

УДК 551.465

ВЕРТИКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЙ В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ МОРЯ УЭДДЕЛЛА

© 2024 г. Р.З. Мухаметьянов^{a,b,*}

^aИнститут океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Нахимовский пр. 36, 117997 Россия

^bМосковский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Институтский пер. 9., 141700 Россия

*E-mail: rinat0233@mail.ru

Поступила в редакцию 18.02.2024 г.

После доработки 15.04.2024 г.

Принята к публикации 29.05.2024 г.

Южный океан играет ключевую роль в глобальной циркуляции вод Мирового океана. Круговорот Уэдделла, являясь одним из двух круговоротов, определяющих крупномасштабную динамику вод Южного океана, оказывает значительное влияние на глобальную термохалинную циркуляцию. В связи с этим, исследование динамики и структуры вод в море Уэдделла представляется весьма актуальной задачей для улучшения нашего понимания происходящих в Мировом океане процессов. В данной работе на основе собранного из открытого источника (Pangaea) массива данных о скоростях течений с автономных заякоренных буйковых станций изучалась вертикальная структура течений на склоне в западной части моря Уэдделла (северо-западная и южная части). Основным результатом анализа средних значений скоростей является интенсификация течений в придонном слое. По всей видимости, этот эффект является характерной особенностью круговорота Уэдделла как для его западной ветви, так и для южной. Отмечавшееся ранее в отдельных работах увеличение значений скоростей в придонном слое на отдельных буйковых постановках в отдельных локациях, было подтверждено и показано на основе массива данных о скоростях течений по 108 датчикам на 37 заякоренных буйковых станциях для континентального склона в северо-западной и южной части моря Уэдделла.

Ключевые слова: Море Уэдделла, автономные заякоренные буйковые станции, течения

DOI: 10.31857/S0002351524040041 EDN: JHHJDD

ВВЕДЕНИЕ

Море Уэдделла расположено в Атлантическом секторе Южного Океана и, соответственно, омывает берега Антарктиды и Антарктического полуострова. Несмотря на его давнее открытие, еще в первой половине 19-го века, оно все еще является сравнительно малоизученным. Объясняется это довольно тяжелыми и суровыми ледовыми условиями. В связи с чем, большинство имеющихся о нем данных были получены в летнее время и, более того, в наименее труднодоступных его районах, поскольку даже в летнее время большая часть моря покрыта дрейфующим льдом и айсбергами [Клепиков, 1963].

Особенно труднодоступной является западная часть моря, которая остается своеобразным «белым пятном». Те немногие данные, что имеются, об этой части одного из самых недоступных районов Мирового океана были получены в том числе благодаря организации экспериментальной

дрейфующей станции «Уэдделл-1» в 1992 г. Это был первый и единственный на данный момент опыт проведения долговременных ледовых станций в Антарктике. Благодаря измерениям, проводившимся во время дрейфа ледовой станции «Уэдделл-1» были получены уникальные данные о гидрологических и метеорологических условиях в западной части моря Уэдделла (ЗЧМУ) [Антипов и др., 2019]. В частности, было подтверждено наличие единой циркуляционной системы – круговорота Уэдделла, одного из двух основных круговоротов, характеризующих крупномасштабную динамику антарктической зоны.

Круговорот Уэдделла играет непропорционально большую роль не только в циркуляции вод Южного океана [Vernet et al., 2019], но и в глобальной термохалинной циркуляции [Thompson, Heywood, 2008; Julion et al., 2014].

Вентиляция вод абиссали Мирового океана в решающей степени зависит от формирования донных вод в полярных регионах [Orsi et al., 2001].

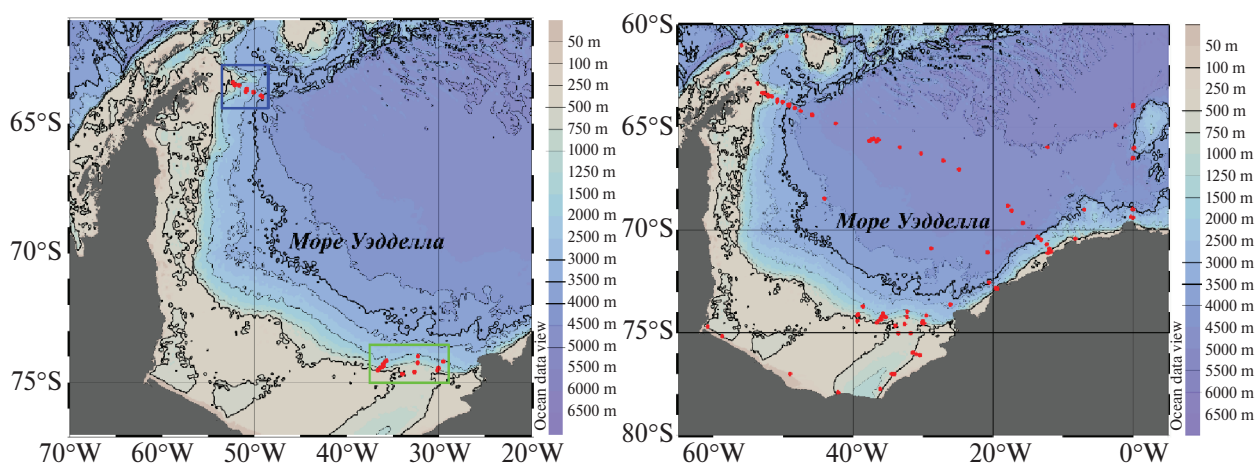


Рис. 1. Карта с расположением, рассматриваемых в данной работе, автономных заякоренных буйковых станций в море Уэдделла (слева). Станции в северо-западной части моря Уэдделла обведены синим прямоугольником, а станции в южной части — зеленым. Также справа представлена карта с расположением всех собранных станций, в том числе не принятых к анализу. Изобаты в 500 м и 3500 м отмечены более жирными линиями.

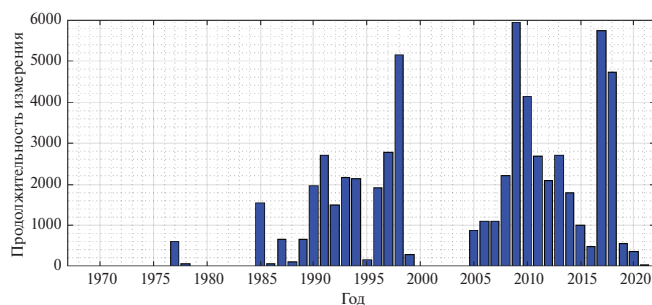


Рис. 2. Гистограмма, показывающая суммарную продолжительность измерений, выраженную в днях, для всех датчиков с автономных буйковых постановок в зависимости от года измерения.

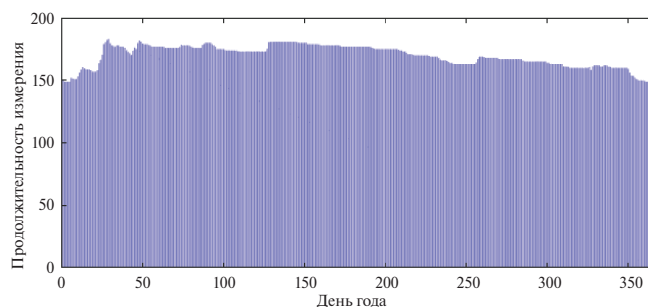


Рис. 3. Гистограмма, показывающая суммарную для всех датчиков (со всех заякоренных буйковых станций) продолжительность измерения, выраженную в днях, в зависимости от дня года.

Хорошо известно, что образование глубинных и донных вод возможно лишь в северной части Атлантического океана и в нескольких районах Антарктики. Одним из таких районов, причем ключевым, является море Уэдделла, а точнее его западная часть [Orsi et al., 1993; Fahrbach et al., 1995].

При всей актуальности изучения динамики и структуры вод в море Уэдделла, оно до сих пор остается малоизученным (по отношению к другим гораздо более доступным районам Мирового океана), в особенности, его западная часть. Для формирования более полной картины о гидрологических условиях в этом районе, необходимо проводить многолетние измерения, причем в разное время, то есть включая и зимнее время, в которое и без того суровые ледовые условия, становятся еще более тяжелыми. Хорошим решением является постановка автономных заякоренных буйковых станций (АБС), но и с ними имеются определенные трудности, учитывая специфику

района. Понятно, что проблемы могут возникнуть как при постановке, так и при поднятии станции. Но при удачном поднятии АБС, появляется массив данных о конкретном месте за длительный период времени, что дает возможность для улучшения нашего понимания как общих гидрологических условий в данном районе, так и определенных особенностей структуры и динамики вод, их временной изменчивости.

Вертикальная структура течений в море Уэдделла остается одним из малоисследованных аспектов циркуляции данного региона [Vernet et al., 2019]. Основными элементами циркуляции здесь являются три динамических фронта: прибрежное течение, склоновый фронт и фронт моря Уэдделла [Thompson, Heywood, 2008]. В недавних работах было показано, что в проливе Брансфилда в ЗЧМУ скорости прибрежного течения увеличиваются с глубиной [Frey et al., 2023], однако, подобные данные для всего крупномасштабного круговорота Уэдделла остаются крайне редкими.

Таблица. Информация по автономным заякоренным буйковым постановкам в море Уэдделла, рассматриваемых в данной работе. Для каждой станции указаны: название станции; координаты; глубина постановки буйковой станции; дата постановки; осредненные за весь период измерения, и после осредненные по датчикам северная и восточная компоненты скоростей на станции; а также продолжительность измерения, выраженная в днях.

Станция	Широта	Долгота	Глубина	Дата постановки	Средняя скорость		Кол-во дней
					север	восток	
AWI206	-63.49	-52.12	927	13-сент-1989	4.3	1.8	351
AWI206-2	-63.49	-52.11	950	22-нояб-1990	7.4	2.5	427
AWI206-3	-63.49	-52.11	940	11-январ-1993	5.0	2.2	746
AWI206-5	-63.51	-52.11	962	03-апр-1998	5.8	0.3	262
AWI206-6	-63.48	-52.10	941	28-март-2008	4.4	2.0	1014
AWI206-7	-63.48	-52.10	946	06-январ-2011	2.9	1.0	942
AWI207	-63.76	-50.91	2461	14-сент-1989	1.8	-0.3	435
AWI207-10	-63.66	-50.81	2502	26-январ-2017	3.7	1.1	733
AWI207-2	-63.75	-50.91	2460	23-нояб-1990	1.4	-1.0	740
AWI207-3	-63.75	-50.91	2498	10-январ-1993	3.5	0.0	763
AWI207-4	-63.72	-50.82	2509	07-май-1996	4.6	0.1	696
AWI207-6	-63.70	-50.87	2474	14-март-2005	4.3	1.2	1109
AWI207-7	-63.71	-50.84	2494	27-март-2008	3.8	0.7	1014
AWI207-8	-63.72	-50.83	2488	06-январ-2011	3.6	0.4	1971
AWI207-9	-63.73	-50.86	2482	12-январ-2013	4.1	0.6	1422
AWI216	-63.95	-49.15	3480	24-нояб-1990	3.2	2.2	457
AWI216-2	-63.96	-49.15	3498	06-май-1996	3.1	2.1	699
AWI259-1	-63.92	-49.27	3394	24-январ-2017	4.6	4.5	575
AWI260-1	-63.78	-50.09	2761	25-январ-2017	7.9	3.9	642
AWI261-1	-63.51	-51.64	1663	26-январ-2017	20.1	5.8	733
AWI262-1	-63.40	-52.29	650	28-январ-2017	6.5	3.5	732
D1	-74.07	-35.75	2100	02-февр-1985	20.3	21.7	350
F1	-74.51	-36.60	647	22-январ-1998	17.2	-37.6	393
F2	-74.43	-36.38	1180	23-январ-1998	7.1	-7.2	391
F3	-74.30	-36.08	1637	23-январ-1998	0.9	-8.9	396
F4	-74.16	-35.70	1984	24-январ-1998	0.1	-3.7	390
M1	-74.23	-32.32	967	10-февр-2009	0.4	-3.9	365
M2	-73.98	-32.28	1898	11-февр-2009	-0.4	-0.8	364
M3	-74.51	-30.17	725	13-февр-2009	6.2	-11.4	361
M4	-74.44	-30.04	1051	13-февр-2009	1.0	-1.5	361
M5	-74.17	-29.54	1917	13-февр-2009	0.0	-0.4	361
S2-1977	-74.67	-33.93	558	28-январ-1977	4.9	-5.9	411
S2-1985	-74.67	-33.93	545	26-январ-1985	4.2	-4.0	371
S2-1987	-74.67	-34.00	558	09-февр-1987	4.1	-5.2	404
S3	-74.58	-32.65	659	12-февр-1992	0.2	-11.1	356
W2	-74.36	-36.02	1411	16-февр-2010	-1.3	-12.0	363
W3	-74.22	-35.92	1844	16-февр-2010	1.1	-5.3	363

Целью данной работы является исследование вертикальной структуры течений на континентальном склоне в западной части моря Уэдделла (склон северо-западной и южной части моря Уэдделла) посредством сбора массива данных о скоростях течений с автономных заякоренных буйковых станций и их последующего совместного анализа.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В данной работе использовались данные с АБС в море Уэдделла, а именно расположенные на континентальном склоне в южной и в северо-западной его частях, для которых характерен широкий шельф. За границу между склоном и шельфом в Антарктике можно принять изобату в 500 м [Nicholis et al., 2009, Клепиков, 1963]. Станции,

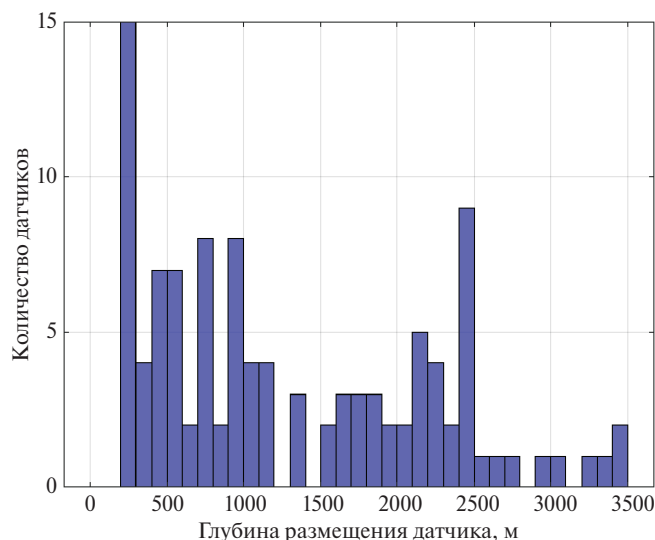


Рис. 4. Распределение датчиков с автономных закоренных буйковых станций по горизонтам их размещения. По оси x отложена глубина расположения датчика, а по y — их количество.

которые находятся на глубинах более чем 500 м, но при этом расположены близко к берегу, относились к шельфовым станциям и не принимались во внимание. Границей между абиссалью и склоном можно считать изобаты в 3500–4000 метров. Рассматривались АБС, на которых имелись датчики скорости (не менее двух на станцию, что позволяло сравнить скорости на различных глубинах).

Таким образом, в данной работе из большого массива собранных АБС представлены лишь подходящие под следующие условия: 1) расположенные на глубинах 500–3500 м в ЗЧМУ, но при этом не слишком близко к берегу 2) имеющие по

крайней мере 2 датчика, измеряющие скорости течения. В итоге под данные условия подошли 37 АБС, расположение которых можно увидеть на рис. 1, а перечень самих станций с краткой информацией указан в таблице № 1. На карте с расположением станций можно выделить два основных района: северо-западная часть моря Уэдделла и южная часть (выделены на карте синим и зеленым прямоугольником соответственно).

Данные с искомым АБС были скачаны из открытой базы данных PANGAEA [<https://www.pangaea.de>]. Используемые в работе данные буйковых станций были получены далеко не в одной экспедиции. Станции устанавливались для различных целей, связанных с изучением как циркуляции вод в море Уэдделла, так и свойств различных водных масс, а также их временной изменчивости.

Для обработки и визуализации имеющихся данных использовался программный пакет Ocean Data View [Schlitzer, 2022], в котором была собрана коллекция из более чем 200 буйковых постановок, а после отобранные подходящие под наши критерии.

Как можно видеть в таблице, глубины, на которых были размещены АБС охватывают весь склон (от 545 м до 3498 м), а также имеют довольно широкий временной охват, что видно также по гистограмме, изображенной на рис. 2, на которой указана суммарная продолжительность измерений датчиков со всех АБС, выраженная в днях, для каждого отдельного года. Даты постановок буев охватывает период от 1977 г и вплоть

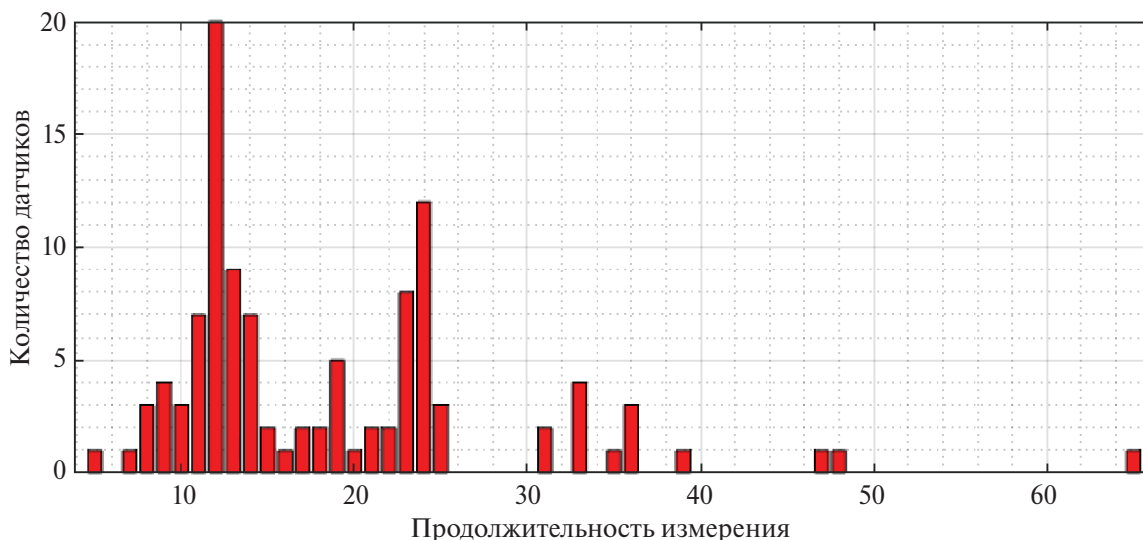


Рис. 5. Распределение количества датчиков по продолжительности их работы на автономных станциях, выраженной в месяцах.

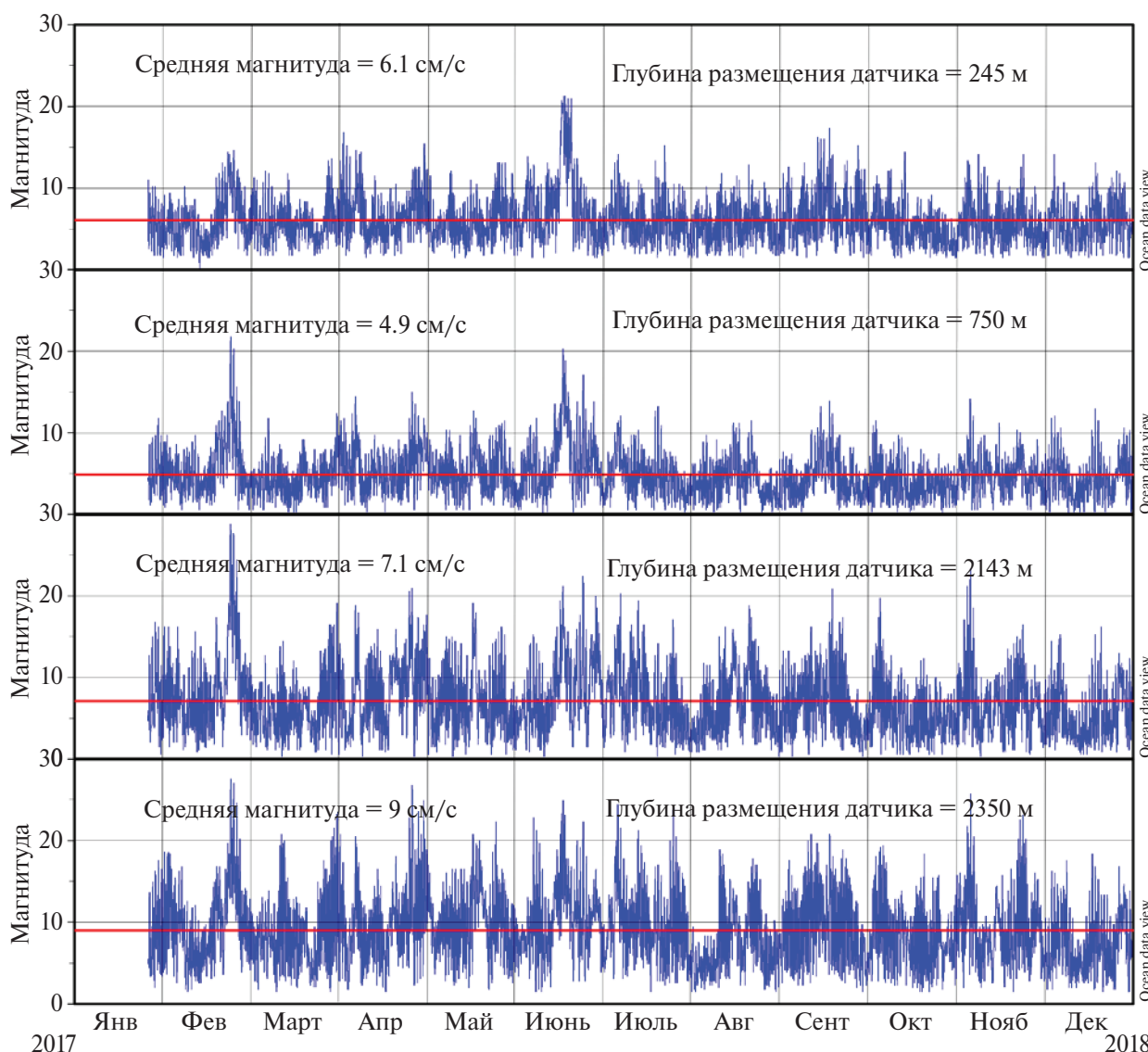


Рис. 6. Магнитуда скорости со всех имеющихся датчиков на автономной заякоренной буйковой станции AW1207–10 за 2018 г. Горизонты размещения датчиков следующие: 245 м, 750 м, 2143 м, 2350 м. Глубина постановки станции 2502 м. Красной линией отмечена средняя за представленный период скорость на датчике. Даны соответствующие подписи средних скоростей.

до 2017 г. (а сами данные вплоть до 2021 г.). (В измерениях имеются окна в периоды с 1978-го по 1985 г. и с 2000-го до 2005 г.).

При этом данные измерений довольно равномерно охватывают все сезоны в течение года, что можно видеть на следующей гистограмме (рис. 3), на которой отмечена суммарная продолжительность измерений для всех датчиков, размещенных на станциях, для каждого дня года.

Горизонты размещения датчиков, установленных на АБС показаны на рис. 4. Диапазон горизонтов размещения датчиков на станциях составляет от 230 м до 3450 м. Охват горизонтов покрывает почти весь слой водной толщи, относящийся к склону (за исключением верхнего слоя

в несколько сотен метров), и максимальный пробел в горизонтах составляет порядка 200 м. Больше всего датчиков было размещено на горизонтах 200–300 м.

Ниже представлена еще одна гистограмма (рис. 5), на которой можно видеть количество датчиков в зависимости от времени, выраженное в месяцах, которое эти датчики измеряли. Согласно рис. 5, есть два основных пика в районе одного и двух лет, то есть большая часть датчиков была установлена на период либо один год, либо два года, что вероятно обусловлено проведением экспедиций преимущественно в летние периоды Южного полушария. При этом минимальная продолжительность измерения датчика составля-

ет немногим менее 1-го года, а максимальная более 5 лет.

Таким образом, представленные в этой статье данные с АБС имеют широкий временной охват по годам (порядка 40 лет), и довольно равномерное сезонное распределение. Данные были получены с АБС, установленных на широком диапазоне глубин, охватывающих весь склон, а сами датчики с этих постановок покрывают почти весь слой водной толщи по глубине размещения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 6 показана магнитуа скорости со всех имеющихся датчиков на АБС AWI207–10 за один 2018 год (сама станция работала дольше), которая была поставлена на глубине в 2502 м. Распределение датчиков по глубине было следующим: один датчик был размещен в верхнем слое водной толщи на глубине примерно 245 м, один в глубинных слоях на горизонте примерно 750 м и еще два датчика были размещены в придонном слое (горизонты 2143 м и 2350 м). По временному ряду, изображенному на рисунке, можно заметить две важные особенности. Во-первых, скорости на датчиках имеют сильную изменчивость, что, в первую очередь, объясняется приливами. Во-вторых, магнитуды скоростей на датчиках в придонном слое достигают более высоких значений, чем магнитуды скорости в верхнем и в глубинном слое водной толщи. На датчике в верхнем и глубинном слое магнитуа скорости, в основном, не превышает значений 15 см/с, но максимум скоростей, при этом, составляет 21.2 см/с и 21.7 см/с соответственно. В то же время, магнитуа скорости на датчиках в при-

донном слое достигает максимальных значений 28.8 см/с и 27.5 см/с. Что касается средней скорости за представленный период, то она сначала несколько уменьшается от верхнего слоя к глубинному (от 6.1 см/с до 4.9 см/с), а затем увеличивается в придонном слое достигая значений 7.1 см/сек на горизонте в 2143 м и 9 см/с на самом нижнем горизонте в 2350 м (при глубине постановки 2502 м).

Для нивелирования вклада прилива в скорости течений, характерных для данного района, и получения информации об «истинных» или общих параметрах были рассчитаны и рассмотрены средние значения скоростей за длительный период времени, а именно за период измерения самого датчика. (период постановок варьируется от немногим менее года до более чем 3 лет). Таким образом можно будет говорить о характерных для данного района, параметрах течений.

Распределение средних значений скоростей на станциях и на датчиках представлены на рис. 7 (осреднение производилось первоначально на датчиках за период их измерения, а после на станциях по средним значениям скоростей на датчиках).

При расчете средних значений скоростей, первоначально было произведено осреднение по компонентам (северная и восточная), а затем посчитана магнитуа, при этом не учитывалась вертикальная составляющая скорости.

Средняя магнитуа скорости на АБС, то есть осредненная по датчикам, почти на всех станциях не превышает 13 см/с. На нескольких АБС имеются средние магнитуды в диапазоне скоростей от 20 до 30 см/с (станции AWI261–1 и D1, соответ-

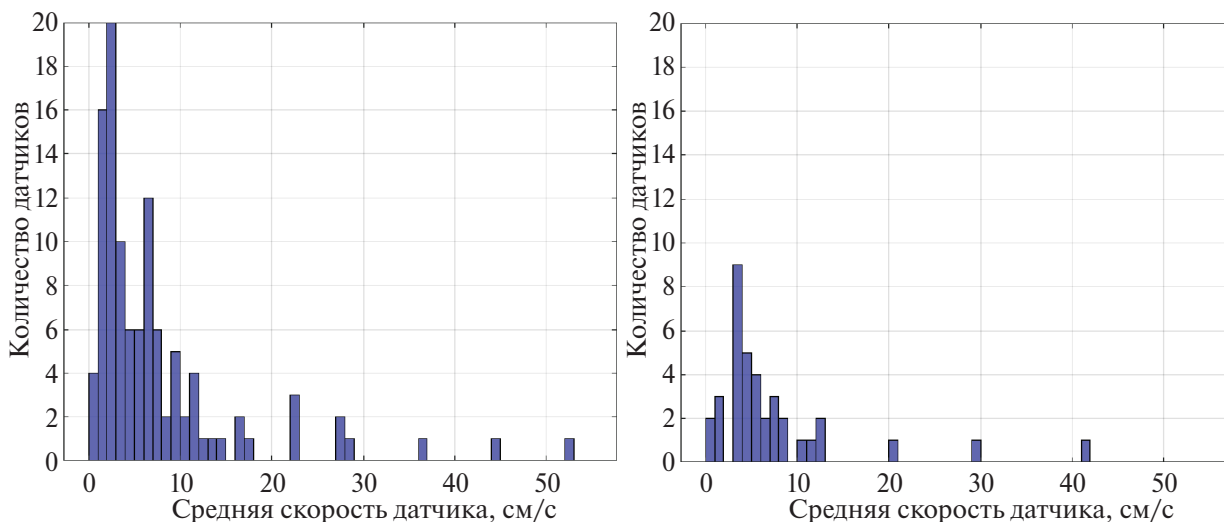


Рис. 7. Распределение осредненных за период измерения значений скоростей: слева для отдельных датчиков на буйковых постановках, справа для буйковых станций в целом, т.е осредненные по датчикам.

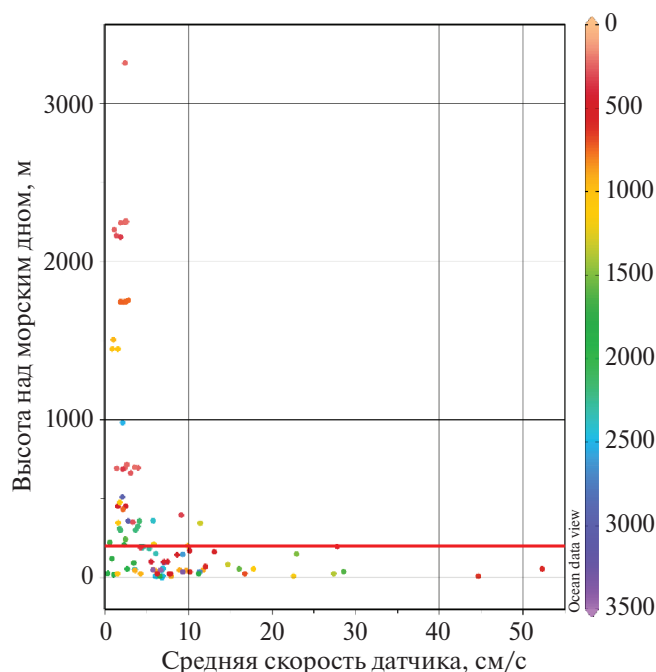


Рис. 8. По оси y отложена высота над морским дном, а по оси x — средняя за период измерения скорость на отдельном датчике. Цветом показан горизонт размещения датчика. Красной линией отмечена высота 200 м над дном.

ственно, здесь и далее названия станций приведены в соответствии с табл. 1). И еще на одной АБС осредненная по времени и по датчикам магнитуа скорости составляет 42 см/с (станция F1).

Средняя магнитуа скорости на датчиках в большинстве случаев не превышает 10 см/с (средняя скорость за весь период наблюдения), оставшаяся часть датчиков имеет значения пол-

ных средних скоростей в диапазоне от 10 см/с до 30 см/с, за исключением нескольких датчиков, на которых осредненные значения скоростей составляют 37 см/с, 45 см/с и 52 см/с. (это датчики со станций D1 и F1, соответственно, последние два значения с датчиков, относящихся к станции F1).

Согласно рассчитанным по датчикам средним значениям скоростей относительно высокие скорости имеются лишь в придонном слое (рис. 8). Практически все датчики (за исключением датчика на станции 261–1), на которых, скорости, осредненные за период измерения, превышают значения 10 см/с, расположены в двухсотметровом слое над дном (высота 200 м над дном показана красной линией на рис. 8).

Пространственное распределение скоростей в верхнем и в придонном слоях также подтверждает увеличение скоростей с глубиной (рис. 9). Этот эффект проявляется как в северо-западной, так и в южной частях моря Уэдделла. В верхней части рис. 9 изображены средние значения скоростей для датчиков, размещенных на глубинах в условно «верхнем» слое (глубина размещения датчика составляет до 0.75 Н, где Н — глубина постановки АБС). А в нижней части рисунка показаны средние значения скоростей для датчиков, размещенных в придонном слое (от 0.75 Н, т.е. нижние 0.25 Н). Визуально, вполне неплохо видна разница между средними значениями скоростей в придонном слое и в остальном вышележащем слое водной толщи. Направления скоростей в целом совпа-

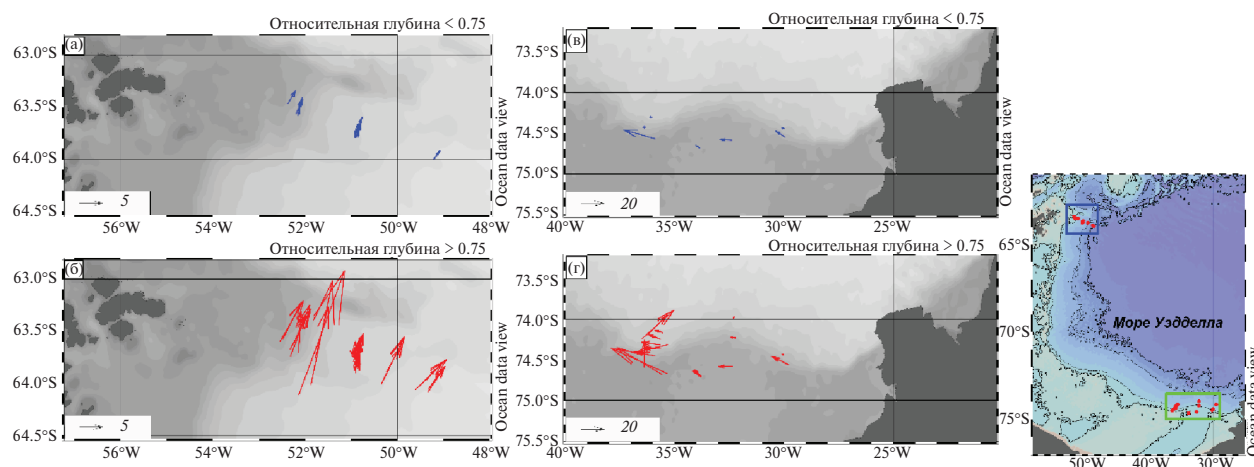


Рис. 9. Карта с указанными осредненными за период измерения значениями скоростей для датчиков на АБС, относящихся к условно верхнему слою (на рисунках а и в, показаны синим цветом) с глубинами до 0.75 Н, где Н — глубина постановки станции, и для датчиков, размещенных в придонном слое (на рисунках б и г, показаны красным цветом) с глубинами от 0.75 Н (нижние 0.25 Н водной толщи). Показаны и северо-западная часть моря Уэдделла (а и б) и южная часть (в и г). Справа внизу представлена схема района, на которой синим прямоугольником отмечена северо-западная часть моря Уэдделла, а зеленым — южная часть.

дают с батиметрией и ориентированы вдоль изобат. Исключением являются станции D1 и F2, на которых направления скоростей на придонных датчиках кардинально отличаются от общей картины. В северо-западной части моря скорости имеют большую северную и небольшую восточную компоненту. В южной части скорости имеют сильную западную составляющую и небольшую северную (за исключением двух станций D1 и F2). Получившиеся направления скоростей воспроизводят характерную для моря Уэдделла циркуляцию и соответствуют известной структуре круговорота Уэдделла.

На рис. 10 представлены распределения, осредненные за период измерения, скоростей на датчиках по отдельности для придонного и оставшегося верхнего слоя. На верхнем рисунке с распределением скоростей для верхнего слоя магнитуда скоростей, практически на всех датчиках невысокая (за исключением нескольких датчиков, на двух из которых скорости составляют порядка 10 см/с, и на последнем третьем датчике средняя скорость достигает 27 см/с (хотя этот датчик расположен на глубине примерно в районе 0.7 Н). На нижнем рисунке показано, что скорости принимают как относительно невысокие значения, так и весьма значительные, превышая значения скоростей в несколько десятков сантиметров.

Полученные результаты об интенсификации течений в придонном слое моря Уэдделла соот-

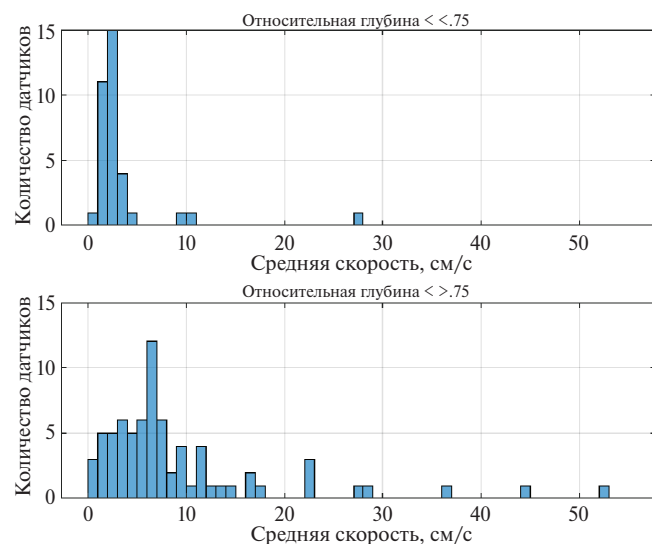


Рис. 10. Распределение средних за период измерения скоростей на датчиках отдельно для верхнего слоя в 0.75 Н и отдельно для придонного слоя в 0.25 Н, где Н — глубина постановки автономной буйковой станции.

ветствуют недавно вышедшим работам. В частности, об этом упоминается в недавно вышедшей статье [Darelius et al., 2023]. Там это наблюдалось на основе данных с двух АБС (2017–2021 гг.), размещенных в верхней части склона. Также повышенные значения скоростей в придонном слое отмечалось на отдельных буйковых станциях, например, в работе [Von Gyldenfeldt et al., 2002]. В северо-западной части моря существенная интенсификация течений в придонном слое была обнаружена на восточной границе пролива Брансфилда [Frey et al., 2022]. Можно еще отметить, что интенсификация придонных скоростей течений отмечается и для других районов Мирового океана [Дианский и др., 2021].

При этом, скорости течений в море Уэдделла не везде имеют придонную интенсификацию. Так, даже на склоне, в восточной части моря наблюда-

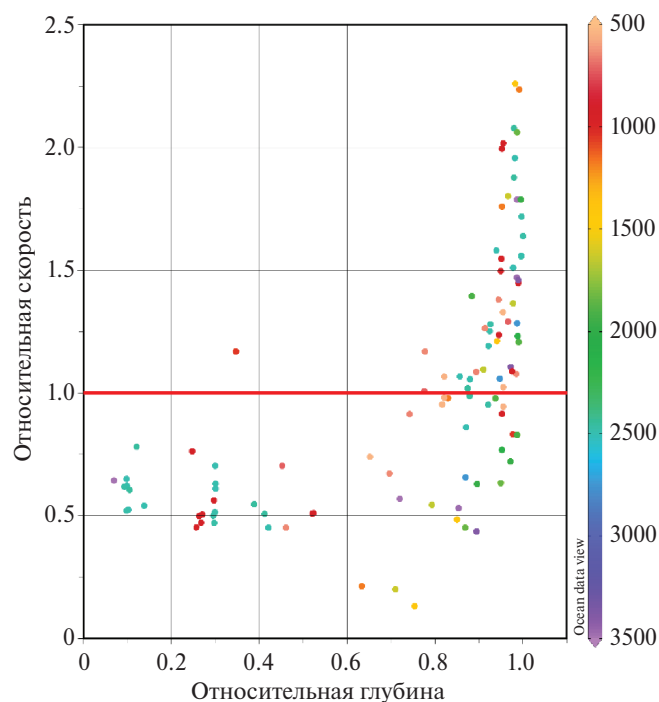


Рис. 11. Относительные скорости на датчиках в зависимости от относительной глубины размещения датчика. Под относительной скоростью понимается отношение, осредненных за период измерения датчика, скоростей на отдельных датчиках к средней скорости на станции (т.е. осредненной по датчикам). Под относительной глубиной понимается отношение горизонта размещения датчика к глубине постановки автономной заякоренной буйковой станции. Цветом указана глубина постановки станции. Красной линией отмечена прямая $y = 1$ и соответственно, положение точки выше или ниже прямой говорит о том, выше или ниже средняя за период измерения скорость на этом датчике по отношению к средней скорости на станции.

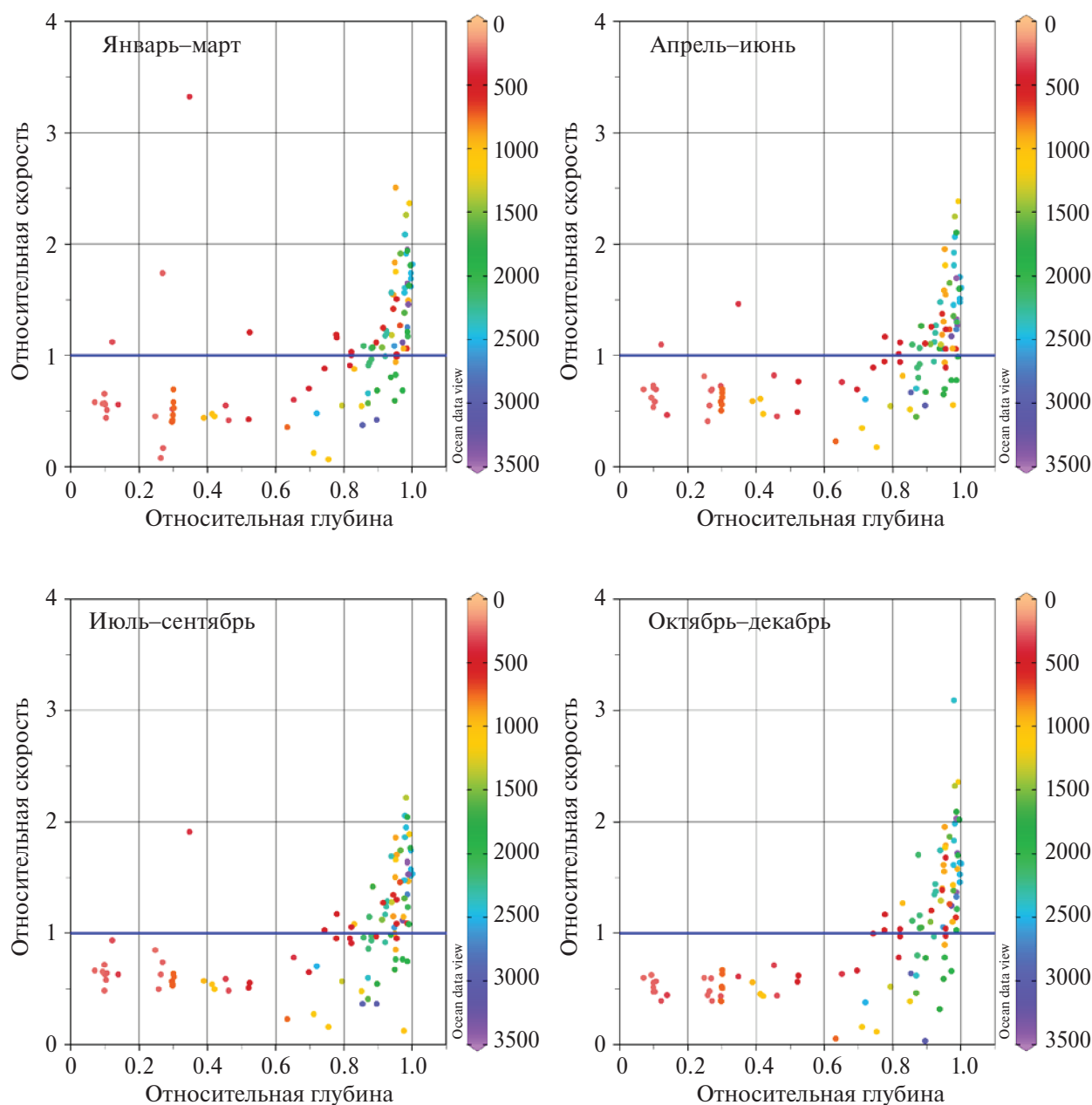


Рис. 12. Относительные значения средних скоростей, с разделением по сезонам, показаны по оси y . Под относительной скоростью понимается отношение средней скорости за сезон на датчике к средней скорости за сезон на станции (т.е. осредненной по датчикам). Относительные глубины размещения датчиков указаны по оси x . Под относительной глубиной понимается отношение горизонта размещения датчика к глубине постановки автономной заякоренной буйковой станции. Цветом также указаны глубины размещения датчиков. Синим цветом отмечена прямая $y = 1$, положение точки выше или ниже этой прямой говорит о том, выше или ниже осредненная скорость на этом датчике по отношению к осредненной скорости на станции.

ется поверхностная интенсификация течений, по крайней мере, на отдельных АБС [Fahrbach et al., 1992].

В представленной работе придонная интенсификация, согласно массиву данных с 37 АБС, расположенных в северо-западной и южной частях моря Уэдделла, присутствует на большинстве склоновых станциях вплоть до глубин 3500 м.

Таким образом, эффект придонной интенсификации течений является характерным для исследуемого района.

На рис. 11 можно видеть характер изменения средней скорости на станции по глубине, который вполне отражает эффект придонной интенсификации течений. Средние скорости на отдельных датчиках, превышающие среднее значение

скорости по всей водной толще, показаны точками, лежащими выше прямой $y = 1$ на рис. 11. На рисунке довольно хорошо видно, что практически все датчики (за исключением одного датчика со станции М4), на которых относительные значения средних скоростей превышают 1, расположены в придонном слое примерно в $0.25 H$, где H — глубина размещения самой АБС. Причем относительные значения скоростей на некоторых датчиках превышают значение 2, т.е. средняя скорость на этих датчиках более чем в два раза выше, чем средняя по станции.

При рассмотрении средних значений скоростей, посчитанные отдельно для каждого сезона, наблюдается аналогичная картина с интенсификацией течения в придонном слое. На рис. 12, аналогичному предыдущему, с относительными значениями средних скоростей по отношению к относительной глубине, но с разделением по сезонам (с января по март, с апреля по июнь, с июля по сентябрь и с октября по декабрь), можно видеть, что ускорение течения в придонном слое примерно в $0.2–0.3 H$ присутствует во все сезоны, пусть и с некоторыми выбивающимися точками (основное облако точек, лежащее над границей в 1 расположено в придонном слое). Так что, по всей видимости, наблюдаемая придонная интенсификация течений в придонном слое в южной и северо-западной части моря Уэдделла является характерной особенностью моря Уэдделла и присутствует круглогодично. Явного сезонного хода не наблюдается.

ВЫВОДЫ

В ходе данной работы был собран из открытого источника (Pangaea) массив данных с АБС в море Уэдделла, охватывающий временной период более 40 лет с 1977 по 2021 гг. Проанализированы данные временных рядов с буйковых постановок, относящиеся к склону (диапазон глубин постановки примерно от 500 до 3500 м, горизонт размещения самих датчиков от 250 м до 3400 м) в южной и северо-западной части моря Уэдделла. Выводы основаны на средних значениях скоростей за период измерения как для отдельных датчиков, так и для станций в целом, т.е. осредненные по датчикам. На основе рассчитанных средних значений скоростей течений для АБС и для отдельных датчиков на этих станциях, были получены следующие выводы:

1. Направления осредненных скоростей на датчиках соответствуют имеющимся представлениям о течениях в море Уэдделла (круговорот Уэдделла циклонической направленности). Осредненные скорости на датчиках ориентированы в целом по направлению изобат, в северо-западной части моря на север-северо-восток, а в южной на запад-северо-запад, за исключением нескольких датчиков в придонном слое.
2. На основе данных осредненных скоростей с буйковых станций (37 постановок) установлено, что для континентального склона в южной и северо-западной частях моря Уэдделла характерна придонная интенсификация течений в слое примерно в $0.2–0.3 H$, где H — глубина постановки автономной буйковой станции.
3. Показано, что выявленное увеличение осредненных скоростей течений в придонном слое на континентальном склоне в южной и северо-западной частях моря Уэдделла присутствует круглогодично и не имеет ярко-выраженного сезонного хода.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана госзаданием ИОРАН FMWE-2024–0016 (работа с базами данных) и грантом РНФ 21–77–20004 (анализ данных и интерпретация).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антипов Н. Н., Багрянцев Н. В., Данилов А. И., Клепиков А. В. Зимние исследования антарктической зоны Южного океана (к 25-летию организации советско-российско-американской дрейфующей станции «Уэдделл – 1») // Океанология. 2019. Т. 59. № 2. С. 308–310.
<https://doi.org/10.31857/S0002351521020048>
- Клепиков В. В. Гидрология моря Уэдделла // Труды Сов. Антарктической Экспедиции 1963. Т. 17. С. 45–93.
- Darelius E., Fer I., Janout M. A., Daae K., Steiger N. Observations of the shelf break current in the southern Weddell Sea: seasonal variability and mean state // ESS Open Archive. 2023. <https://doi.org/10.22541/essoar.169945617.72057337/v1>
- Fahrbach E., Rohardt G., Krause G. The Antarctic coastal current in the southeastern Weddell Sea // Polar Biology. 1992. V. 12. P. 171–182.

- Fahrbach E., Rohardt G., Scheele N., Schroder M., Strass V., Wisotzki A.* Formation and discharge of deep and bottom water in the northwestern Weddell sea // *Journal of Marine Research*. 1995. V. 53. № 4. P. 515–538.
- Frey D., Krechik V., Gordey A., Gladyshev S., Churin D., Drozd I., Osadchiv A., Kashin S., Morozov E. and Smirnova D.* Austral summer circulation in the Bransfield Strait based on SADCP measurements and satellite altimetry // *Front. Mar. Sci.* V. 10:1111541. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1111541>
- Frey D.I., Krechik V.A., Morozov E.G., Drozd I.D., Gordey A.S., Latushkin A.A., Mekhova O.S., Mukhametianov R.Z., Murzina S.A., Ostroumova S.A., Ponomarev V.I., Salyuk P.A., Smirnova D.A., Shutov S.A., Zuev O.A.* Water Exchange between Deep Basins of the Bransfield Strait // *Water*. 2022. V. 14. P. 3193. <https://doi.org/10.3390/w14203193>
- Jullion L., Naveira Garabato A. C., Bacon S., Meredith M. P., Brown P.J., Torres-Valdes S., Speer K. G., Holland P. R., Dong J., Bakker D., Hoppema M., Loose B., Venables H.J., Jenkins W.J., Messias M.-J., Fahrbach E.* The contribution of the Weddell Gyre to the lower limb of the Global Overturning Circulation // *Journal of Geophysical Research*. 2014. V. 119. P. 3357–3377. <https://doi.org/10.1002/2013JC009725>
- Nicholls K. W., Østerhus S., Makinson K., Gammelsrød T., Fahrbach E.* Ice-Ocean Processes over the Continental Shelf of the Southern Weddell Sea, Antarctica: A Review // *Reviews of Geophysics*. 2009. V. 47. P. 1–23. <https://doi.org/10.1029/2007RG000250>
- Orsi A. H., Jacobs S. S., Gordon A. L., Visbeck M.* Cooling and ventilating the abyssal ocean // *Geophysical Research Letters*. 2001. V. 28. P. 2923–2926.
- Orsi A. H., Nowlin W. D., Whitworth T. III.* On the circulation and stratification of the Weddell Gyre // *Deep-Sea Research Part I*. 1993. V. 40. P. 169–203. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(93\)90060-G](https://doi.org/10.1016/0967-0637(93)90060-G)
- Pangaea.* Data Publisher for Earth & Environmental Science. URL: <https://www.pangaea.de/?t=Oceans>.
- Schlitzer R.* Ocean Data View. <https://odv.awi.de>, 2022.
- Thompson F., Heywood K.* Frontal structure and transport in the northwestern Weddell Sea // *Deep-Sea Research Part I*. 2008. V. 55. P. 1229–1251. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2008.06.001>
- Vernet M., Geibert W., Hoppema M., Brown P.J., Haas C., Hellmer H. H., Jokat W., Jullion L., Mazloff M., Bakker D. C.E., Brearley J.A., Croot P., Hatterman T., Hauck J., Hillenbrand C.-D., Hoppe C.J.M., Huhn O., Koch B. P., Lechtenfel O.J., Meredith M. P., Naveira Garabato A. C., Nöthig E.-M., Peeken I., Rutgers van der Loeff M. M., Schmidt S., Schröder M., Strass V.H., Torres-Valdes S., Verdy A.* The Weddell Gyre, Southern Ocean: present knowledge and future challenges // *Reviews of Geophysics*. 2019. V. 57. № 3. P. 623–708.
- Von Gyldenfeldt A.-B., Fahrbach E., Garca M. A., Schröder M.* Flow variability at the tip of the Antarctic Peninsula // *Deep-Sea Research Part II*. 2002. V. 49. P. 4743–4766.

VERTICAL STRUCTURE OF CURRENTS IN THE WESTERN WEDDELL SEA

R. Z. Mukhametyanov^{1,2,*}

¹*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Nakhimovskii pr., 36, Moscow, 119997 Russia*

²*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Institutskii per. 9., 141700 Russia*

*e-mail: rinat0233@mail.ru

The Southern Ocean plays a key role in the global circulation of the World Ocean. The Weddell Gyre, being one of two gyres that determine the large-scale dynamics of the Southern Ocean, makes a significant contribution to the global thermohaline circulation. In this regard, the study of the dynamics and structure of waters in the Weddell Sea seems very relevant for improving our understanding of the processes occurring in the World Ocean. In this work, based on an array of data on current velocities from moorings collected from an open source (Pangaea), the vertical structure of currents on a slope in the western part of the Weddell Sea (northwestern and southern parts) was studied. The main result is the intensification of the current in the bottom layer identified, based on the mean velocities calculated over the period of measurement, which, apparently, is a characteristic feature of the Weddell Gyre for both its western and southern branches. An increase in velocities in the bottom layer at individual moorings previously noted in separate works was confirmed and shown based on an array of data on current velocities from 108 sensors at 37 moorings on the continental slope in the northwestern and southern parts of the Weddell Sea.

Keywords: Weddell Sea, mooring instruments, currents