

УДК 551.46

## ПОЛЕ СКОРОСТИ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ ЛОМОНОСОВА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ 2021 И 2022 г.

© 2022 г. О. А. Зуев<sup>1</sup>, Е. Г. Морозов<sup>1,\*</sup>, член-корреспондент РАН В. Г. Нейман<sup>1</sup>

Поступило 05.05.2022 г.  
После доработки 02.06.2022 г.  
Принято к публикации 06.06.2022 г.

Рассмотрены две серии измерений экваториальных течений Атлантики с помощью бортового акустического доплеровского измерителя скорости течений SADCР на меридиональном разрезе через экватор по 26° з.д. в декабре 2021 г. и в марте 2022 г. По результатам профилирования представлена детальная структура разреза поля скорости высокого разрешения. Новизной работы является выявление тонкой структуры течений по широте и глубине за счет измерений течения бортовым профилографом с высоким пространственным (500 м) и вертикальным (16 м) разрешением. Это оригинальный результат нашего исследования. Параметры течения на разрезе в марте 2022 г. свидетельствуют о высокой вероятности выхода экваториального подповерхностного течения Ломоносова на поверхность океана.

*Ключевые слова:* скорость течения, течение Ломоносова, измерения бортовым профилографом скорости, экватор

DOI: 10.31857/S2686739722600667

### ВВЕДЕНИЕ

В 1959 г. в советской морской экспедиции на научно-исследовательском судне “Михаил Ломоносов” на экваторе в Атлантическом океане был впервые обнаружен подповерхностный поток, названный по имени этого судна течением Ломоносова [6, 10]. Впоследствии стало ясно, что течение Ломоносова [1, 3, 5] имеет аналогичную физическую природу с течением Кромвелла в Тихом океане [2, 13] и течением Тареева в Индийском океане [7, 8]. Не задаваясь здесь целью детального рассмотрения теоретических основ течения Ломоносова, мы полагаем, что к числу исходных причин его происхождения относится крупномасштабное взаимодействие океана с атмосферой. Вследствие этого взаимодействия в экваториальной области океана возникает зона восточных ветров, которые переносят теплую поверхностную воду на запад, где за счет испарения вода становится более соленой и опускается на глубину около 100 м. В результате образуется мощное возвратное подповерхностное течение, которое ориентировано почти строго вдоль экватора на восток, так как при отклонении от экватора сила Кориолиса удерживает это течение в узкой эква-

ториальной зоне. Отметим, что эти конкретные признаки течения Ломоносова в Атлантическом океане, которое переносит вдоль экватора воды высокой солености от побережья Бразилии на восток до Гвинейского залива, описываются в качестве основных его черт во многих ключевых работах, посвященных этому крупномасштабному потоку. В работах [1, 2] даны обзоры экспериментальных измерений в экваториальной зоне, а в работах [5, 11] изложены теоретические основы динамики вод вблизи экватора. В работе [3] изложены результаты наших первых измерений профилографом скорости при пересечении экватора в 2014–2017 гг.

Поскольку экваториальные подповерхностные противотечения являются важной составной частью глобальной структуры общей циркуляции вод Мирового океана, определенный научный интерес представляет получение статистически обеспеченных данных об их пространственно-временной устойчивости. Сохраняя и укрепляя свой приоритет в открытии и исследовании течения Ломоносова, российские океанологи используют каждую представившуюся возможность для выполнения очередной серии измерения его скорости на более совершенном техническом уровне.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Данные измерений течений, обсуждаемые в работе, получены авторами в 2021–2022 гг. при помощи бортового профилографа течений

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П.П. Шишова  
Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: egmorozov@mail.ru

SADCP Ocean Surveyor-75 фирмы TRDI 75 кГц. Во время 87-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” при переходе через экватор было выполнено два профилирования течения Ломоносова (иначе называемого экваториальным подповерхностным противотечением, ЭПП) судовым SADCP. Оба разреза проходили по 26° з.д., с 16-метровым послойным осреднением и общей эффективной глубиной профилирования 700 м, глубина центра верхнего слоя измерений приходится на 22 м. Первый разрез выполнен с 28 по 31 декабря 2021 г., второй – с 13 по 15 марта 2022 г. Все скорости приведены для двухминутного осреднения, что соответствует разрешению по горизонтали около 500 м. Как показано в работе [4], такое осреднение по времени данных измерений бортовым профилографом позволяет корректно выявить реальную тонкую структуру исследуемых течений.

### СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ ЛОМОНОСОВА

На приведенных рисунках показано построенное по данным измерений распределение широтной компоненты скорости течений на обоих разрезах. На первом разрезе (рис. 1 а) отчетливо прослеживается несколько разнонаправленных потоков. На поверхности – направленное на запад Южное Пассатное течение (ЮПТ), нижняя его граница соответствует верхней границе ЭПП. ЮПТ распространено в широтной полосе от 4° ю.ш. до 3° с.ш., при этом отмечены два максимума западной компоненты скорости на 3.8° ю.ш. на глубине 48 м, где она составляла 67 см/с, и на 1.8° с.ш. на 32 м, где скорость достигала 91 см/с. В северной и южных частях разреза ЮПТ распространено до глубин 100–110 м, тогда как в средней части его нижняя граница расположена значительно выше в связи с влиянием ЭПП и наблюдается на 30 м.

Как показано на рис. 1 а, направленное на восток ЭПП располагалось между 1.5° ю.ш. и 1.5° с.ш. в слое от 30 до 230 м, при этом его следы прослеживались до 360 м в центральной части разреза. Скорость в стрезне течения Ломоносова достигала 111 см/с на 0.4° с.ш. на глубине 78 м. Стрезень течения был незначительно смещен к северу от экватора и находился на глубине от 50 до 100 м. Расход в струе течения Ломоносова по границам внутри изотахи 0.1 м/с составлял 21.1 Св.

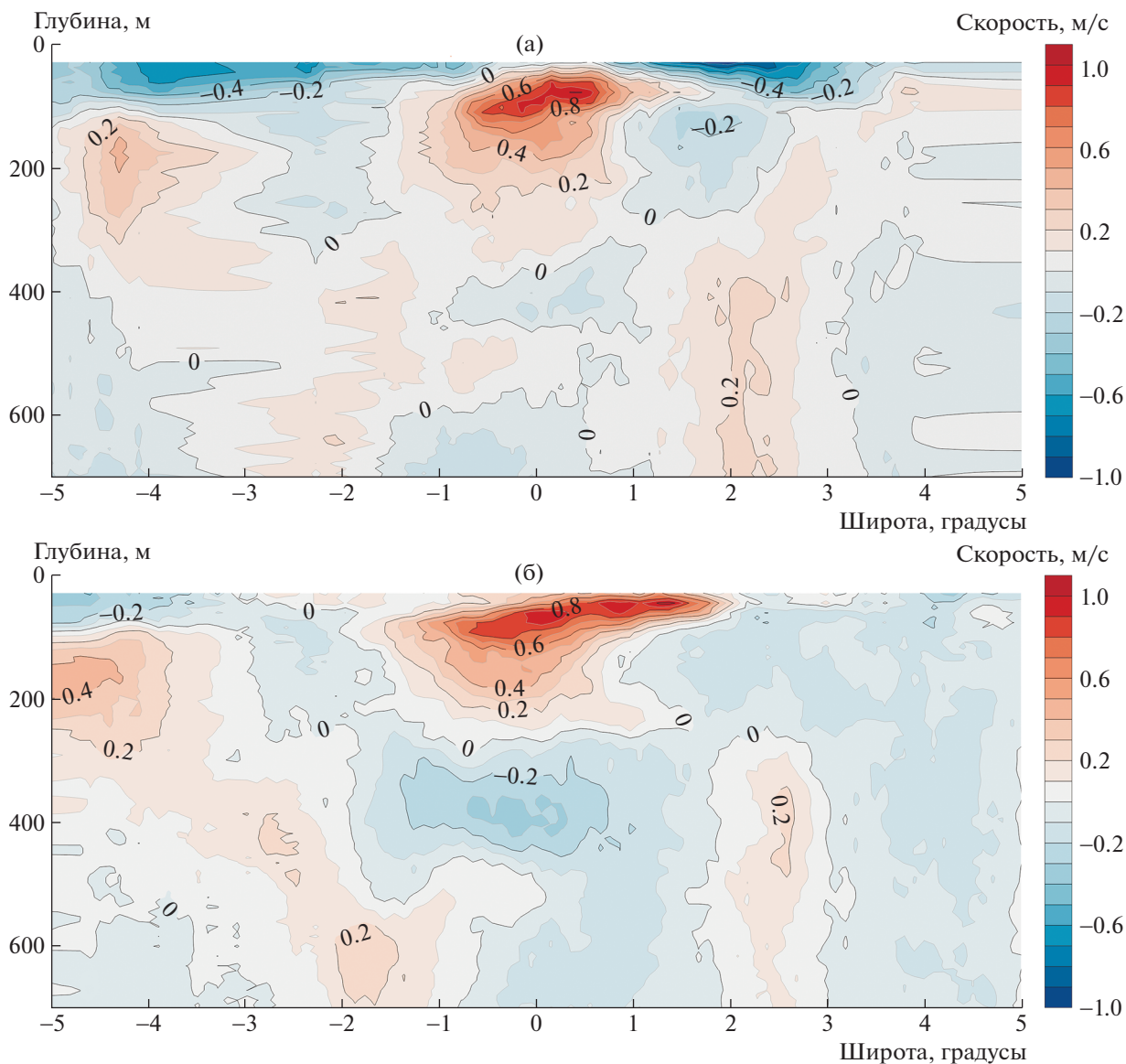
Ниже ЭПП, на глубинах 400–700 м, выделяется Экваториальное Промежуточное течение (ЭПТ), западная компонента скорости в котором не превышала 20 см/с. Кроме того, были отмечены направленный на восток перенос в районе 4° ю.ш. в слое 150–250 м со скоростями до 40 см/с, и два западных потока со скоростями до 20 см/с, граничащих с ЭПП с флангов на глубинах 100–300 м.

На втором разрезе (рис. 1 б) структура экваториальных течений значительно отличается. В крупномасштабной системе экваториальных течений явно вырисовывается признак главного изменения – выхода течения Ломоносова на поверхность океана. Некоторые признаки эпизодического существования такого “редкого поведения” этого экваториального потока были отмечены в некоторых упомянутых выше работах. Из-за ослабления пассатов практически исчезает экваториальное поверхностное течение на запад, остаются только незначительные западные потоки в крайних южной и северной частях разреза.

Скорости в их ядрах немногим превышают 35 см/с, составляя на основной части западного переноса 10–20 см/с. На этом фоне основной поток ЭПП, сохраняя свою привязанность к экватору, несколько увеличивается в поперечнике и перемещается вверх, по-видимому, выходя в северной части на поверхность океана. Границами течения являются широты 2° ю.ш. до 2° с.ш. Глубина распространения течения варьируется от поверхности до 250 м. Условное ядро течения Ломоносова со скоростями более 80 см/с растянуто от 0.6° ю.ш. на глубине 100 м до 1.5° с.ш. на глубине 40 м. Максимум скорости 114 см/с наблюдается на глубине 45 м на 0.82° с.ш. Расход течения Ломоносова внутри изотахи 0.1 м/с увеличился до 23.3 Св.

При этом ЭПТ становится более мощным – скорости в ядре, расположенном на 400 м на экваторе, превышают 30 см/с, верхняя граница потока смещается на 270 м. Потоки на запад, окружающие подповерхностное течение Ломоносова, смещаются по глубине и соединяются с ЭПТ, образуя объемный, но медленный перенос на запад. Поток в районе 4° ю.ш. на глубинах 150–250 м незначительно смещается к югу и развивает скорости до 50 см/с. Одновременно, по данным того же разреза, скорости западных компонент течений, окружающих течение Ломоносова с флангов на поверхности, существенно ослабевают.

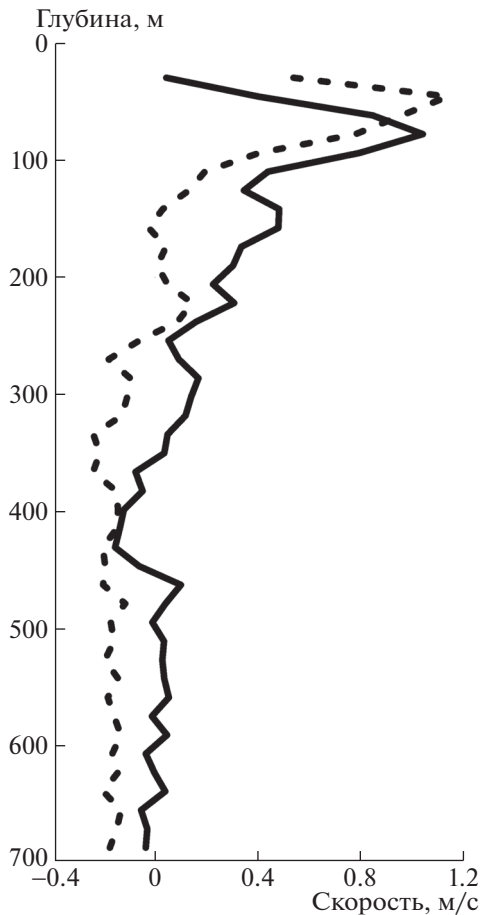
Мы полагаем, что различия в структуре двух разрезов связаны с внутригодовой изменчивостью экваториальной циркуляции и хорошо согласуются с предыдущими наблюдениями, описанными в научной литературе [12, 14]. Первый разрез приходится на конец декабря, который является переходным периодом между максимумами заглупления ядра подповерхностного течения бореальной осенью и его подъема к поверхности весной. Выше было сказано, что ядро течения расположено на глубине 78 м, максимальная скорость 111 см/с. Влияние восточных ветров значительно, наблюдается широкое поверхностное течение на запад, средние скорости около 50 см/с. Второй разрез выполнен в середине марта, бореальной весной, когда зональная составляющая



**Рис. 1.** Разрезы зональной компоненты скорости течений на  $26^\circ$  з.д. Разрез выполнен с севера на юг с 28 по 31 декабря 2021 г. (а); разрез выполнен с юга на север с 13 по 15 марта 2022 г. (б). Положительное направление (в чертеж) на восток. Глубина центра верхнего слоя измерений 22 м; вертикальный размер измерительной ячейки 16 м; осреднение по времени 2 мин эквивалентно пространственному осреднению по горизонтали 0.5 км.

скорости ветра в экваториальной Атлантике изменяет свое направление на противоположное: компонента, направленная на запад, сменяется компонентой, направленной на восток. Соответственно перестраивается и структура экваториального течения: поверхностный западный поток, развитый значительную часть года, замедляется и временами полностью исчезает, а течение Ломоносова смещается ближе к поверхности, иногда выходя на нее и образуя обратный восточный перенос. Максимальная скорость в ядре составляет 114 см/с и находится на 45 м, что значительно выше расположения ядра течения в конце декабря (рис. 2).

Из литературных источников известно, что изменчивость структуры экваториальных течений безусловно связана с ветром [14]. В последнее десятилетие (2008–2018) отмечается интенсификация ЭПП [18], вызванная усилением пассатных ветров в северо-западной тропической Атлантике. На рис. 3 приведена зональная компонента скорости ветра над районом измерений. Данные получены из базы JMR55. В декабре 2021 г. скорость ветра была максимальной и направлена на запад (отрицательные скорости). К марту 2022 г. скорость восточного ветра стала уменьшаться и в середине марта его направление сменилось на западное.

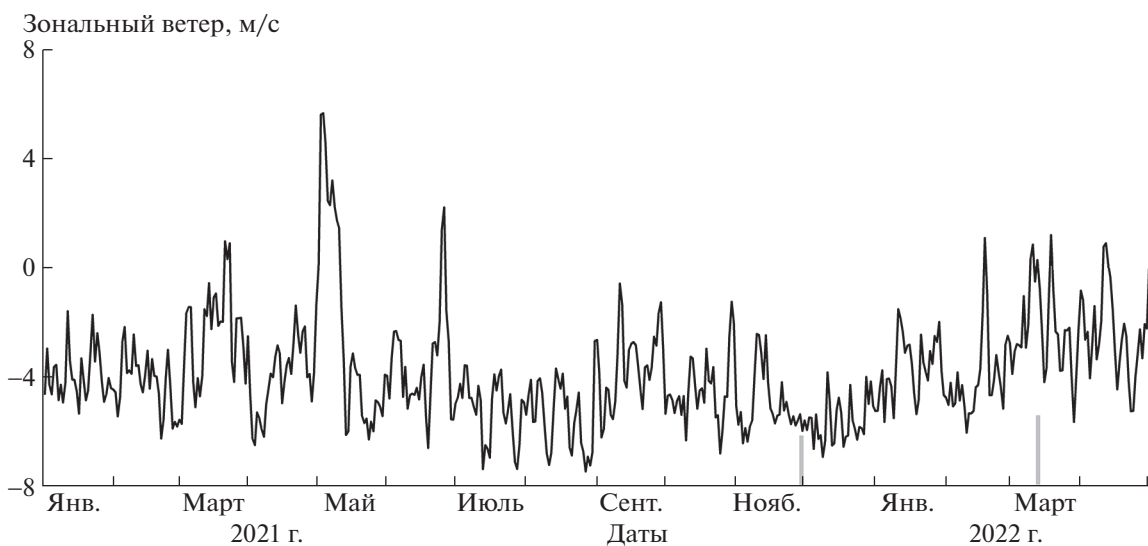


**Рис. 2.** Профили скорости восточной компоненты: 29 декабря 2021 г. на  $0.4^\circ$  с.ш. (сплошная линия), 14 марта 2022 г. на  $0.81^\circ$  с.ш. (штриховая линия).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставление полученных нами результатов с данными предшествующих натуральных исследований в том же регионе [4, 17] позволяет предположить, что отмеченные в настоящей работе различия в гидрофизической структуре двух разрезов в экваториальной Атлантике связаны с внутригодовой изменчивостью циркуляционных процессов в атмосфере [12]. В нашем случае первый разрез приходился на конец декабря. В данном регионе в это время наблюдается окончание периода восточных ветров, под воздействием которых на поверхности океана в экваториальной зоне формируется и поддерживается западное Пассатное течение со средней скоростью около 50 см/с [9, 16]. Далее, если продолжить сопоставление полученных в настоящей работе результатов с соответствующими материалами других исследований [1, 14], то нетрудно убедиться, что выполненный в середине марта 2022 г. второй наш разрез приходится на бореальную весну, когда зональная составляющая ветра в экваториальной Атлантике изменяет свое направление на противоположное. Соответственно перестраивается и структура экваториальных течений в верхнем слое океана. Западный поток, развитый здесь значительную часть года, ослабевает, вследствие чего течение Ломоносова иногда смещается ближе к поверхности, как показали наши измерения в 2022 г. и, в случае выхода на поверхность, образует обратный восточный перенос.

В работе рассмотрены результаты анализа данных профилирования зональных экваториальных течений Атлантики во время 87-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш». Наблюдения вы-



**Рис. 3.** Изменчивость зонального ветра над районом измерений на экваторе ( $26^\circ$  з.д.). Отрицательные значения соответствуют восточному ветру. Серые столбики показывают время выполнения разрезов в конце декабря 2021 г. и в марте 2022 г.

полнялось дважды — на повторном разрезе по 26° з.д. через экватор в декабре 2021 г. и в марте 2022 г. Измерения с высокой степенью детализации проводились на ходу судна бортовым профилографом скорости SADCР при интервале осреднения данных 2 мин, что соответствует пространственному разрешению 500 м.

Измеренные течения характеризуются значительной фрагментарной расчлененностью с суб- и мезомасштабными размерами элементов динамической структуры поля скорости (рис. 1). В марте 2022 г. инструментально зафиксирован признак выхода на поверхность экваториального подповерхностного течения Ломоносова.

Изменения интенсификации течения Ломоносова связаны со временем года, т.е. с сезонной изменчивостью циркуляции атмосферы, и сопровождается вертикальной миграцией стружия по глубине с одновременным изменением скорости потока. Наши измерения тонкой структуры течений подтвердили это. Максимальные скорости в ядре зарегистрированы в марте в период ослабления восточных ветров. Полученные вариации находятся в хорошем согласии с временной средней изменчивостью параметров течения Ломоносова, известной по литературным данным [2, 12].

Полноценное изучение эволюции основной бароклинной структуры океана, а также крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в высоких и средних широтах, требует непрерывных многолетних рядов наблюдений. В спектре же колебаний скорости экваториальных течений существует статистически достоверный энергонесущий всплеск на периоде порядка недели [2]. Следовательно, экваториальный район предоставляет уникальную возможность реального изучения быстрой бароклинной динамической реакции океана на возмущения атмосферы и позволяет исследовать механизм энергопередачи в системе океан—атмосфера в соответствующем диапазоне пространственно-временных масштабов. Немаловажно, что для такого рода исследований требуются относительно короткие ряды наблюдений, что значительно упрощает и удешевляет экспериментальную часть работы.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках Госзадания № FMWE-2021-0002. Анализ данных выполнен при поддержке гранта РФФ 21-77-20004.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бубнов В.А. Циркуляция вод экваториальной зоны Мирового океана. Л. Гидрометеоздат. 1990. 280 с.
2. Бурков В.А., Монин А.С., Изменчивость течений и сопутствующих океанологических полей на Атлантическом экваториальном полигоне / В кн.: Изменчивость океана и атмосферы в экваториальной Атлантике, М., Наука. 1982. С. 8—35.
3. Демидова Т.А., Морозов Е.Г., Нейман В.Г., Экваториальное подповерхностное течение Ломоносова по данным измерений бортовым профилографом в 2014—2017 гг. // ДАН. 2018. Т. 482. № 3. С. 325—328.
4. Демидова Т.А., Нейман В.Г., Морозов Е.Г., Структура поля скорости экваториального течения Ломоносова по данным измерений весной 2014 и осенью 2015 гг. // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 2. С. 108—138. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(2\).8](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).8)
5. Кортаев Г.К., Михайлова Э.Н., Шаниро Н.Б. Теория экваториальных противотечений в Мировом океане. Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.
6. Колесников А.Г., Богуславский С.Г., Григорьев Г.Н., Пономаренко Г.П., Саркисян А.С., Фельзенбаум А.И., Хлыстов Н.З. Открытие, экспериментальное исследование и разработка теории течения Ломоносова. 1968. Севастополь. МГИ. 243 с.
7. Нейман В.Г., Бурков В.А., Щербинин А.Д. Динамика вод Индийского океана. М.: Научный мир, 1995. 223 с. ISBN 5-89176-023-1.
8. Нейман В.Г., Фрей Д.И., Амбросимов А.К., Каплуненко Д.Д., Морозов Е.Г., Шаповалов С.М. Экваториальные течения в Индийском океане по измерениям в феврале 2017 г. // ДАН. 2018. Т. 479. № 1. С. 84—87.
9. Овчинников И.М., Кривошея В.Г., Осадчий А.С. Некоторые особенности структуры и динамики гидрофизических полей в зоне течения Ломоносова на меридиане 18°35'. Изменчивость океана и атмосферы в экваториальной Атлантике, М.: Наука. 1982. С. 50—60.
10. Пономаренко Г.П. 10-й рейс НИС “Михаил Ломоносов” в Атлантический океан // Океанология. 1962. № 2. С. 164—172.
11. Фельзенбаум А.И., Шаниро Н.Б. Некоторые вопросы теории течений на экваторе / Течение Ломоносова. Севастополь. МГИ АН УССР. Отв. ред. А.Г. Колесников. Т. 34. Киев.: Наукова думка, 1966. С. 81—93.
12. Brandt P., Funk A., Tantet A., Johns W.E., Fischer J. The Equatorial Undercurrent in the Central Atlantic and its Relation to Tropical Atlantic Variability // Climate Dynamics. 2014. V. 43. P. 2985—2997. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2061-4>
13. Hayes S.P. Vertical Fine Structure Observations in the Eastern Equatorial Pacific // J. Geophys. Res. 1981. V. 86 (C11). P. 10983—10999. <https://doi.org/10.1029/JC086iC11p10983>
14. Leetmaa A., McCreary J.P. Jr., Moore D.W. Equatorial Currents: Observations and Theory / In: Evolution of Physical Oceanography, B.A. Warren and C. Wunsch (Eds.). MIT Press. 1981. P. 184—197.
15. Philander S.G.H. Equatorial Undercurrent: Measurements and Theories // Rev. Geophys. Space Phys. 1973. V. 11. P. 513—570.

16. *Philander S.G.H.* The Equatorial Undercurrent Revisited // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 1980. V. 8. P. 191–204.
17. *Stramma L., Schott F.* The Mean Flow Field of the Tropical Atlantic Ocean // *Deep-Sea Res. II.* 1999. V. 46. P. 279–303.
18. *Brandt P., Hahn J., Schmidtko S., Tuchen F.P., Kopte R., Kiko R., Bourlès B., Czeschel R., Dengler M.* Atlantic Equatorial Undercurrent Intensification Counteracts Warming-induced Deoxygenation // *Nat. Geosci.* 2021. V. 14. P. 278–282.  
<https://doi.org/10.1038/s41561-021-00716-1>

## VELOCITY FIELD OF THE EQUATORIAL LOMONOSOV CURRENT BASED ON THE MEASUREMENTS IN 2021–2022

**O. A. Zuev<sup>a</sup>, E. G. Morozov<sup>a,#</sup>, and Corresponding Member of the RAS V. G. Neiman<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>#</sup> *E-mail: egmorozov@mail.ru*

Two series of measurements of the equatorial currents in the Atlantic based on the shipborne acoustic Doppler current velocity profiler SADCp over a meridional section through the equator at 26° W are considered. The measurements were carried out in December 2021 and March 2022. Based on the profiling results, a detailed structure of the high-resolution velocity field section is presented. The novelty of the work is the measurement of the fine structure of currents by latitude and depth by measuring the current using a shipborne profiler with high spatial (500 m) and vertical (16 m) resolutions. This is the original result of our study. The flow parameters in the section in March 2022 indicate a high probability that the equatorial Lomonosov Undercurrent outcrops to the ocean surface.

*Keywords:* current velocity, Lomonosov Current, measurements with shipborne velocity profiler, equator