

Д. В. Кондрик¹, А. В. Попов², А. В. Рубченя³

РОЛЬ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В РАСПРОСТРАНЕНИИ РАСПРЕСНЕННЫХ ВОД В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

¹ Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, 14-я линия В. О., 7

² Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Российская Федерация, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Статья посвящена изучению неоднородностей термохалинной структуры и динамических систем, способных переносить их на значительные расстояния. Приводятся количественные и качественные характеристики указанных явлений совместно с выводами относительно возможного влияния данных механизмов на пресноводный баланс Северного Ледовитого океана. Библиогр. 13 назв. Ил. 3. Табл. 3.

Ключевые слова: мезомасштабные вихри, термохалинная структура, солёностные аномалии, пресноводный баланс.

D. V. Kondrik¹, A. V. Popov², A. V. Rubchenya³

THE ROLE OF MESOSCALE EDDIES IN THE SPREAD OF FRESHWATERS IN THE SURFACE LAYER OF THE ARCTIC OCEAN

¹ Nansen International Environmental and Remote Sensing Center, 7, 14 Line V. O., Office 49, St. Petersburg, 199034, Russian Federation;

² Arctic and Antarctic Research Institute, 38, ul. Beringa, St. Petersburg, 199397, Russian Federation

³ Saint Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

This article is about research of the irregularities of the thermohaline structure and dynamical systems capable of carrying them over long distances. The paper also contains qualitative and quantitative characteristics of these phenomena together with the findings on the possible impact of these mechanisms on the freshwater balance of the Arctic Ocean. Refs. 13. Figs. 3. Tabl. 3.

Keywords: mesoscale eddies, thermohaline structure, freshwater anomalies, freshwater balance.

Как известно, деятельный слой Северного Ледовитого океана является одним из важнейших элементов климатической системы Северной полярной области. Через поверхность океана происходит обмен теплом и массой с атмосферой, конвективные и адвекционные процессы в нем оказывают существенное влияние на физические параметры нижележащих слоев. В верхний деятельный слой океана попадает сток рек и пресные воды, образующиеся при ледотаянии, при ледообразовании происходит выпадение рассола, все это говорит о том, что слой становится ключевым при распределении пресной воды по всей водной толще.

Авторами был проведен ряд исследований, связанных с неоднородностями распределения термохалинных характеристик поверхностных вод Северного

Ледовитого океана. Такого рода неоднородности были замечены в ходе анализа пространственно-временных рядов солёности, построенных по измерениям одного из автономных дрейфующих буев серии ИТР. Отчетливо прослеживалось резкое изменение солёности на некоторых отрезках ряда — сначала солёность резко понижалась относительно среднего значения, затем так же резко повышалась до прежнего уровня. Необходимо отметить, что в ходе предварительного изучения этого явления был сделан вывод о том, что такие неоднородности — отнюдь не следствие прохождения платформой каких-либо фронтов или районов с пониженной солёностью. Данный факт выяснился при сопоставлении уже известных средних значений солёности и границ конкретных районов Арктического бассейна [1, 2] с траекторией дрейфа измеряющей платформы. Это позволило сделать предположение о возможном наличии множества таких неоднородностей в Северном Ледовитом океане, что может изменить всю картину мезомасштабной циркуляции поверхностного слоя вод Арктического бассейна. Именно поэтому было принято решение подробнее изучить неоднородности термохалинной структуры, а также механизмы, способные удерживать и переносить их на большие расстояния.

В ходе работы использованы данные за период 2007–2013 гг. Было рассмотрено 55 источников: отчеты экспедиций на судах и дрейфующих станциях, данные буев. Неоднородности термохалинной структуры вод Северного Ледовитого океана зарегистрированы в 34 случаях (64%) (табл. 1).

Таблица 1. Зафиксированные неоднородности

Измеряющая платформа	Количество платформ, зафиксировавших неоднородности	Количество неоднородностей	
		на поверхности	в слое пикноклина
НЭС «Академик Федоров»	0	117	7
А/л «Россия»	0		
«Северный Полюс — 35-39»	4		
ARGO	1		
ИТР-1-55	29		
PALEX-2007–2009	0		
Twin Otter	0		

По значениям даты, температуры и солёности построены пространственно-временные ряды изменчивости основных параметров воды в холодные сезоны для горизонта 15 м. Горизонт был выбран с учетом предварительных результатов работы: в большинстве случаев именно на нем можно было заметить неоднородности указанных характеристик в перемешанном слое.

Основанием для анализа только холодных сезонов (октябрь — май) послужило отличие масштабов характерных для них неоднородностей от масштабов таких же явлений в теплые сезоны. На выбор также повлияла неоднозначность природы происхождения неоднородностей в теплые сезоны. Известно, что из-за увеличения температуры воздуха в теплые сезоны происходит таяние снежниц, что приводит к их прорыву, а это может являться причиной распреснения вод в тех местах.

В ходе изучения пространственно-временных рядов наибольшее внимание уделялось отклонениям от средних значений солёности, так как именно этот параметр оказывает основное влияние на формирование поля плотности в Арктике. Все отклонения солёности от средних значений в каждом из исследуемых районов, превышающие или равные значению 0,5‰, считались аномальными, т. е. не свойственными изучаемому району.

По результатам анализа полученных данных были обнаружены области аномального распределения поверхностного слоя вод, солёность которых существенно отличалась от фоновых значений (31–34‰) [2]. Здесь следует вспомнить, что в 2007 и 2012 гг. в Арктике наблюдалась минимальная ледовитость за весь период исследований — 4,17 и 3,41 млн км² соответственно (по данным National Snow & Ice Data Center). Этот факт привел к значительному распределению поверхностных вод, однако фоновые значения солёности практически во всех районах дрейфа все же были выше 30‰ [3].

Карта выявленных аномалий представлена на рис. 1, а. По их расположению можно отчетливо увидеть, что большое количество солёностных аномалий акку-

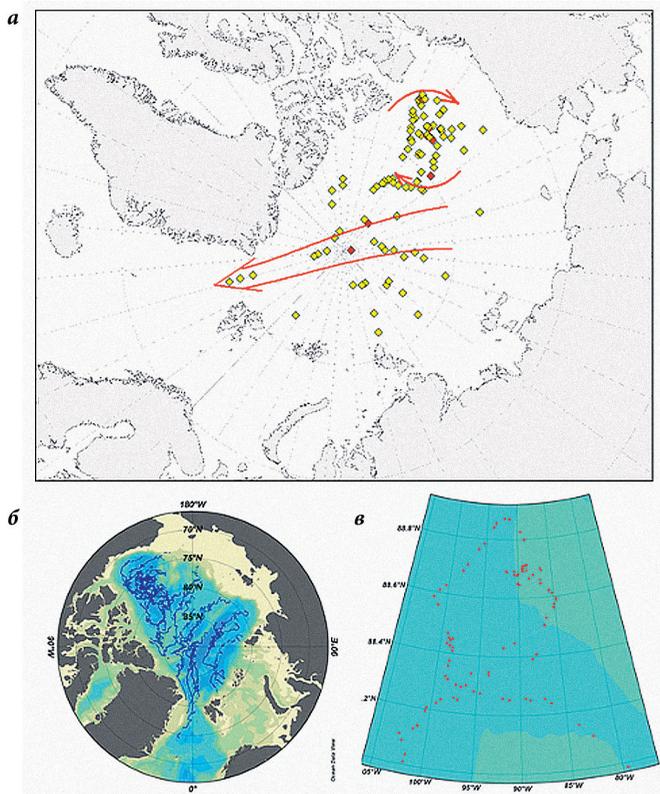


Рис. 1. Распределение аномалий по Арктическому бассейну (желтым цветом — поверхностные неоднородности, красным — неоднородности в слое пикноклина) (а); расположение траекторий дрейфа измерительных платформ по Арктическому бассейну (б); петля дрейфа буя ITR-29 (26 августа — 29 сентября 2009 г.) (в)

мулируется в круговороте Бофорта, но есть, и достаточно много, в остальной части Арктического бассейна. Логично предположить, что далее они выносятся в северную часть Атлантического океана и позже разрушаются, перемешиваясь с внешними водами.

Кроме того можно увидеть количественное превосходство подповерхностных аномалий (ср. с данными табл. 1). Но так как изначально была поставлена задача исследования именно поверхностного слоя (ВКС), для анализа брались исходные данные лишь до горизонта 100 м. В это же время в остальной толще могло находиться большое количество подобных неоднородностей, в том числе в слое пикноклина. Поэтому в рамках данной работы нельзя делать какие-либо выводы о количественном соотношении неоднородностей на различных горизонтах.

На примере дрейфующего буя ИТР-29 был проведен анализ траектории дрейфа измерительной платформы. Исследуемый буй был запущен 31 августа 2008 г., последние из имеющихся данных датировались 14 сентября 2010 г. За этот период им была пройдена значительная часть Северного Ледовитого океана. На треке дрейфа буя были выделены замкнутые траектории, имеющие форму петель. Координаты центра петли рассчитывались по ближайшей к центру точке дрейфа, даты начала и конца были взяты с точек перед началом петли и после ее конца. Диаметр каждой из петель был рассчитан через разницу широт самой северной точки и самой южной петель (рис. 1, в). Длительность их наблюдения составила 3–35 сут, средний диаметр в пределах 1,9–28,5 км.

Для анализа каждой аномалии в отдельности были рассчитаны плотность и частота Вайсяля—Брента. По этим характеристикам, а также по данным о солёности и температуре — построены разрезы в местах наблюдения аномалий до глубины 100 м вдоль движения буев или станций. Кроме того, были построены пары профилей указанных параметров для каждого из ядер аномалий и одной из точек с фоновыми значениями данного района.

Чтобы оценить динамику вод в районах таких неоднородностей, рассчитаны широтные и меридиональные составляющие скоростей дрейфа буев и станций для участков, где наблюдались солёностные аномалии. Помимо этого было принято решение по имеющимся теоретическим формулам рассчитать орбитальные скорости вихрей, переносящих указанные неоднородности, для чего использовалось уравнение, приведенное в статье [4]:

$$V_s^2/r + f_0 V_s = 1/\rho_s \cdot dP/dr,$$

где V_s — циклогестрофическая скорость воды в пределах линзы; r — радиус линзы; f_0 — параметр Кориолиса; ρ_s — плотность ядра линзы; P — давление.

На основании расчетов построены пространственно-временные ряды значений орбитальных скоростей по отдельным горизонтам, а также вертикальные разрезы, охватывающие всю глубину залегания неоднородностей.

Чтобы иметь полное представление о данных неоднородностях, было необходимо рассчитать еще две характеристики каждого вихря: время жизни и объем переносимой пресной воды.

Для этой задачи использовались формулы, приведенные в статье [5]:

$$V_{пр} = H \cdot (1 - S_1/S_0) \cdot M,$$

где $V_{\text{пр}}$ — объем пресной воды внутри вихря, H — вертикальный масштаб области распреснения, S_1 — соленость ядра линзы, S_0 — фоновая соленость, M — площадь линзы;

$$T_{\text{л}} = fV/g'h_E^2,$$

где $T_{\text{л}}$ — теоретическое время жизни линзы, f — параметр Кориолиса, V — полный объем линзы, g' — приведенное ускорение свободного падения, h_E — величина, до которой уменьшится толщина линзы за время $T_{\text{л}}$, $h_E = 1$ м;

$$g' = g \cdot (\rho_0 - \rho_1) / \rho_0,$$

где ρ_0 — фоновая плотность, ρ_1 — плотность ядра линзы.

После расчета всех параметров стало возможно оценить масштабы наблюдаемых аномалий. Кроме того, через размеры неоднородностей были рассчитаны градиенты солености.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о том, что практически во всех районах Северного Ледовитого океана на глубинах менее 100 м присутствуют неоднородности в термохалинной структуре вод.

Вторым шагом анализа было определение градиентов солености в таких неоднородностях. Стоит отметить, что эти градиенты сопоставимы с градиентами на фронтах прибрежного апвеллинга и на различных термохалинных фронтах [1]. Особое внимание было уделено траектории дрейфа. Как оказалось, наличие петель никак не зависело от наличия неровностей рельефа дна и особенностей крупномасштабных течений, в 20 % случаев (6 из 30) можно было наблюдать попутный ветер в каждом участке петли. В то же время в 40 % случаев (12 из 30) наблюдались термохалинные неоднородности вблизи района дрейфа или непосредственно в центре петель.

Параметры ветра снимались с синоптических карт, имеющих в архивах ААНИИ, рельеф дна оценивался визуально по картам из пакета программ Ocean Data View, а схема крупномасштабных течений в районах исследований была взята из статьи [6]. Все действия выполнялись для каждой аномалии в отдельности.

Интересный результат дало сравнение скоростей дрейфа буя ИТР-29 при прохождении прямых участков и участков внутри петель (табл. 2). Было обнаружено, что скорость дрейфа буя значительно понижалась в среднем на 3,3 км/сут при прохождении петлеобразного участка дрейфа в 83 % случаев (25 из 30), а повышалась или оставалась неизменной лишь в 17 % случаев (5 из 30). Это факт позволил предположить наличие отдельных динамических систем в районах петлеобразных участков дрейфа.

Чтобы выяснить возможную связь петлеобразных участков дрейфа с термохалинными неоднородностями, была проверена обратная зависимость полученных данных. В районе каждой аномалии был проверен факт наличия таких участков. Результат оказался еще более впечатляющим: в 85 % случаев (11 из 13) подтвердилось наличие петель дрейфа буя в районах неоднородностей.

В дальнейшем, при анализе параметров областей распреснения было отмечено, что они имеют вертикальные масштабы от 10 до 100 м. Исходя из всего вышесказанного, можно предположить, что существование столь значительных обособленных объемов распресненных вод невозможно без привлечения гипотезы о вихревой динамике, связанной с аномалией солености.

Таблица 2. Значения скоростей на прямых участках дрейфа и внутри петлеобразных участков

№ петли	Скорость дрейфа на прямом участке (км/сут)	Скорость дрейфа внутри петли (км/сут)	Разность скоростей (V _{Прям} –V _{Петли} , км/сут)
1	12,2	9,4	2,8
2	5,2	9,3	-4,1
3	11,1	9,0	2,1
4	18,3	14,4	3,9
5	6,5	11,1	-4,6
6	12,6	3,1	9,5
7	6,5	6,3	0,2
8	18,4	7,1	11,3
9	8,8	5,3	3,5
10	5,0	3,3	1,7
11	12,2	9,5	2,7
12	10,5	1,7	8,8
13	3,7	1,1	2,6
14	4,7	2,4	2,3
15	9,3	2,0	7,3
16	8,4	7,3	1,1
17	10,8	7,5	3,3
18	6,9	7,4	-0,5
19	9,2	9,2	0
20	7,8	3,3	4,5
21	7,8	6,7	1,1
22	6,8	8,0	-1,2
23	11,8	6,2	5,6
24	8,1	4,7	3,4
25	14,8	3,5	11,3
26	10,1	3,5	6,6
27	2,7	1,8	0,9
28	8,1	4,5	3,6
29	7,0	2,7	4,3
30	13,9	7,7	6,2
Среднее значение	9,3	6,0	3,3

Чтобы получить больше доказательств существования вихревых структур, для всех рассмотренных аномалий были построены и проанализированы графики распределения проекций горизонтальной скорости на параллель и меридиан. Указанные проекции сопоставлялись с фрагментами пространственно-временных рядов солености, что привело к интересным результатам. Для большинства аномалий

проекции вектора скорости меняли знак в области аномалии, а сам вихрь имел антициклоническую структуру. Этот факт еще раз подтверждает наличие динамики в распресненных объемах вод. Отсюда можно сделать вывод, что все исследованные соленостные аномалии имеют вид антициклонического вихря. Подобные динамические системы были описаны Л. Н. Беляковым и В. А. Волковым в [7, 8].

Кроме того, все вихри можно условно разделить на два типа.
Антициклонические вихри, имеющие форму линзы (рис. 2).

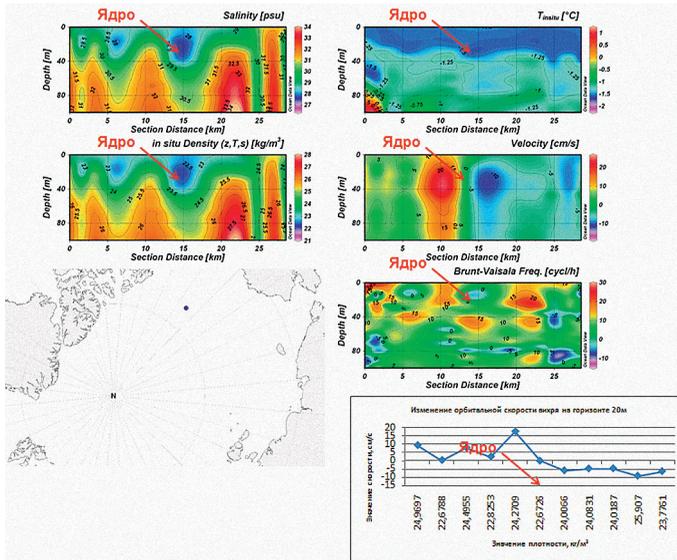


Рис. 2. Разрезы основных параметров и пространственно-временные ряды орбитальных скоростей для внутрипикноклинного типа вихрей. Стрелка указывает на минимальное значение плотности

Подобный тип вихрей представляет собой объем распресненных вод, имеющих форму двояковыпуклой линзы. Пресное ядро расположено у верхней границы галоклина. Эти вихри были описаны ранее в [9]. Стоит отметить, что американские ученые из океанографического института Вудсхола также изучали подобные явления и пришли к аналогичным выводам. Таким образом, в ходе двух независимо проведенных анализов особенностей термохалинной структуры поверхностного слоя вод были получены схожие результаты.

Для более подробной картины особенностей термохалинной структуры вод Северного Ледовитого океана данному направлению исследований следует уделить внимание и в дальнейшем.

Антициклонические вихри, имеющие форму параболоида с пресным ядром (рис. 3).

Данный тип имеет форму параболоида вращения, верхняя граница которого находится на поверхности. Распресненное ядро расположено на глубине около 30 м и имеет верхнюю границу на поверхности. Теоретически эти вихри были описаны А. Г. Зацепиным еще в 1986 г. [10]. Стоит отметить, что авторами данной статьи упоминаний в научной литературе о случаях наблюдения в природе подобных вихревых структур найдено не было.

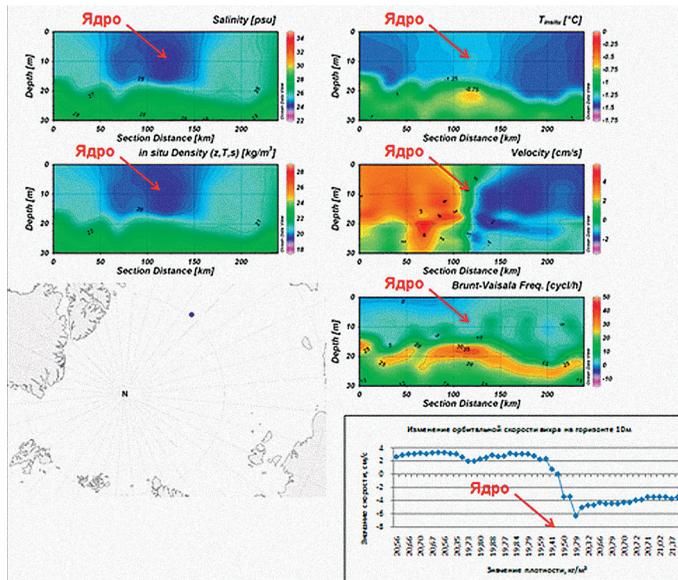


Рис. 3. Разрезы основных параметров и пространственно-временные ряды орбитальных скоростей для подповерхностного типа вихрей. Стрелка указывает на минимальное значение плотности

Помимо всего прочего, в рамках нашей работы были выполнены расчеты орбитальных скоростей для всех вихрей обоих типов. Их значения имели диапазон от 0,67 до 34 см/с, что подтвердило все предыдущие гипотезы. При этом важно, что орбитальные скорости подповерхностных вихрей (~5–7 см/с) были значительно меньше скоростей во внутривихревых вихрях (до 34 см/с). Полученные в результате значения хорошо совпадают с результатами американских коллег. Еще одним важным наблюдением оказалось, что в соответствии с описанием в [11], были обнаружены вихри и меньших масштабов.

В дополнение к динамическим параметрам было принято решение рассчитать запасы энергии, содержащиеся в исследуемых вихревых образованиях. Для этого из статьи [12] взята формула расчета потенциальной энергии крупномасштабного вихря:

$$E = 0,5 \cdot n^2 \cdot B^2 \cdot g \cdot (\rho_2 - \rho_1),$$

где E — потенциальная энергия; n — отклонение изопикны от горизонтали; B — горизонтальный масштаб столба жидкости; ρ_1 и ρ_2 — плотность воды в ядре вихря и фоновая плотность соответственно.

В результате расчетов значения потенциальной энергии варьировались от $0,001 \cdot 10^{10}$ Дж до $28,224 \cdot 10^{10}$ Дж со средним значением, равным $1,547 \cdot 10^{10}$ Дж. Эти значения отлично сопоставимы по порядку с результатами, приведенными в статье [13]: «Кинетическая энергия среднего по скорости арктического вихря радиусом 10 км и высотой 100 м составила $1,6 \cdot 10^{10}$ Дж. Запасы доступной потенциальной энергии для вихря $32 \cdot 10^{10}$ Дж».

Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры выделенных неоднородностей

№ станции	Дата наблюдения ядра аномалии	Продолжительность (сут)	Значение аномалии (‰)	Градиент (‰/км)	Масштаб		Объем пресной воды, км ³	Время жизни, мес
					гориз. (км)	верт. (м)		
ARGO	01.05.11	21	-0,66	-0,02	25	40	0,39	3,31
ИТР-06	27.03.08	38	-1,81	-0,02	75	30	8,06	7,18
	22.04.08	10	-0,84	-0,03	30	30	0,60	2,00
	04.05.08	19	-0,79	-0,02	30	30	0,57	2,00
ИТР-08	16.03.08	17	-0,69	-0,02	50	40	1,88	12,23
ИТР-11	18.02.09	45	-1,25	-0,02	50	25	2,13	4,44
	16.03.09	13	-0,74	-0,04	30	20	0,36	1,28
	03.04.09	12	-0,88	-0,05	20	25	0,24	1,00
ИТР-12	16.12.07	8	-1,27	-0,09	20	20	0,25	0,36
ИТР-13	26.10.07	39	-2,42	-0,02	75	20	8,00	4,26
	15.12.07	21	-1,46	-0,04	50	30	3,14	7,14
	07.01.08	64	-2,19	-0,02	75	25	8,65	6,85
	19.03.08	20	-1,17	-0,04	30	30	0,90	0,99
	05.04.08	7	-0,77	-0,03	40	30	1,06	7,62
ИТР-18	03.10.07	10	-1,41	-0,04	60	20	2,94	3,27
	27.10.07	19	-1,28	-0,02	30	20	0,71	1,11
	06.12.07	8	-1,88	-0,06	40	20	1,71	1,25
	15.12.07	6	-0,65	-0,04	20	20	0,15	0,39
	24.01.08	14	-0,68	-0,02	20	80	0,70	0,32
	01.02.08	10	-0,85	-0,07	10	20	0,05	0,09
	07.02.08	3	-0,65	-0,46	8	20	0,03	0,03
	19.02.08	17	-1,92	-0,02	75	30	9,94	8,11
ИТР-19	07.05.08	11	-0,57	-0,02	60	40	1,95	16,51
ИТР-21	14.10.08	9	-1,79	-0,03	50	30	3,48	3,81
	25.10.08	11	-1,53	-0,02	75	40	9,18	5,84
	09.11.08	6	-2,51	-0,21	5	60	0,09	0,02
	14.01.09	7	-0,61	-0,04	15	60	0,22	0,35
	21.01.09	5	-0,91	-0,05	30	50	1,08	2,34
	30.01.09	6	-0,84	-0,07	15	40	0,20	0,90
ИТР-24	28.04.09	13	-1,14	-0,02	60	40	3,83	14,02
ИТР-25	27.10.08	5	-0,79	-0,03	20	20	0,16	0,87
	19.11.08	13	-0,85	-0,02	30	40	0,79	3,82
	02.01.09	7	-0,79	-0,03	10	20	0,04	0,15
ИТР-25	27.01.09	29	-1,51	-0,02	75	30	6,48	6,96
	13.02.09	13	-1,12	-0,04	10	30	0,09	0,16
	25.03.09	17	-1,13	-0,07	40	20	0,92	2,15
	08.04.09	9	-0,73	-0,05	30	20	0,34	0,97
	02.05.09	27	-1,28	-0,02	80	40	8,28	27,14
	20.05.09	11	-1,2	-0,03	40	40	1,94	6,84
ИТР-26	23.10.08	12	-1,98	-0,02	25	20	0,60	0,47
ИТР-27	01.12.08	10	-1,01	-0,02	100	40	10,46	21,20

№ станции	Дата наблюдения ядра аномалии	Продолжительность (сут)	Значение аномалии (‰)	Градиент (‰/км)	Масштаб		Объем пресной воды, км ³	Время жизни, мес
					гориз. (км)	верт. (м)		
ИТР-29	26.01.09	20	-1,44	-0,03	60	30	3,95	7,04
	06.02.09	12	-0,57	-0,02	30	20	0,26	1,20
	20.02.09	12	-0,87	-0,03	20	20	0,18	0,77
	01.03.09	5	-0,62	-0,02	20	30	0,19	1,29
	09.03.09	5	-0,53	-0,08	15	30	0,09	0,55
	03.04.09	8	-0,59	-0,03	15	30	0,10	0,60
ИТР-33	10.10.10	8	-1,13	-0,03	60	20	2,39	3,77
	15.10.10	2	-1,16	-0,49	8	20	0,04	0,04
	17.10.10	2	-0,56	-0,04	20	20	0,13	0,36
	02.01.11	21	-2,14	-0,02	50	40	5,92	4,87
ИТР-34	21.02.10	5	-0,81	-0,02	40	30	1,09	3,34
ИТР-41	07.10.10	8	-0,74	-0,03	20	20	0,17	0,76
ИТР-43	21.10.10	8	-0,6	-0,02	40	20	0,57	2,13
Средние значения		17,6	-0,74	-0,03	53,6	33,7	4,33	9,30

Мы предполагаем, что исследуемые вихревые образования способны существовать очень долгое время (более 6 лет), проходя значительные расстояния, и при этом переносить огромные объемы пресных вод (до 64,7 км³). Для сравнения можно привести данные из [2] по среднегодовому стоку крупных рек Сибири. Значения среднегодового стока с 1948 по 1993 гг. составили: 1326 км³ — в Карское море, 769 км³ — в море Лаптевых, 226 км³ — в Восточно-Сибирское море.

Суммарный объем пресной воды, переносимой вихревыми образованиями за 2007–2013 гг. составил 493,8 км³. Значит, в среднем за год было перенесено 98,7 км³ пресной воды. Эта цифра хотя и не превосходит значения среднегодового стока рек Сибири в Арктический бассейн, но является сопоставимой и, соответственно, значимой для пресноводного баланса Северного Ледовитого океана. С учетом того, что представленные исследования охватывали лишь верхний слой моря, до глубины 100 м, можно допустить, что вихри, находившиеся в это время на больших глубинах, также переносили распресненные воды. На основании проведенных выкладок возможно сделать предположение, что суммарный объем вод, переносимых вихревыми образованиями, сопоставим со стоком рек Сибири, и даже может превосходить его из-за аномалий, располагающихся глубже 100 м.

Литература

1. Гинзбург А. И., Федоров К. Н. Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 303 с.
2. Timohov L. A., Tanis F., Karpiv V. Yu., Lebedev N. V., Sokolov V. T. Joint US Russian Atlas of the Arctic Ocean for winter period (1997) and summer period (1998) / ed. by L. Timohov, F. Tanis, Environment Working Group, NSIDC, Boulder, Colorado.
3. Алексеев Г. В., Иванов Н. Е., Пнюшков А. В., Балакин А. А. Изменения климата в морской Арктике в начале XXI века // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 3. С. 22–24.
4. Шапиро Г. И. О некоторых свойствах вихревых линз в непрерывно стратифицированном океане // Внутритермоклинные вихри в океане / под ред. К. Н. Федорова. М.: АН СССР, 1986. С. 79–85.

5. Шапиро Г. И. Сильнолинейные волны Россби и вихревые линзы // Внутритермоклинные вихри в океане / под ред. К. Н. Федорова. М.: АН СССР. 1986. С. 71–78.
6. Поляков И. В. Диагностические расчеты течений и колебаний уровня Северного Ледовитого океана // Известия АН. ФАО. 1996. Т. 32, № 5. С. 690–703.
7. Беляков Л. Н., Волков В. А. Мезомасштабные подповерхностные течения в Арктическом бассейне // Труды ААНИИ. 1985. Т. 389. С. 46–51.
8. Беляков Л. Н., Волков В. А. Подповерхностные течения // Вертикальная структура и динамика подледного слоя океана. Л.: Гидрометеоздат, 1989. С. 101–107.
9. Timmermans M. L., Toole J., Proshutinsky A., Krishfield R., Plueddemann A. Eddies in the Canada Basin, Arctic Ocean, observed from ice-tethered profilers. Woods Hole Oceanographic Institution, Massachusetts, 2008. P. 133–145.
10. Зацепин А. Г. К вопросу об эволюции плотностной линзы-интрузии во вращающейся жидкости // Внутритермоклинные вихри в океане / под ред. К. Н. Федорова. М.: АН СССР, 1986. С. 115–119.
11. Монин А. С., Красицкий В. П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 375 с.
12. Беляков Л. Н., Волков В. А. Структура и динамика антициклонического круговорота вод и льдов в Арктическом бассейне // Труды ААНИИ. 1985. Т. 398. С. 40–48.
13. Беляков Л. Н., Волков В. А. Пространственное распределение мезомасштабных подповерхностных течений в Американо-Северном Ледовитом океане // Доклады РАН. 1980. Т. 254, № 3. С. 752–754.

Для цитирования: Кондрик Д. В., Попов А. В., Рубченя А. В. Роль мезомасштабных образований в распространении распресненных вод в поверхностном слое Северного Ледовитого океана // Вестник СПбГУ. Серия 7. Геология. География. 2016. Вып. 3. С. 105–115.
DOI: 10.21638/11701/spbu07.2016.308

References

1. Ginzburg A. I., Fedorov K. N. *Pripoverkhnostnyi sloi okeana [About the changes in salinity in the near surface layer of the ocean]*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988. 303 p. (In Russian)
2. Timohov L. A., Tanis F., Karpiv Y. Yu., Lebedev N. V., Sokolov V. T. *Joint US Russian Atlas of the Arctic Ocean for winter period (1997) and summer period (1998)*. Ed. by L. Timohov, F. Tanis. Environment Working Group, NSIDC, Boulder, Colorado.
3. Alekseev G. V., Ivanov N. E., Pniushkov A. V., Balakin A. A. *Izmeneniia klimata v morskoi Arktike v nachale XXI veka [Climate change in the marine Arctic in the early XXI century]*. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Problems of Arctic and Antarctic]*, 2010, no. 3, pp. 22–24. (In Russian)
4. Shapiro G. I. O nekotorykh svoistvakh vikhrevykh linz v nepreryvno stratifitsirovannom okeane. *Vnutritermoklinnye vikhri v okeane [Intrathermocline eddies in the ocean]*. Ed. by K. N. Fedorov. Moscow, AN SSSR Publ., 1986, pp. 79–85. (In Russian)
5. Shapiro G. I. Sil'nolinye volny Rossbi i vikhrevye linzy. *Vnutritermoklinnye vikhri v okeane [Intrathermocline eddies in the ocean]*. Ed. by K. N. Fedorov. Moscow, AN SSSR, 1986, pp. 71–78. (In Russian)
6. Poliakov I. V. Diagnosticheskie raschety techenii i kolebaniu urovnia Severnogo Ledovitogo okeana [Diagnostic calculations of currents and fluctuations of the Arctic Ocean level]. *Izvestiia AN. FAO [Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics]*, 1996, vol. 32, no. 5, pp. 690–703. (In Russian)
7. Belyakov L. N., Volkov V. A. Mezomasshtabnye podpooverkhnostnye techeniia v Arkticheskom basseine [Subsurface currents in the Arctic Ocean]. *Trudy AANII [Transactions of the Arctic and Antarctic Research Institute]*, 1985, vol. 389, pp. 46–51. (In Russian)
8. Belyakov L. N., Volkov V. A. Podpooverkhnostnye techeniia [Subsurface currents]. *Vertikal'naia struktura i dinamika podlednogo sloia okeana [Vertical structure and dynamics of of subglacial layer of the ocean]*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989, pp. 101–107. (In Russian)
9. Timmermans M. L., Toole J., Proshutinsky A., Krishfield R., Plueddemann A. *Eddies in the Canada Basin, Arctic Ocean, Observed from Ice-Tethered Profilers*. Massachusetts, Woods Hole Oceanographic Institution Publ., 2008, pp. 133–145
10. Zatsëpin A. G. K voprosu ob evoliutsii plotnostnoi linzy-intruzii vo vrashchaiushcheisia zhidkosti. *Vnutritermoklinnye vikhri v okeane [Intrathermocline eddies in the ocean]*. Ed. by K. N. Fedorov. Moscow, AN SSSR Publ., 1986, pp. 115–119. (In Russian)
11. Monin A. S., Krasitskii V. P. *Iavleniia na poverkhnosti okeana [Phenomena on the Ocean Surface]*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 375 p. (In Russian)

12. Beliakov L.N., Volkov V.A. Struktura i dinamika antitsiklonicheskogo krugovorota vod i l'dov v Arkticheskom basseine [Structure and dynamics of the anticyclonic circulation of water and ice in the Arctic basin]. *Trudy AANII [Transactions of the Arctic and Antarctic Research Institute]*, 1985, vol. 398, pp. 40–48. (In Russian)

13. Beliakov L.N., Volkov V.A. Prostranstvennoe raspredelenie mezomasshtabnykh podpoverkhnostnykh techenii v Ameraziiskom sub-basseine Severnogo Ledovitogo okeana [The spatial distribution of mesoscale subsurface currents in the Amerasian sub-basin of the Arctic Ocean]. *Doklady RAN [Reports of the Russian Academy of Sciences]*, 1980, vol. 254, no. 3, pp. 752–754. (In Russian)

For citation: Kondrik D. V., Popov A. V., Rubchenya A. V. The role of mesoscale eddies in the spread of freshwaters in the surface layer of the Arctic Ocean. *Vestnik SPbSU. Series 7. Geology. Geography*, 2016, issue 3, pp. 106–117. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2016.308

Статья поступила в редакцию 14 сентября 2016 г.

Контактная информация:

Кондрик Дмитрий Вячеславович — младший научный сотрудник; dmitry.kondrik@niersc.spb.ru

Попов Андрей Вадимович — кандидат географических наук; avpopov1955@gmail.com

Рубченя Андрей Валерьевич — кандидат географических наук, доцент; pp6077@mail.ru

Kondrik Dmitriy V. — researcher; dmitry.kondrik@niersc.spb.ru

Popov Andrey V. — PhD; avpopov1955@gmail.com

Rubchenya Andrey V. — PhD, Associate Professor; pp6077@mail.ru