

1989

# ON THE FORECAST OF LENS-LIKE EDDY TRAJECTORIES IN THE OCEAN

KOSTIANOI, AG

<http://hdl.handle.net/10026.1/9729>

---

DOKLADY AKADEMII NAUK SSSR

---

*All content in PEARL is protected by copyright law. Author manuscripts are made available in accordance with publisher policies. Please cite only the published version using the details provided on the item record or document. In the absence of an open licence (e.g. Creative Commons), permissions for further reuse of content should be sought from the publisher or author.*

© А.Г. КОСТЯНОЙ, Г.И. ШАПИРО

## О ПРОГНОЗЕ ТРАЕКТОРИЙ ВИХРЕВЫХ ЛИНЗ В ОКЕАНЕ

*(Представлено академиком Л.М. Бреховским 19 I 1989)*

В последние годы заметно вырос интерес к изучению особого вида мезомасштабных когерентных океанских вихрей, в которых максимальные скорости достигаются на глубинных горизонтах, в то время как на поверхности динамический сигнал отсутствует вовсе, либо наблюдается в ослабленной форме. Эти вихри неразрывно связаны с линзами аномальных вод, и их принято называть внутритеrmоклиническими вихрями [1] или, более широко, вихревыми линзами (ВЛ) [2].

В настоящее время в Мировом океане обнаружено более 300 ВЛ, расположенных на глубинах от 70 до 4000 м [3–7]. Вихревые линзы транспортируют в своем ядре аномалии температуры, солености, химических элементов, типичные для районов их зарождения, на тысячи километров, а затем растворяются в окружающей среде. ВЛ реализуют особый, дискретный механизм глобального тепломассообмена, не похожий на процесс обычной турбулентной диффузии. Вклад этого механизма может быть весьма заметным. По оценкам [5] около 40% всего вытока средиземноморских вод в Атлантику переносится далее в виде линз. Для водообмена через Берингов пролив аналогичные оценки дают 30–100% [8].

Одной из важных задач является определение возможных путей следования ВЛ от очага их формирования. Изучение траекторий ВЛ экспедиционным методом является дорогостоящим предприятием, поскольку время жизни ВЛ достигает, по имеющимся оценкам, от 2–4 [3, 5] до 10 лет [9]. В настоящее время известна только одна линза, за перемещением которой следили в течение достаточно долгого времени (2 года) [10].

Из теории известны два механизма перемещения вихревых линз: первый – самоподвижение, обусловленное  $\beta$ -эффектом (" $\beta$ -дрейф"), второй – адвекция ведущим потоком, т.е. течением большего пространственного масштаба. Расчеты скорости " $\beta$ -дрейфа"  $V_\beta$ , выполненные с учетом реальной стратификации [11], дают величину порядка

$$(1) \quad V_\beta = \frac{\beta}{2f} V_* R_*,$$

где  $V_*$ ,  $R_*$  – типичные значения орбитальной скорости и радиуса линзы,  $f$  – параметр Кориолиса,  $\beta = \partial f / \partial y$ . Для большинства известных линз  $V_\beta \ll 1$  см/с и  $\beta$ -дрейфом можно пренебречь при наличии даже слабого течения порядка 1 см/с.

Сложность расчета переноса ВЛ течениями состоит в том, что на горизонтах, где обычно располагаются линзы, мы не имеем достаточной информации о скорости и направлении течений.

В данной работе мы предлагаем использовать для прогноза траекторий ВЛ на длительный срок метод лагранжевых инвариантов. Как известно, лагранжевым инвариантом называют такую величину, которая сохраняет свое значение при движении жидкой частицы. На тех глубинах, где диффузионные потоки тепла, соли и импульса малы, движение можно считать адиабатическим.

Согласно теореме Эртеля для любого адиабатического лагранжева инварианта  $\sigma$  справедлива формула [12]

$$(2) \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\vec{\omega} \nabla \sigma}{\rho} \right) = \frac{1}{\rho^3} (\nabla \rho \times \nabla P) \nabla \sigma,$$

где  $\vec{\omega} = 2\vec{\Omega} + \text{rot } \mathbf{V}$  – трехмерный вектор абсолютной завихренности,  $\vec{\Omega}$  – угловая скорость вращения Земли,  $\rho$  – плотность,  $P$  – давление. Возьмем в качестве  $\sigma$  потенциальную плотность  $\rho_\theta$ , которая определяется формулой [12]

$$(3) \quad \rho_\theta = \rho - \int_{P_0}^P \frac{dP}{c^2},$$

где  $c$  – скорость звука,  $P_0$  – отсчетное давление. Потенциальная плотность является адиабатическим инвариантом

$$(4) \quad d\rho_\theta/dt = 0.$$

Из (2), (3) получаем, пренебрегая малой изменчивостью скорости звука,

$$(5) \quad dQ_\theta/dt = 0,$$

где  $Q_\theta = (\vec{\omega} \nabla \rho_\theta)/\rho$  – потенциальный вихрь, рассчитанный по потенциальной плотности. Из (4), (5) следует, что частица жидкости движется одновременно по поверхностям постоянной потенциальной плотности  $\rho_\theta$  и постоянного потенциального вихря  $Q_\theta$ , а значит, и по линии их пересечения, которая и является искомой траекторией движения.

Адвекция ВЛ осуществляется течениями, пространственный масштаб которых значительно превышает поперечник линзы, баланс сил близок к геострофическому и, следовательно, относительная завихренность мала по сравнению с абсолютной. Тогда выражение для  $Q_\theta$  можно приближенно записать в виде

$$(6) \quad Q_\theta = \frac{f d\rho_\theta}{\rho dz},$$

оно отличается от известной свердуповской формулы тем, что в (6) под знак производной входит  $\rho_\theta$ , а не  $\rho$ .

Для расчетов  $Q_\theta$  по формуле (6) достаточно располагать только гидрологическими данными, которые гораздо более многочисленны, чем данные по течениям. Зная распределения  $\rho_\theta$  и  $Q_\theta$ , можно прогнозировать траектории течений, а с ними и траектории ВЛ, отыскивая линии постоянства  $\rho_\theta$  и  $Q_\theta$ , начинающиеся в районе формирования ВЛ.

Для проверки этой гипотезы мы использовали данные о вихревых линзах средиземноморских вод (СМВ) в Северной Атлантике, по которым имеется большое число натурных наблюдений [3–5]. Распределение линз СМВ по плотности имеет два максимума в диапазонах  $\sigma_\theta = 27,45 - 27,55$  и  $\sigma_\theta = 27,65 - 27,85$  [4], которые соответствуют типичным значениям плотности верхнего и нижнего слоев СМВ вблизи Гибралтарского пролива. В дальнейшем распространение линз происходит в основном изопикнически. Большинство обнаруженных линз СМВ имеют плотность, близкую к  $\sigma_\theta = 27,75$  [4], только такие линзы мы и будем рассматривать ниже.

Несмотря на то, что районы Северо-Восточной и Северо-Западной Атлантики относительно хорошо изучены, данных о циркуляции СМВ на глубинах, соответствующих  $\sigma_\theta = 27,75$ , явно недостаточно. Обзор работ, содержащих расчеты динамическим методом и данные инструментальных измерений скорости течений в Северо-Восточной Атлантике, приведен в [4].

На рис. 1 показано среднегодовое распределение  $Q_\theta$  на изопикнической поверхности  $\sigma_\theta = 27,75$ , которое получено экстраполяцией данных с поверхностей  $\sigma_\theta = 27,0$  и  $\sigma_\theta = 27,5$ , взятых из атласа [13]. Здесь же отмечены все известные нам линзы СМВ соответствующей плотности. Координаты линз взяты из обзоров [3, 4] и статьи [14].

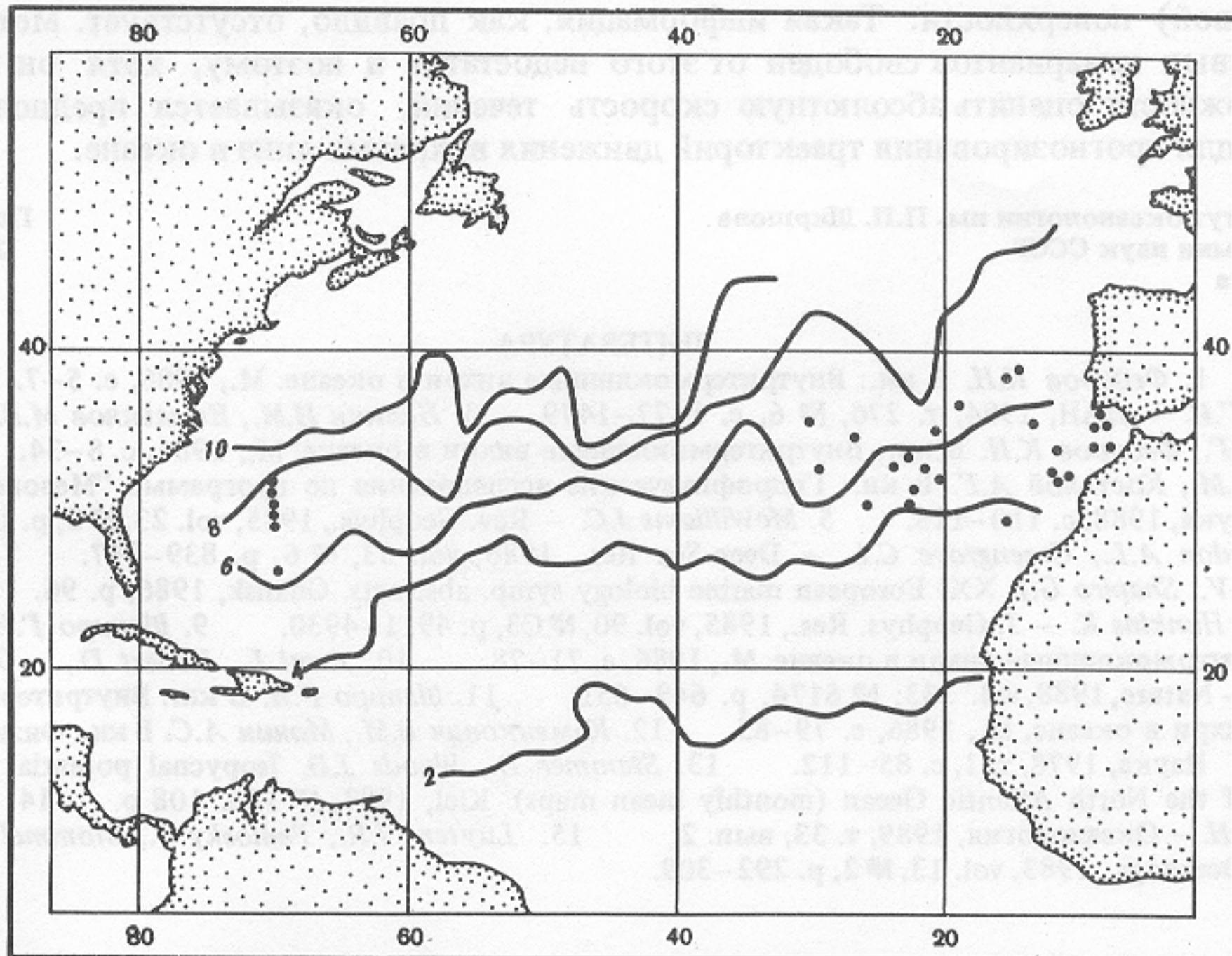


Рис. 1. Среднегодовое распределение потенциального вихря  $Q_\theta$  на изопикнической поверхности  $\sigma_\theta = 27,75$ . Точками отмечены наблюдения линз СМВ. Цифрами указаны значения  $Q_\theta (10^{-11} \text{ рад} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1})$

Из рис. 1 следует, что распространение вихревых линз СМВ действительно происходит в относительно узком диапазоне значений потенциального вихря  $Q_\theta$ . Из 34 линз 31 (т.е. 91%) расположена в полосе  $Q_\theta = (5,5 \pm 2,0) \cdot 10^{-11} \text{ рад} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ , 82% – в полосе  $Q_\theta = (5,5 \pm 1,5) \cdot 10^{-11} \text{ рад} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  и 74% – в полосе  $Q_\theta = (5,5 \pm 1,0) \cdot 10^{-11} \text{ рад} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ . Следовательно, 74% всех линз пересекает Северную Атлантику в относительно узком "коридоре" (учитывая характерный диаметр линз СМВ 60–80 км) шириной 300–700 км, а 82% – шириной 400–1000 км.

Обнаруженные до сих пор линзы концентрируются на восточном и западном концах "коридора". Из проведенного анализа следует, что с достаточно большой вероятностью можно ожидать обнаружение ВЛ в Центральной Атлантике на широтах 29–35° с.ш.

Использование климатических карт  $Q_\theta$  позволяет оценить лишь осредненные траектории ВЛ. Реальные же могут возмущаться сезонным ходом, крупномасштабными волнами Россби и локальными источниками потенциального вихря, возникающими в процессе "вентиляции" термоклина [15]. Изолинии  $Q_\theta$  в диапазоне  $(6\text{--}8) \cdot 10^{-11} \text{ рад} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  из Северо-Восточной Атлантики приводят в Северо-Западную Атлантику в район 25–33° с.ш. (на меридиане 70° з.д.). Именно в этом месте неоднократно наблюдалась ВЛ, содержащие трансформированные СМВ, причем в более широком плотностном диапазоне [4].

Таким образом, данные о распространении основной массы ВЛ в Северной Атлантике хорошо согласуются с результатами расчета траекторий, полученных методом лагранжевых инвариантов. Этот метод, так же как и динамический, основан на использовании гидрологических данных. Отметим, что в динамическом методе требуется дополнительная информация о течениях на некоторой отсчетной

(нулевой) поверхности. Такая информация, как правило, отсутствует. Метод лагранжевых инвариантов свободен от этого недостатка и поэтому, хотя он не дает возможности оценить абсолютную скорость течений, оказывается предпочтительным для прогнозирования траекторий движения вихревых линз в океане.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова  
Академии наук СССР  
Москва

Поступило  
25 I 1989

## ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров К.Н. В кн.: Внутритеrmоклиниые вихри в океане. М., 1986, с. 5–7.
2. Шапиро Г.И. – ДАН, 1984, т. 276, № 6, с. 1477–1479.
3. Белкин И.М., Емельянов М.В., Костяной А.Г., Федоров К.Н. В кн.: Внутритеrmоклиниые вихри в океане. М., 1986, с. 8–34.
4. Белкин И.М., Костяной А.Г. В кн.: Гидрофизические исследования по программе "Мезополигон". М.: Наука, 1988, с. 110–123.
5. McWilliams J.C. – Rev. Geophys., 1985, vol. 23, № 2, p. 165–182.
6. Gordon A.L., Greengrove C.L. – Deep-Sea Res., 1986, vol. 33, № 6, p. 839–847.
7. Emeljanov M.V., Shapiro G.I. XXI European marine biology symp. abstracts. Gdansk, 1986, p. 96.
8. Manley T., Hunkins K. – J. Geophys. Res., 1985, vol. 90, № C3, p. 4911–4930.
9. Шапиро Г.И. В кн.: Внутритеrmоклиниые вихри в океане. М., 1986, с. 71–78.
10. Armi L., Hebert D., Oakey N. et al. – Nature, 1988, vol. 333, № 6174, p. 649–651.
11. Шапиро Г.И. В кн.: Внутритеrmоклиниые вихри в океане. М., 1986, с. 79–85.
12. Каменкович В.М., Монин А.С. В кн.: Физика океана. М.: Наука, 1978, т. 1, с. 85–112.
13. Stammer D., Woods J.D. Isopycnal potential vorticity atlas of the North Atlantic Ocean (monthly mean maps). Kiel, 1987, № 165. 108 p.
14. Филюшкин Б.Н. – Океанология, 1989, т. 33, вып. 2.
15. Luyten J.R., Pedlosky J., Stommel H. – J. Phys. Oceanogr., 1983, vol. 13, № 2, p. 292–309.

УДК 551.465

ОКЕАНОЛОГИЯ

© В.С. САВЕНКО

## РОЛЬ ФЛОТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ФРАКЦИОНИРОВАНИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ МОРСКОГО АЭРОЗОЛЯ

(Представлено академиком К.Я. Кондратьевым 18 I 1989)

Как известно, при схлоповании воздушных пузырьков на поверхности моря в атмосферу поступают мельчайшие капельки раствора, формирующие основную массу океанского аэрозоля. В лабораторных и натурных экспериментах установлено, что образование аэрозолей сопровождается фракционированием химических элементов, содержащихся в морской воде, причем степень их обогащения некоторыми микроэлементами (например, тяжелыми металлами) достигает  $10^2$ – $10^3$  раз [1–3]. Эти наблюдения указывают на важную роль процессов схлопования воздушных пузырьков в формировании специфического состава морского аэрозоля, в том числе и обогащении его токсичными тяжелыми металлами. Очевидно, что выяснение причин фракционирования имеет большое не только геохимическое, но и экологическое значение.

Количественная характеристика процессов фракционирования может быть дана на основе расчета коэффициентов фракционирования

$$(1) \quad K_{\Phi} = (C_i/C_{Na})_a / (C_i/C_{Na})_{Mv},$$