

О ФИЗИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ФРОНТАХ В ОКЕАНЕ

Грузинов В.М.

*Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова,
Россия, 119034, Москва, Кропоткинский пер., д.6,
e-mail: polarf@meteo.ru*

Статья поступила в редакцию 15.01.2019, одобрена к печати 30.05.2019

Выполнен обзор работ Ю.А. Иванова, посвященных исследованию фронтальных зон Мирового океана. Им фактически осуществлен переход от изучения средних стационарных процессов к квазипериодическим и нестационарным. Ю.А. Ивановым была выведена конструктивная формула для вычисления скорости Экмановой подкачки по полю чисто зонального ветра, что позволило проследить сезонные перемещения антарктических зон дивергенции и конвергенции. Им впервые вводится понятие динамического фронта как области дивергенции или конвергенции течения, в отличие от физического фронта как области максимальных горизонтальных градиентов характеристик. Анализируя уравнение вертикальной диффузии, он показывает, что физические фронты находятся на периферии динамических. Ю.А. Иванов, обработав большой фактический материал натурных наблюдений на 86 меридиональных разрезах, получил карту расположения основных фронтальных зон в Южном океане, открыв ранее неизвестную зону Субантарктической дивергенции. Кроме того, он сравнил положение выделенных им фронтов с результатами предыдущих исследований, в частности, с работами Дикона и Макинтоша. Основываясь на разработанной методике расчетов и типовых картах атмосферного давления, он вместе с Б.А. Тареевым разработал простую расчетную схему, позволившую оценить скорость вертикальных потоков в океане в зависимости от расстояния до центра циклона. Основываясь на типовых картах давления, можно определить зоны, в которых создаются благоприятные динамические условия для скопления зоопланктона. В этом также заключается одно из практических применений разработанной Ю.А. Ивановым методики расчетов положения фронтальных зон в океане.

Ключевые слова: фронтальная зона, тангенциальное напряжение, бета-эффект, дивергенция, конвергенция, вертикальная скорость, динамический фронт, физический фронт, конвекция, атмосферное давление, циклон

Доктор физ.-мат. наук, профессор Ю.А. Иванов был одним из первых специалистов нашей страны, обративших внимание на необходимость подробного изучения фронтальных зон в океане.

Фронтальные зоны Мирового океана – это сложные динамические образования, зоны резких контрастов гидрологических характеристик различных водных масс и процессов, протекающих здесь.

Работы, связанные с изучением океанических фронтов, можно отнести к разделу океанологии, который формирует новое направление океанологических исследований – переход от изучения средних стационарных процессов к изучению квазипериодических и нестационарных. В частности, океанические фронты и фронтальные зоны испытывают колебательные изменения разного масштаба. Одним из видов таких колебательных изменений является сезонная изменчивость положения океанических фронтов.

Именно на это обратил внимание Ю.А. Иванов, участвуя в нескольких антарктических экспедициях в Южном океане, обрабатывая материалы наблюдений.

В 1959 г. вышла его статья «Положение и сезонная изменчивость фронтальных зон в Антарктике» (Иванов, 1959).

Определяя фронтальные зоны в океане как районы с максимальными вертикальными скоростями, направленными к поверхности моря (зоны дивергенции) и от поверхности моря (зоны конвергенции), он исследовал факторы, формирующие вертикальную скорость в океане.

Исследование ведется на основе уравнения движения применительно к Южному полушарию:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - A_l \Delta u + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{xz} + fv = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} - A_l \Delta v + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{yz} - fu = -\frac{\partial p}{\partial y} \quad (2)$$

Здесь оси x и y направлены соответственно на восток и север, ось z – вертикально вниз; u – проекция скорости течения на ось x ; v – проекция скорости течения на ось y ; Δ – оператор Лапласа; A_l – коэффициент бокового турбулентного обмена количеством движения, f – параметр Кориолиса, p – приведенное гидростатическое давление, τ_{xz} и τ_{yz} – приведенные компоненты горизонтального касательного напряжения на глубине z .

Дифференцируя первое уравнение по y , второе по x и вычитая первое из второго, он получает уравнение вихря:

$$\frac{\partial}{\partial t} \text{rot}_z \mathbf{u} - A_l \text{rot}_z \Delta \mathbf{u} + \frac{\partial}{\partial z} \text{rot}_z \boldsymbol{\tau}_z - f \text{div} \mathbf{u} + \beta v = 0 \quad (3)$$

где \mathbf{u} – вектор горизонтальной скорости, $\boldsymbol{\tau}_z$ – вектор горизонтального касательного напряжения на глубине z (здесь несколько изменены обозначения векторов, по сравнению с оригинальными).

Интегрируя (3) от 0 до D , где D – глубина трения в смысле Экмана, используя уравнение неразрывности и отбрасывая малые члены более высокого порядка, он получает простое уравнение:

$$fw = \text{rot} \boldsymbol{\tau} - \beta S_y \quad (4)$$

где w – вертикальная скорость, β – изменение параметра Кориолиса с широтой; S_y – проекция полного потока на ось y .

Здесь Иванов отмечает, что подобный подход в 1957 г. независимо применялся Йошида (Yoshida, Han-Lee, 1957), однако Юрий Александрович впервые перехо-

Грузинов В.М.

дит к случаю чисто зонального ветра, когда S_y представляет собой полный поток чисто дрейфового течения. При этом получается конструктивная для вычислений формула вертикальной скорости:

$$w = \frac{\text{rot } \tau}{f} - \frac{\beta}{f^2} \tau_x, \quad (5)$$

где τ_x – зональная составляющая напряжения ветрового трения, $\text{rot } \tau = \frac{\partial \tau_x}{\partial y}$.

Это выражение определяет зависимость вертикальной скорости течения на глубине трения от зонального тангенциального напряжения ветра на поверхности моря. Таким образом, можно определить вертикальные скорости течения в океане, что, по сути, показывает положение фронтальных зон.

Исследуя затем меридиональное распределение тангенциального напряжения ветра, он приходит к распределению вертикальных скоростей, то есть к географическому положению фронтов.

Этот прием позволил Ю.А. Иванову проследить сезонные смещения фронтов и выделить в Южном океане четыре таких фронта: антарктическую дивергенцию, антарктическую конвергенцию, субантарктическую дивергенцию и субтропическую конвергенцию, что отражено в Таблице 1.

И здесь Ю.А. Иванов впервые приближается к новому понятию в океанологии. Он вводит понятия динамического и физического фронта. Это сделано в работе «Фронтальные зоны Южного океана» (совместно с В.Г. Нейманом) (Иванов, Нейман, 1965). В этой работе показано, что основной причиной возникновения динамического фронта является поперечная циркуляция, приводящая к образованию зон максимального подъема и опускания вод на периферии основного потока течения. При этом максимальные градиенты физических свойств в океане, характеризующие районы физических фронтов, формируются в результате совместного эффекта меридиональной и вертикальной адвекции.

В этой работе Ю.А. Иванов дал определение понятиям динамического и физического фронтов.

Динамический фронт определяется как район, в котором дивергенция горизонтальной составляющей полного потока имеет экстремум, что соответствует экстремуму вертикальной составляющей скорости течения.

Таблица 1. Положение фронтальных зон в различные сезоны года (ю.ш.)

сезон	62°	53°	57,5°	54°	53,5°	53°	49,5°	49°	48,5°	45°	44,5°	40,5°
зима		АД			АК			САД			СТК	
весна				АД			АК			САД		СТК
лето		АД			АК			САД			СТК	
осень	АД		АК			САД			СТК			

АД – антарктическая дивергенция, АК – антарктическая конвергенция, САД* – субантарктическая дивергенция, СТК – субтропическая конвергенция

*Надо отметить, что Ю.А. Иванов впервые выделил субантарктическую дивергенцию, которая до его работы в Южном океане не выделялась.

Физический фронт, по определению Ю.А. Иванова, – это район, в котором горизонтальные градиенты характеристик имеют максимум. При этом надо иметь в виду, что максимальные градиенты физических характеристик могут возникать только в результате особенностей циркуляции вод.

Анализируя причины возникновения резких контрастов характеристик морских вод, Ю.А. Иванов замечает, что пространственное распределение свойств в океане определяется, в основном, тремя составляющими: граничными условиями, турбулентной диффузией и адвекцией. Граничные условия изменяются в океане плавно и сами по себе не могут привести к образованию резких градиентов характеристик. Турбулентная диффузия, наоборот, сглаживает контрасты. И только адвекция (горизонтальная и вертикальная) может вызвать образование резких градиентов характеристик.

Основываясь на этой логике, в дальнейшем рассматривается горизонтальная адвекция как сумма меридиональной и зональной составляющих. Учитывая, что граничные условия, как правило, имеют квазизональный характер, Ю.А. Иванов приходит к выводу, что определяющую роль в формировании горизонтальных градиентов свойств будет играть меридиональная составляющая скорости течения.

Окончательный вывод, к которому приходит Ю.А. Иванов, заключается в том, что максимальные градиенты физических свойств в океане формируются, главным образом, в результате совместного действия меридиональной и вертикальной адвекции.

Важный момент здесь заключается в том, что для некоторых средних условий океана вертикальная и меридиональная адвекция будут примерно равными:

$$w \frac{\partial k}{\partial z} \approx v \frac{\partial k}{\partial y},$$

где w – вертикальная составляющая скорости течения, v – меридиональная составляющая скорости течения, k – какое-либо свойство.

Основываясь на этих выводах, Ю.А. Иванов провел анализ географического положения и динамики фронтальных зон Южного океана. Он детально рассмотрел и положил на карту фронтальные зоны Антарктических вод. В частности, подробное исследование зоны Антарктической дивергенции показало, что она не представляет непрерывной области поднятия вод, но чередуется с районами их опускания.

На примере фронтальных зон Южного океана, Ю.А. Иванов показал особенности распределения гидрологических характеристик, которые связаны с неравномерностью вертикальной и горизонтальной циркуляции и рассмотрел вопрос о положении физических фронтов относительно динамического фронта.

В работе (Иванов, Нейман, 1965) им рассмотрено уравнение диффузии, в котором учтены только члены с вертикальной адвекцией и вертикальной диффузией:

$$w \frac{\partial k}{\partial z} = A_z \frac{\partial^2 k}{\partial z^2}, \text{ где } w = w_0 A_z \sin \lambda y.$$

Граничные условия: $z = 0$, $A_z \frac{\partial k}{\partial z} = Q$ (const); $z = H$, $k = k_1$ (const).

Здесь Q – поток свойства (например, тепла), λ – волновое число, k – значение какого-либо свойства, A_z – коэффициент вертикального турбулентного обмена.

Решая эту задачу, он приходит к выводу, что при наличии вертикальной скорости распределение гидрологических характеристик в океане имеет экстремум в тех же точках, что и w .

Таким образом, было установлено однозначное соответствие между распределением в океане экстремумов вертикальной составляющей скорости течения и экстремумами гидрологических характеристик. За этим следует элементарное, но исключительно важное для практических целей, объяснение поведения изолиний на вертикальных разрезах гидрологических характеристик. Максимуму вертикальной скорости, направленной от поверхности океана в зоне конвергенции, соответствует изгиб изолиний гидрологических характеристик выпуклостью вниз. В зонах дивергенции наблюдается обратная картина. Важно заметить, что районы максимальных горизонтальных градиентов гидрологических характеристик располагаются по обе стороны от динамического фронта, образуя фронты физические. Однако в реальном океане обычно не встречается такая идеализированная картина. Горизонтальная адвекция и турбулентный обмен существенно искажают форму изолиний. В реальном океане общая схема поведения изолиний намного сложнее.

Ю.А. Иванов не только разработал метод выделения динамических и физических фронтов в океане, но и, обработав большой фактический материал натурных наблюдений на 86 меридиональных разрезах, получил карту расположения основных фронтальных зон в Южном океане. Кроме того, он сравнил положение фронтов, выделенных им, с результатами предыдущих исследований, в частности, с работами Дикона (Deacon, 1937) и Макинтоша (Mackintosh, 1946). В ряде приантарктических районов плавный ход кривой изменения вертикальной скорости в районе ее экстремума приводит к тому, что физические фронты – районы максимальных горизонтальных градиентов – удалены на значительные расстояния от динамического фронта (например, Антарктической дивергенции). Ю.А. Иванов выделял фронт по экстремуму гидрологических характеристик в меридиональной плоскости, которая соответствует экстремумам вертикальной составляющей скорости течения, тогда как, например, Дикон (Deacon, 1937) отождествлял фронт с районами максимальных горизонтальных градиентов этих элементов. Поэтому трудно рассчитывать на то, что положение выделяемых таким образом фронтов будет обязательно совпадать.

Интересно остановиться на анализе Ю.А. Ивановым результатов других исследователей, занимавшихся изучением фронтов в Южном океане. В этом анализе проявляется его талант глубокого ученого, умеющего разделить причину и следствие, пытающегося четко установить существо явления, которое не всегда очевидно.

Исходя из общего понятия о водных массах, которые обладают относительной однородностью, на границах между ними возникают повышенные градиенты свойств. Из этого исходило большинство исследователей. Главным считался меридиональный градиент, как правило, температуры. Так считали Дикон, Свердруп, Макинтош и некоторые другие. Ю.А. Иванов устанавливает физическую связь между сущностью процесса и его проявлениями. Он теоретически показал, что исследование динамических фронтов в Южном океане тождественно выяснению закономерностей распределения максимальных вертикальных скоростей течения на глубине трения. В своих работах он неоднократно отмечал, что изучение динамических фронтов в океане представляет большой научный интерес, так как именно здесь происходит опускание или подъем вод, приводящие к изменению всей вертикальной структуры океана.

Еще раз подчеркнем, что, принимая во внимание относительную однородность свойств водных масс, естественно предположить, что на границах между ними должны существовать повышенные градиенты гидрологических характеристик. Главным в этих работах считается максимальный меридиональный градиент температуры. Именно этим признаком воспользовались Дикон (Deacon, 1937), Свердруп (Sverdrup, 1942) и Макинтош (Mackintosh, 1946), определяя положение фронтов с границей распространения поверхностной (теплой) или придонной (холодной) воды. Однако, как показал Ю.А. Иванов в своих работах, в этих случаях исследователи определяли положение одного из физических фронтов, которые, как уже указывалось, сопутствуют зонам максимальных вертикальных скоростей или зонам конвергенции или дивергенции горизонтальных течений. И в некоторых других работах прослеживается отсутствие четкой физической связи между сущностью процесса и его проявлениями (Иванов, Нейман, 1965).

Справедливости ради надо заметить, что у Ю.А. Иванова были предшественники. Так, в 1953 г., Г. Купман (Koormann, 1953) установил, что районы с максимальными вертикальными скоростями течений располагаются в стрессных областях низкого или высокого атмосферного давления. Это было прямым указанием на зависимость областей подъема и опускания вод в океане от тангенциального напряжения ветра, которое затем было подробно рассмотрено в работах Ю.А. Иванова.

Разработанная Ю.А. Ивановым методика анализа положения, структуры и процессов, протекающих во фронтальных зонах, была использована им при анализе фронтальных зон Антарктики. Основываясь на разработанной методике расчетов и типовых картах атмосферного давления Г.М. Таубера (Таубер, 1956) он вместе с Б.А. Тареевым (Иванов, Тареев, 1959) разработал простую расчетную схему, позволяющую оценить скорость вертикальных потоков в зависимости от расстояния до центра циклона. В этой же работе подробно рассмотрено динамическое состояние зон конвергенции и дивергенции и дана оценка их роли в поступлении зоо- и фитопланктона в верхние слои океана. Показано, что поднятия и опускания вод приводят к резкой неравномерности в распределении гидрологических характеристик.

Грузинов В.М.

Основываясь на типовых картах давления, можно определить зоны, в которых создаются благоприятные динамические условия для скоплений зоопланктона (Иванов, Тареев, 1959). В этом заключается один из практических выводов разработанной Ю.А. Ивановым методики расчетов положения фронтальных зон в океане.

Литература

- Иванов Ю.А.* Положения и сезонная изменчивость фронтальных зон в Антарктике // ДАН. 1959. Т. 129. № 4. С. 777–780.
- Иванов Ю.А., Нейман В.Г.* Фронтальные зоны Южного океана Академии наук СССР: Межведомственная комиссия по изучению Антарктики. Антарктика // Доклады комиссии. М.: Наука, 1965. С. 98–110.
- Иванов Ю.А., Тареев Б.А.* К вопросу о структуре зоны Антарктической дивергенции // Изв. АН СССР, серия географ. 1959. № 6. С. 82–89.
- Таубер Г.М.* Основные черты климата и погоды Антарктики, Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1956. 148 с.
- Deacon G.E.R.* The Hydrology of the Southern Ocean // Discovery Rep. 1937. Vol. 15. P. 1–124.
- Koopmann G.* Entstehung und Verbreitung von Divergenzen in der oberflächennahen Wasserbewegung der antarktischen Gewässer Deuts // Hydr. Zeitsch. No. 2. 1953.
- Mackintosh N.A.* The Antarctic Convergence and the distribution of surface temperatures in Antarctic Waters // Discovery Rep. 1946. Vol. XXIII. P. 177–212.
- Sverdrup H.U., Johnson M.W., Fleming R.H.* The Oceans. Prentice-Hall, 1942. 1087 p.
- Yoshida Kozo, Han-Lee Mao.* A theory of upwelling of large horizontal extent // J. Mar. Res. 1957. Vol. 16. No. 1. P. 40–54.

ON PHYSICAL AND DYNAMICAL FRONTS IN THE OCEAN

Gruzinov V.M.

*N.N. Zubov's State Oceanographic Institute of Roshydromet,
6, Kropotkinsky per., Moscow, 119034, Russia, e-mail: polarf@meteo.ru
Submitted 15.01.2019, accepted 30.05.2019*

A review of the works of Yu. Ivanov devoted to the study of the front zones of the world ocean is made. He, in fact, made the transition from the study of mean stationary processes to quasi-periodic and non-stationary. Yu. Ivanov developed a constructive formula to compute the speed of Ekman swap on the field purely zonal wind, which allowed us to track seasonal movements of Antarctic zones of divergence and convergence. Ivanov first introduced the concept of dynamic front as a region of divergence or convergence of the flow, in contrast to the physical front, as the region of maximum horizontal gradients characteristics. Analyzing the equation of vertical diffusion, he shows that the physical fronts are on the periphery of the dynamic fronts. The general map of the location of the main front zones in the Southern ocean was obtained by processing the large-scale observations on the 86 meridian sections. In addition, he compared the position of the selected fronts, with the results of previous studies, in particular, with the works of Deacon and Mackintosh together with B. A. Tareev. Based on the developed method of calculations and the type of atmospheric pressure he developed a simple calculation scheme, which allowed to estimate the speed of vertical flows

depending on the distance to the center of the cyclone. Based on typical pressure maps, it is possible to determine the zones in which favorable dynamic conditions for zooplankton accumulations are created. This is also one of the practical applications developed by the method of calculation of the position of the front zones in the ocean.

Keywords: front zone, tangential stress, beta-effect, divergence, convergence, vertical velocity, dynamic front, physical front, convection, atmospheric pressure, cyclone

References

- Deacon G.E.R.* The Hydrology of the Southern Ocean, *Discovery Rep.*, 1937, Vol. 15, pp. 1–124.
- Ivanov Yu.A.* Polozheniya i sezonnaya izmenchivost' frontal'nykh zon v Antarktike (Position and seasonal variability of frontal zones in the Antarctic). *DAN*, 1959, Vol. 129, No. 4, pp. 777–780.
- Ivanov Yu.A. and Neiman V.G.* Frontal'nye zony Yuzhnogo okeana (Frontal zones of the southern ocean), Mezhdedomstvennaya komissiya po izucheniyu Antarktiki. *Antarktika. Doklady komissii*, Moscow: Nauka, 1965, pp. 98–110.
- Ivanov Yu.A. and Tareev B.A.* K voprosu o strukture zony Antarkticheskoi divergentsii (On the structure of the Antarctic divergence zone). *Izv. AN SSSR, seriya geograf.*, 1959, No. 6, pp. 82–89.
- Koopmann G.* Entstehung und Verbreitung von Divergenzen in der oberflachennahen Wasserbewegung der antarktischen Gewasser Deuts. *Hydr. Zeitsch.*, 1953, No. 2.
- Mackintosh N.A.* The Antarctic Convergence and the distribution of surface temperatures in Antarctic Waters. *Discovery Rep.*, 1946, Vol. XXIII, pp. 177–212.
- Sverdrup H.U., Johnson M.W., and Fleming R.H.* The Oceans. Prentice-Hall, 1942, 1087 p.
- Tauber G.M.* Osnovnye cherty klimata i pogody Antarktiki (The main features of the climate and weather of the Antarctic). Ch. 1, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1956, 148 p.
- Yoshida Kozo, Han-Lee Mao.* A theory of upwelling of large horizontal extent. *J. Mar. Res.* 1957. Vol. 16. No. 1. pp. 40–54.