестве признакового описания использовались горизонтальные координаты точек, удовлетворяющих значениям критериев. Как следствие, метод несложно обобщается на трехмерный случай. Стоит отметить, что в случае *Rortex*-критерия кластеризация циклонических (Ц) и антициклонических (АЦ) структур проводилась независимо.

Варьируемыми параметрами используемого метода являются максимальное расстояние между точками, принадлежащими одному кластеру (*eps*), и минимальное количество точек-соседей в кластере *min_samples*. После процедуры кластеризации была проведена фильтрация кластеров, содержащих менее 50 точек, с целью очистки данных от большого количества вихрей с размером меньшим, чем масштаб эффективного разрешения данных.

Дальнейшим шагом работы стало вычисление геометрических характеристик каждого отдельного вихря с целью последующей оценки их термодинамических свойств и построения климатологии различных атмосферных процессов. Результаты расчета геометрических характеристик для синтетического вихря и тропического циклона приведены на рисунке 3. Черной сплошной линией обозначена граница КВС на основе радиального метода, описанного в работе (Koshkina et al., 2023), черной прерывистой линией – оценка эффективного радиуса КВС. Черным пунктиром обозначен наложенный на КВС эллипс, соответствующий оценке параметра вытянутости. В данных аналитического поля скорости с ЛО-вихрями (рисунок 3а) наблюдается хорошее соответствие размеров Ц и АЦ вихрей с изначально заданным при моделировании радиусом структур (красная прерывистая линия).

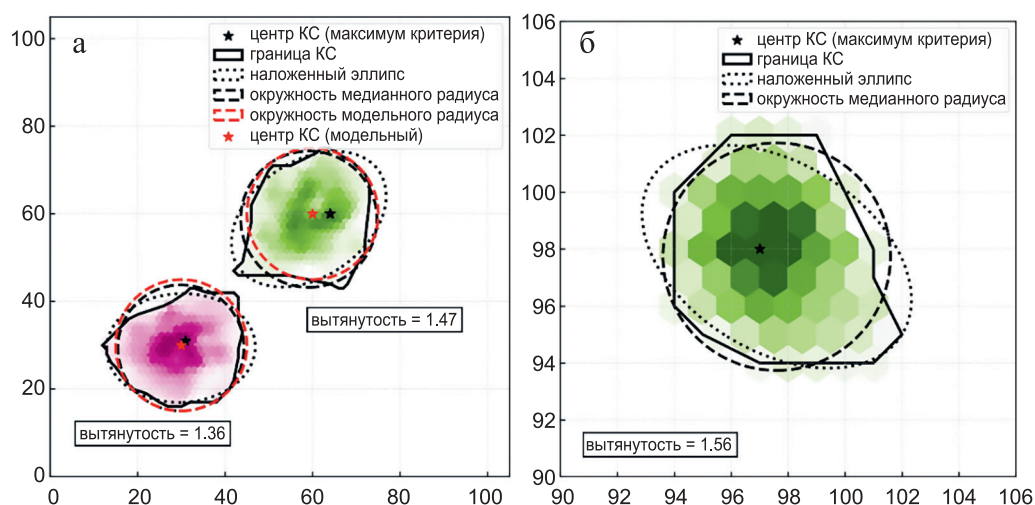


Рис. 3 – Иллюстрация метода определения внешней границы ядра КВС для двумерного поля с ЛО-вихрями (а) и идеализированного ТЦ (б). Заливка – поле *Rortex*-критерия. Звездочками обозначены центры КВС согласно максимуму *Rortex*-критерия (черный) и изначальным модельным данным (красный). Черной сплошной линией обозначена выделенная радиальным методом граница, черной штриховой линией – окружность медианного радиуса, черным пунктиром – наложенный на КВС эллипс. Красной штриховой линией обозначена окружность модельного радиуса.

Обсуждение и выводы

Данное исследование показывает, что некоторые наиболее популярные в мелко-масштабной турбулентности эйлеровы методы идентификации когерентных структур могут быть применены к данным геофизического пространственного масштаба как атмосферы, так и океана.

В первую очередь, было проведено исследование применимости МИВ к синтетическим данным сдвигового фонового потока, в который внедрены циклонический и антициклонический вихри Лэмба-Осеена. Все рассмотренные в исследовании методы верно обнаружили оба вихревых движения. Тем не менее, границы индивидуальных КВС отличались. Наилучшее согласие аналитического радиуса с границей вихря показали λ_{ci} и *Rortex* критерии. Остальные или показали меньший размер вихря (Q , Δ и λ_2), или неспособность выделить вихрь из потока (ω_z).

Что касается случая приближенного к реальности эксперимента с идеализированным ТЦ, то здесь картина немного отличается. Наиболее шумным показал себя Δ -критерий, так же из-за шума затруднительно пользоваться Q и λ_2 критериями. Все три критерия характеризуются ненадежным выделением вихря из фонового потока. Критерий вертикальной компоненты завихренности (ω_z), как и в случае с вихрем ЛО, не позволяет выделить вихревую структуру из фонового потока. Наилучшими методами являются λ_{ci} и *Rortex*. И для задачи выделения вихревой структуры наилучшим образом подходит *Rortex*-критерий, поскольку он не требует указания порогового значения и дополнительно предоставляет информацию о направлении вращения.

Однако, следует помнить, что *Rortex*-критерий основан на выделении области твердотельного вращения. Это означает, что он способен выделить только границу ядра вихря. Тем не менее, *Rortex* является очень полезным инструментом для статистических оценок. К примеру, его можно использовать для отслеживания траекторий вихрей и получения их свойств, для последующего построения климатологии мезомасштабных процессов.

В дальнейшем планируется решить проблему границы вихря с помощью топологического анализа поля скорости или лагранжевого подхода к выделению КВС. Далее, *Rortex*-критерий будет применен к долгопериодным атмосферным данным высокого разрешения, что позволит получить статистические характеристики вихревых структур, их свойства и, используя индивидуальные термодинамические характеристики КВС, планируется провести автоматическую классификацию по типам мезомасштабных процессов и получение климатических трендов количеств, размеров и интенсивности КВС.

Благодарности. Работа была выполнена за счет гранта РФФ 24-27-00404.

Список литературы

1. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. Т. 2. М.: Наука, 1965. 740 с.
2. Ahrens K., Velásquez Study of feature detection methods for aerodynamics. Master's thesis. Universitat Politècnica de Catalunya. 2023.
3. Bosse A., Testor P., Mayot N., Prieur L., d'Ortenzio F., Mortier L. et al. A submesoscale coherent vortex in the Ligurian Sea: From dynamical barriers to biological implications // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. Vol. 122. No. 8. P. 6196–6217.
4. Chakraborty P., Balachandar S., Adrian R. J. On the relationships between local vortex identification schemes // *Journal of Fluid Mechanics*. 2005. Vol. 535. P. 189–214. ISSN: 00221120. <https://doi.org/10.1017/S0022112005004726>.
5. Cuissa J. C., Steiner O. Innovative and automated method for vortex identification-i. description of the swirl algorithm // *Astronomy & Astrophysics*. 2022. 668.
6. Fairall C. W., Bradley E. F., Hare J. E., Grachev A. A., Edson J. B. Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm // *Journal of Climate*. 2003. Vol. 16. No. 4. P. 571–591. ISSN: 08948755. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<0571:BP OASF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<0571:BP OASF>2.0.CO;2).
7. Haller G. An objective definition of a vortex // *Journal of fluid mechanics*. 2005. Vol. 525. P. 1–26. <https://doi.org/10.1017/S0022112004002526>.
8. Haller G., Yuan G. Lagrangian coherent structures and mixing in two-dimensional turbulence // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 2000. Vol. 147. No. 3–4. P. 352–370. ISSN: 01672789. [https://doi.org/10.1016/S0167-2789\(00\)00142-1](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(00)00142-1).
9. Hong S.-Y., Noh Y., Dudhia J. A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes // *Monthly Weather Review*. 2006. Vol. 134. No. 9. P. 2318–2341. ISSN: 0027-0644. <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>.
10. Hunt J. C. R., Wray A. A., Moin P. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows. Center for Turbulence Research // *Proceedings of the Summer Program*. 1988. No. 1970. P. 193–208.
11. Jeong J., Hussain F. On the identification of a vortex // *Journal of Fluid Mechanics*. 1995. Vol. 285. P. 69–94. ISSN: 14697645. <https://doi.org/10.1017/S0022112095000462>.

12. *Jiang X., Lefauve A., Dalziel S. B., Linden P. F.* The evolution of coherent vortical structures in increasingly turbulent stratified shear layers // *Journal of Fluid Mechanics*. 2022. Vol. 947. P. A30.
13. *Jordan C. L.* Mean soundings for the west indies area // *Journal of Atmospheric Sciences*. 1958. Vol. 15. No. 1. P. 91–97. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1958\)015<0091:MSFTWI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1958)015<0091:MSFTWI>2.0.CO;2).
14. *Jordan C. L., Hurt Jr. D. A., Lowrey C. A.* On the structure of hurricane daisy on 27 august 1958 // *Journal of Atmospheric Sciences*. 1960. Vol. 17. No. 3. P. 337–348.
15. *Kessler E.* On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations // *American Meteorological Society*. 1969.
16. *Kolář V.* Vortex identification: New requirements and limitations // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2007. Vol. 28. No. 4. P. 638–652. ISSN: 0142727X. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.03.004>. www.elsevier.com/locate/ijhff.
17. *Kolář V., Moses P., Šístek J.* Local corotation of line segments and vortex identification // In *Proceedings of the Seventeenth Australasian Fluid Mechanics Conference*. 2010. P. 251–254.
18. *Koshkina V., Gavrikov A., Gulev S.* Methods of identifying atmospheric mesoscale coherent structures over the north atlantic // *Oceanology*. 2023. Vol. 63. Suppl. 1. P. S110.
19. *Liu C., Wang Y., Yang Y., Duan Z.* New omega vortex identification method // *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*. 2016. Vol. 59. P. 1–9.
20. *Liu C., Gao Y., Tian S., Dong X.* Rortex – a new vortex vector definition and vorticity tensor and vector decompositions // *Physics of Fluids*. 2018. Vol. 30. No. 3.
21. *Lugt H. J.* The dilemma of defining a vortex // *Recent developments in theoretical and experimental fluid mechanics: Compressible and incompressible flows*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1979. P. 309–321. https://doi.org/10.1007/978-3-642-67220-0_32.
22. *Okubo A.* Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences // *Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1970. Vol. 17. No. 3. P. 445–454. ISSN: 00117471. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(70\)90059-8](https://doi.org/10.1016/0011-7471(70)90059-8).
23. *Oseen C.* Über die wirbelbewegung in einer reibenden flüssigkeit // *Ark. Mat. Astro. Fys*. 7. 1912.
24. *Perry A. E., Chong M. S.* A description of eddying motions and flow patterns using critical-point concepts // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1987. Vol. 19. No. 1. P. 125–155. www.annualreviews.org.
25. *Prants S. V., Budyansky M. V., Ponomarev V. I., Uleysky M. Y.* Lagrangian study of transport and mixing in a mesoscale eddy street // *Ocean modelling*. 2011. Vol. 38. No. 1–2. P. 114–125. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2011.02.008>.
26. *Robinson S. K.* Coherent motions in the turbulent boundary layer // *Annual review of fluid mechanics*. 1991. Vol. 23 (1). P. 601–639.
27. *Schielicke L.* Scale-dependent identification and statistical analysis of atmospheric vortex structures in theory, model and observation. Ph. D. Thesis, Freie Universität Berlin, Berlin, Germany. 2017.
28. *Schubert E., Sander J., Ester M., Kriegel H. P., Xu X.* DBSCAN revisited, revisited: Why and how you should (still) use DBSCAN // *ACM Transactions on Database Systems*. 2017. Vol. 42. No. 3. P. 1–21. ISSN: 15574644. <https://doi.org/10.1145/3068335>.
29. *Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Barker D. M.* A description of the Advanced Research WRF Version 3 // *NCAR technical note*. 2008. Vol. 475. P. 113.
30. *Stramma L., Bange H. W., Czeschel R., Lorenzo A., Frank M.* On the role of mesoscale eddies for the biological productivity and biogeochemistry in the eastern tropical Pacific Ocean off Peru // *Biogeosciences*. 2013. Vol. 10. No. 11. P. 7293–7306.
31. *Weiss J.* The dynamics of enstrophy transfer in two-dimensional hydrodynamics // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1991. Vol. 48 No. 2. P. 273–294. ISSN: 0167-2789. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(91\)90088-Q](https://doi.org/10.1016/0167-2789(91)90088-Q).
32. *Xu W., Gao Y., Deng Y., Liu J., Liu C.* An explicit expression for the calculation of the rortex vector // *Physics of Fluids*. 2019. No. 31 (9).

33. Yu Y., Shrestha P., Nottage C., Liu C. Principal coordinates and principal velocity gradient tensor decomposition // *Journal of Hydrodynamics*. 2020. Vol. 32. P. 441–453.
34. Zhang W., Wolfe C. L., Abernathey R. Role of surface-layer coherent eddies in potential vorticity transport in quasigeostrophic turbulence driven by eastward shear // *Fluids*. 2019. Vol. 5. No. 1. P. 2.
35. Zhou J., Adrian R. J., Balachandar S., Kendall T. Mechanisms for generating coherent packets of hairpin vortices in channel flow // *Journal of Fluid Mechanics*. 1999. Vol. 387. P. 353–396.

Статья поступила в редакцию 31.05.2024, одобрена к печати 16.11.2024.

Для цитирования: Кошкина В. С., Гавриков А. В. Исследование применимости методов идентификации когерентных вихревых структур в модельных экспериментах // *Океанологические исследования*. 2024. № 52 (4). С. 90–107. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(4\).6](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(4).6).

INVESTIGATION OF THE APPLICABILITY OF COHERENT VORTEX STRUCTURES IDENTIFICATION METHODS IN MODEL EXPERIMENTS

V. S. Koshkina^{1,2}, A. V. Gavrikov¹

¹ *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: gavr@sail.msk.ru;*

² *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
9, Institutskiy pereulok, Dolgoprudny, 141701, Russia,
e-mail: koshkina.vs@phystech.edu*

Stable in time vortices, which can be considered as coherent vortex structures (CVSs), highly influence processes of momentum, heat and mass transfer in any fluid, including an atmosphere and an ocean. They affect all scales of motion, as a consequence, vortices of all scales play a crucial role in climatological system of Earth. Nowadays the most studied processes in geophysics are large vortices (cyclones), while mesoscale and submesoscale processes in the atmosphere and ocean remain at “gray zone”, especially little information on their impact on the climate scale. Climate assessment requires the ability to automatically identify CVS in spatial data (for example, in numerical modeling data). The main limitation in development of this direction is the lack of strict mathematical definition of a vortex. Some developments in this direction have been carried out in the field of small-scale turbulence, where a number of criteria have been developed. The main advantage of this methodology is the ability to identify vortex motions of any scale and in any continuous medium, the minimum size of the vortex is determined exclusively by the spatial resolution of the data used. The paper examines applicability of these vortex identification methods (VIMs) to significantly larger-scale geophysical data.

For analysis, the most proven Eulerian methods of vortex identification were chosen, which are Q , Δ , λ_2 , λ_{ci} and *Rortex* criteria. The paper demonstrates the comparison of three generations of VIMs in application to idealized two- and three-dimensional vortices.

The study showed that *Rortex* criterion is the most promising in the case of identification of atmospheric mesoscale processes: it most reliably identifies the CVS, and also provides information about the direction of rotation. The DBSCAN method, used in the study for clustering of individual coherent structures, makes it possible to estimate the geometric properties and various vortex statistics. The developed approach can be used for climate analysis of the dynamics of mesoscale vortices.

Keywords: coherent structures, idealized vortices, mesoscale atmospheric processes, vortex identification, numerical modeling

Acknowledgement: This work was supported by grant No. 24-27-00404.

References

1. Ahrens Velásquez K., 2023: *Study of feature detection methods for aerodynamics*. Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
2. Bosse, A., P. Testor, N. Mayot, L. Prieur, F. d'Ortenzio, L. Mortier, and P. Raimbault, 2017: A submesoscale coherent vortex in the Ligurian Sea: From dynamical barriers to biological implications. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **122** (8), 6196–6217.
3. Chakraborty, P., S. Balachandar, and R. J. Adrian, 2005: On the relationships between local vortex identification schemes. *Journal of Fluid Mechanics*, **535**, 189–214.
4. Cuissa, J. C. and O. Steiner, 2022: Innovative and automated method for vortex identification-I. Description of the swirl algorithm. *Astronomy & Astrophysics*, 668.
5. Fairall, C. W., E. F. Bradley, J. E. Hare, A. A. Grachev, and J. B. Edson, 2003: Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm. *Journal of Climate*, **16** (4), 571–591, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<0571:BPOASF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<0571:BPOASF>2.0.CO;2).
6. Haller, G., 2005: An objective definition of a vortex. *Journal of fluid mechanics*, **525**, 1–26, <https://doi.org/10.1017/S0022112004002526>.
7. Haller, G. and G. Yuan, 2000: Lagrangian coherent structures and mixing in two-dimensional turbulence. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, **147** (3–4), 352–370, [https://doi.org/10.1016/S0167-2789\(00\)00142-1](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(00)00142-1).
8. Hong, S.-Y., Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Monthly Weather Review*, **134** (9), 2318–2341, <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>.
9. Hunt, J. C. R., A. A. Wray, and P. Moin, 1988: Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows. *Center for Turbulence Research, Proceedings of the Summer Program*, 193–208.
10. Jeong, J. and F. Hussain, 1995: On the identification of a vortex. *Journal of Fluid Mechanics*, **285**, 69–94, <https://doi.org/10.1017/S0022112095000462>.
11. Jiang, X., A. Lefauve, S. B. Dalziel, and P. F. Linden, 2022: The evolution of coherent vortical structures in increasingly turbulent stratified shear layers. *Journal of Fluid Mechanics*, **947**, A30.
12. Jordan, C. L., 1958: Mean soundings for the west indies area. *Journal of Atmospheric Sciences*, **15** (1), 91–97, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1958\)015<0091:MSFTWI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1958)015<0091:MSFTWI>2.0.CO;2).
13. Jordan, C. L., D. A. Hurt Jr, and C. A. Lowrey, 1960: On the structure of hurricane daisy on 27 august 1958. *Journal of Atmospheric Sciences*, **17** (3), 337–348.
14. Kessler, E., 1969: On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations. *American Meteorological Society*.
15. Kolář, V., 2007: Vortex identification: New requirements and limitations. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **28** (4), 638–652, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.03.004>.
16. Kolář, V., P. Moses, and J. Šístek, 2010: Local corotation of line segments and vortex identification. In: *Proceedings of the Seventeenth Australasian Fluid Mechanics Conference*, 251–254.
17. Koshkina, V., A. Gavrikov, and S. Gulev, 2023: Methods of identifying atmospheric mesoscale coherent structures over the north atlantic. *Oceanology*, **63** (Suppl 1), S110.
18. Liu, C., Y. Wang, Y. Yang, and Z. Duan, 2016: New omega vortex identification method. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, **59**, 1–9.

19. Liu, C., Y. Gao, S. Tian, and X. Dong, 2018: Rortex – a new vortex vector definition and vorticity tensor and vector decompositions. *Physics of Fluids*, **30** (3).
20. Lugt, H. J., 1979: The Dilemma of Defining a Vortex. In *Recent Developments in Theoretical and Experimental Fluid Mechanics*, 309–321, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, https://doi.org/10.1007/978-3-64267220-0_32.
21. Monin, A. S. and A. M. Yaglom, 1965: *Statisticheskaya gidromekhanika: mekhanika turbulentnosti*. Vol. 2: Statistical hydromechanics: mechanics of turbulence. Moscow, Nauka, 740 p.
22. Okubo, A., 1970: Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences. *Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts*, **17** (3), 445–454, [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(70\)90059-8](https://doi.org/10.1016/0011-7471(70)90059-8).
23. Oseen, C., 1912: Uber die wirbelbewegung in einer reibenden flussigkeit. *Arkiv för matematik, astronomi och fysik*, **7**.
24. Perry, A. E. and M. S. Chong, 1987: *A description of eddy motions and flow patterns using critical-point concepts*. Technical report. www.annualreviews.org.
25. Prants, S. V., M. V. Budyansky, V. I. Ponomarev, and M. Y. Uleysky, 2011: Lagrangian study of transport and mixing in a mesoscale eddy street. *Ocean modelling*, **38** (1–2), 114–125.
26. Robinson, S. K., 1991: Coherent motions in the turbulent boundary layer. *Annual review of fluid mechanics*, **23** (1), 601–639.
27. Schielicke, L., 2017: Scale-dependent identification and statistical analysis of atmospheric vortex structures in theory, model and observation. Ph. D. Thesis, Freie Universität Berlin, Berlin, Germany.
28. Schubert, E., J. Sander, M. Ester, H. P. Kriegel, and X. Xu, 2017: DBSCAN revisited, revisited: Why and how you should (still) use DBSCAN. *ACM Transactions on Database Systems*, **42** (3), <https://doi.org/10.1145/3068335>.
29. Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, and D. M. Barker, 2008: A description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note. NCAR, Boulder, Colorado.
30. Stramma, L., H. W. Bange, R. Czeschel, A. Lorenzo, and M. Frank, 2013: On the role of mesoscale eddies for the biological productivity and biogeochemistry in the eastern tropical Pacific Ocean off Peru. *Biogeosciences*, **10** (11), 7293–7306.
31. Weiss, J., 1991: The dynamics of enstrophy transfer in two-dimensional hydrodynamics. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, **48** (2), 273–294, [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(91\)90088-Q](https://doi.org/10.1016/0167-2789(91)90088-Q).
32. Xu, W., Y. Gao, Y. Deng, J. Liu, and C. Liu, 2019: An explicit expression for the calculation of the rortex vector. *Physics of Fluids*, **31** (9).
33. Yu, Y., P. Shrestha, C. Nottage, and C. Liu, 2020: Principal coordinates and principal velocity gradient tensor decomposition. *Journal of Hydrodynamics*, **32**, 441–453.
34. Zhang, W., C. L. Wolfe, and R. Abernathy, 2019: Role of surface-layer coherent eddies in potential vorticity transport in quasigeostrophic turbulence driven by eastward shear. *Fluids*, **5** (1), 2.
35. Zhou, J., R. J. Adrian, S. Balachandar, and T. Kendall, 1999: Mechanisms for generating coherent packets of hairpin vortices in channel flow. *Journal of fluid mechanics*, **387**, 353–396.

Submitted 31.05.2024, accepted 16.11.2024.

For citation: Koshkina, V. S. and A. V. Gavrikov, 2024: Investigation of the applicability of coherent vortex structures identification methods in model experiments. *Journal of Oceanological Research*, **52** (4), 90–107, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR2024.52\(4\).6](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR2024.52(4).6).