

УДК 551.465

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ В ГЛУБОКОЙ ЧАСТИ ЧЁРНОГО МОРЯ

А. А. Клювиткин<sup>1,\*</sup>, А. Г. Островский<sup>1</sup>, академик РАН А. П. Лисицын<sup>1</sup>,  
член-корреспондент РАН С. К. Коновалов<sup>2</sup>

Поступило 05.04.2019 г.

В 2016–2017 гг. впервые выполнены длительные – в течение года – измерения эйлеровых скоростей течений в 100 метрах над дном в глубокой центральной котловине Чёрного моря. Анализ новых данных привёл к неожиданным результатам: зарегистрированы значительные скорости течений, достигавшие по амплитуде 0,13 м/с; периодические сильные горизонтальные движения отмечены вблизи локальной инерционной частоты  $f_i$ , причём наблюдается “голубое смещение” (до 5% относительно  $f_i$ ) инерционного максимума в спектре; вблизи частоты  $1 \cdot 10^{-6}$  Гц в области перегиба спектра уровень энергии течений близок к наблюдаемому в этом же диапазоне в верхнем слое моря (на горизонте 100 м под поверхностью моря); в области сбалансированных геострофических движений энергетический спектр имеет наклон  $-2,8$  по сравнению с наклоном  $-1,8$  аналогичного спектра, полученного для течений в верхнем слое моря.

*Ключевые слова:* глубоководное течение, долговременные измерения, эйлеровы скорости течений, инерционные движения, энергетический спектр, наклон спектра, Чёрное море.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524885550-554>

В центре Чёрного моря расположена широкая и довольно плоская абиссальная равнина, которая окружена крутым континентальным склоном. Водная толща над абиссальной равниной представляет особый интерес для изучения потоков энергии и вещества разномасштабными динамическими процессами. Здесь под перманентным пикноклином в слоях глубже 600 м термохалинные характеристики мало меняются по пространству, причём глубже 1700 м наблюдается придонный однородный слой [1]. В самых глубоких слоях нет стабильных фронтов, где пространственные градиенты основных термодинамических характеристик были бы значительно обострены (по сравнению с их фоновым распределением), и на которых развивались бы течения. Чёрное море относится к бесприливным, поэтому в отличие от океана здесь отсутствуют источники турбулентного перемешивания вследствие взаимодействия внутренних приливов с неровностями рельефа дна. В глубоководных слоях моря можно получить слабозашумлённые натурные данные о горизонтальных движениях, включая инерционные колебания (периодические движения, обусловленные вращением Земли), и об их вертикальной структуре.

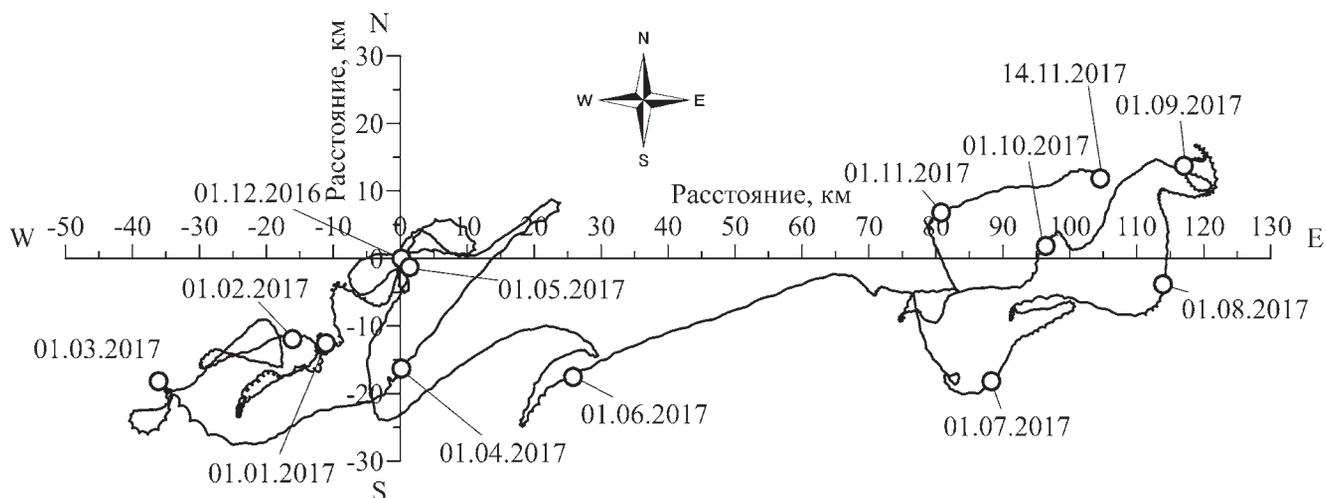
Наблюдения за глубинными течениями в Чёрном море были начаты с помощью дрейфующих буёв АРГО в 2000-х гг. [2]. За скорость буя на горизонте его дрейфа в толще воды была принята оценка отношения пройденного пути ко времени между всплытиями буя на поверхность [2, 3]. Преобладающий интервал времени между профилированиями составил примерно 120 ч для данных 16 буёв АРГО, по которым в работе [4] были оценены лагранжевы скорости течений на глубинах ниже основного пикноклина, в том числе в слое 1200–1600 м. Были получены оценки среднего переноса на масштабе времени около 5 сут, а короткопериодную изменчивость течений таким способом оценить не удалось. В целом, частотный состав колебаний глубоководных течений в Чёрном море остаётся неизученным. Нет экспериментальных данных о каскадах энергии и энтропии в области геострофически-сбалансированных движений, слабо изучены периодические инерционные движения. В данной работе сделана попытка восполнить пробел в наших знаниях об энергетическом спектре глубоководных динамических процессов в Чёрном море по временным рядам уникальных данных прямых измерений скорости течений с помощью глубоководной обсерватории.

Измерения течений осуществлялись с помощью акустических доплеровских измерителей течений Nortek Aquadopp и Sontek Argonaut MD, отработавших около 12 и 11 месяцев, соответственно, в составе автоматической глубоководной седиментационной обсерватории (АГОС). Постановка АГОС проведена

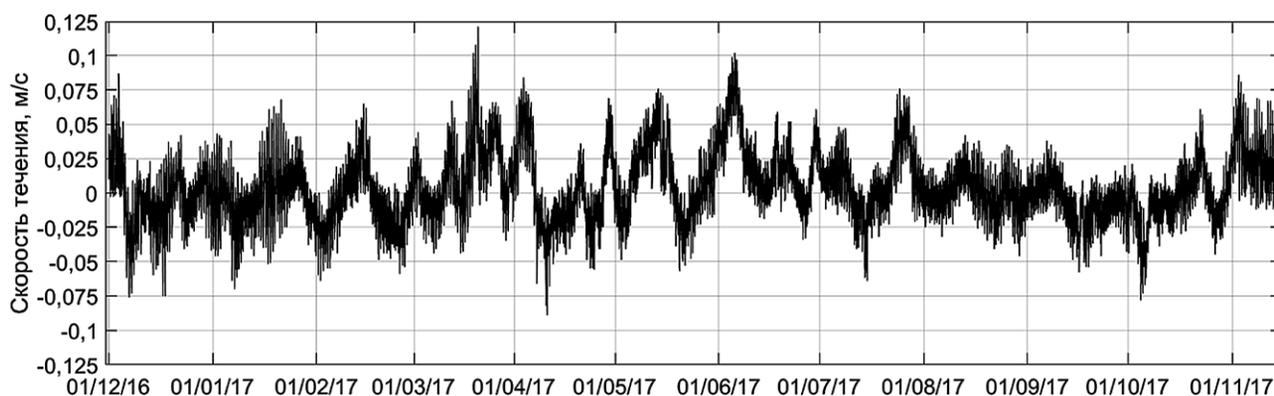
<sup>1</sup> Институт океанологии им. П.П. Шишова Российской Академии наук, Москва

<sup>2</sup> Морской гидрофизический институт Российской Академии наук, Севастополь

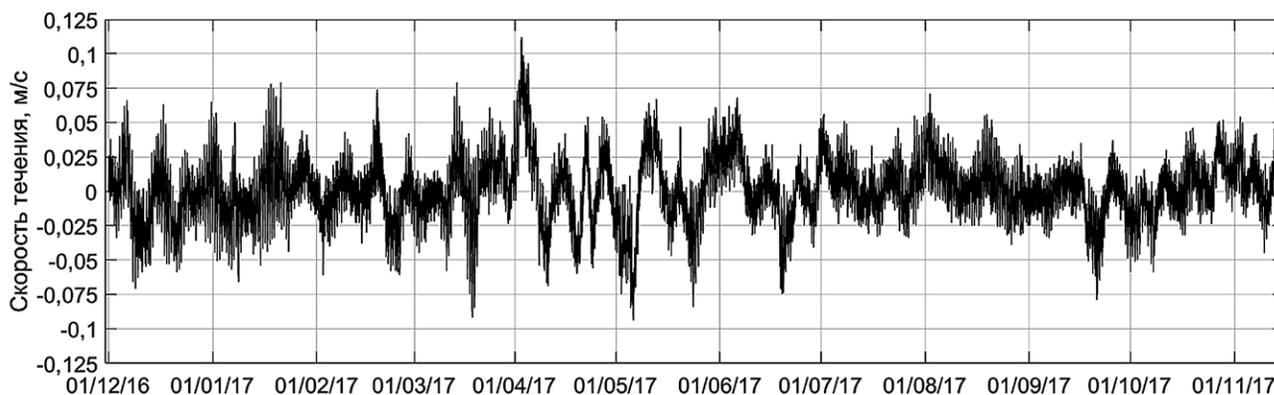
\*E-mail: [klyuvitkin@ocean.ru](mailto:klyuvitkin@ocean.ru)



(a)



(б)



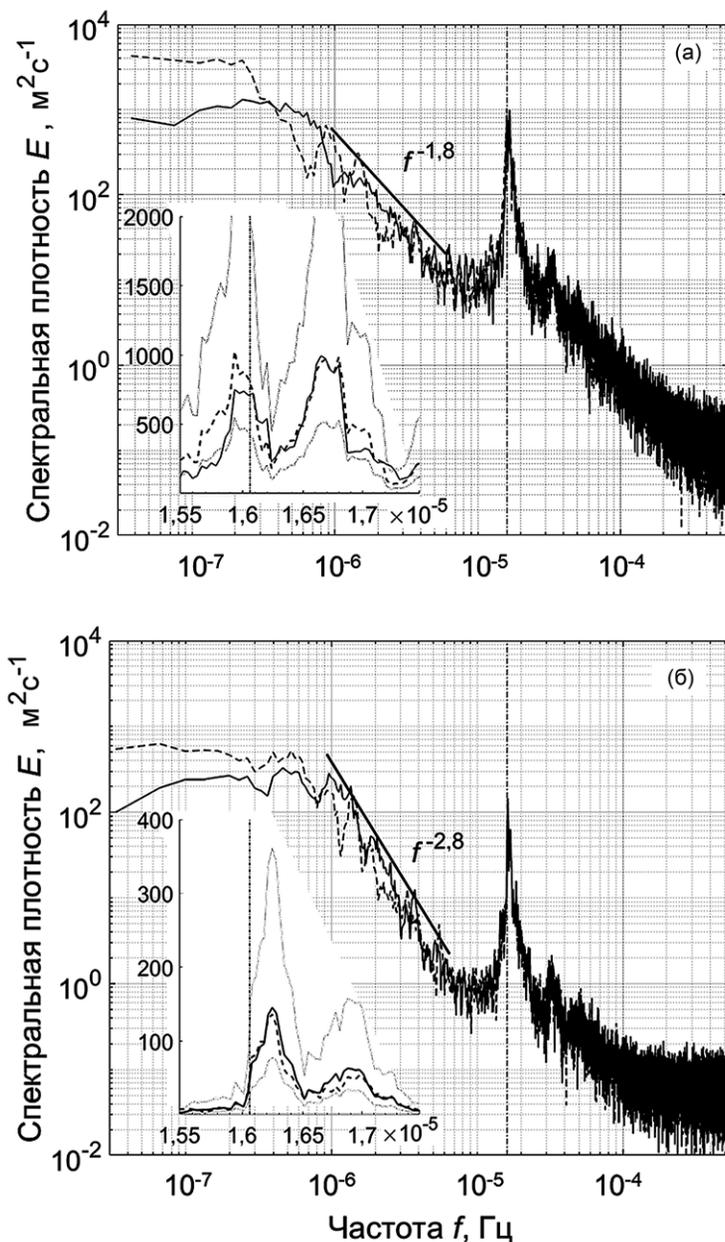
(в)

Рис. 1. Накопленная прогрессивная векторная диаграмма перемещения водных масс через точку измерения (а), зональный (б) и меридиональный (в) компоненты скорости течения на горизонте 1700 м по данным измерений АГОС.

в 91 рейсе нис «Профессор Водяницкий» в ноябре 2016 г. в нижней части северо-западного склона глубоководной котловины Чёрного моря в 130 км на юго-запад от м. Херсонес (Крым) при глубине моря 1800 м в точке с координатами  $43^{\circ}47,0'$  с.ш.

$32^{\circ}03,5'$  в.д. [5], подъём – в декабре 2017 г. в 101 рейсе того же судна. Экспозиция АГОС составила 388 сут.

Измерители течений были установлены: Argonaut MD на горизонте 100 м, а Aquadopp в 100 м над дном.



**Рис. 2.** Спектральная плотность скорости течений на горизонтах 100 м (а) и 1700 м (б). Сплошная и пунктирная линии – спектры меридиональной и зональной компонент скорости течения. Наклонные прямые линии – аппроксимации спектров степенными функциями. Вертикальный пунктир – локальная инерционная частота  $f_i$ . На врезках – фрагменты в линейном масштабе в частотной области инерционных колебаний; тонкие точечные линии – 95% доверительные интервалы.

Интервал статистически независимых спектральных оценок сигнала был получен с помощью набора ортогональных весовых последовательностей, число которых  $nw$  определяет частотное разрешение спектра [8]. Значение  $nw$ , как правило, задаётся в диапазоне 3–6; в нашем случае  $nw = 4$ . Методы Уэлча и МТМ дали очень близкие оценки энергетических спектров. Для оценки наклонов спектров был использован пакет программ EzyFit (<http://www.fast.u-psud.fr/ezyfit/>).

Прямые измерения скорости течений показали, что глубоководный слой Чёрного моря не так пассивен динамически, как это считалось ранее. Хотя за 1 год наблюдений модуль скорости течения на горизонте 1700 м составил в среднем всего 0,03 м/с (стандартное отклонение – 0,02 м/с), его максимум достигал 0,13 м/с. Результирующий вектор переноса был направлен на восток-северо-восток ( $84^\circ$ ) (рис. 1а). Временной тренд в ряду зональной и меридиональной компоненты скорости течения отсут-

ствовал (рис. 1б, в). Для сравнения, в верхней части постоянного пикноклина на горизонте 100 м перенос за 11 месяцев был направлен на запад-северо-запад ( $280^\circ$ ), а среднее и максимальное значения модуля скорости течения составили 0,09 и 0,28 м/с соответственно. Стоит отметить, что по данным буёв АРГО за 2008–2015 гг. ближайшая траектория глубоководного дрейфа (1200–1600 м) пролегла примерно в 40 км южнее АГОС, причём буй дрейфовал на запад [4]. На промежуточных по глубине горизонтах дрейфа буёв АРГО (350–600 м) в районе АГОС наблюдался преимущественно западный перенос со скоростью до 0,05 м/с [4].

Анализ временных рядов данных измерений на горизонтах 100 и 1700 м показал, что частотные спектры  $E(f)$  скорости течений (рис. 2) содержат три основных диапазона изменчивости:

- 1) геострофически сбалансированных течений;
- 2) инерционных движений на частотах, близких к локальной инерционной  $f_i$ ;
- 3) континуума внутренних волн между частотой  $f_I$  и частотой плавучести  $N$ .

Отметим, что в данном районе частота плавучести на горизонте 100 м  $N < 10^{-2}$  Гц [9], а на горизонте 1700 м не должна превышать  $10^{-3}$  Гц. По сравнению с аналогичными спектрами, полученными для глубоководных морских бассейнов (например, [10]), в Чёрном море отсутствуют приливные пики, в частности, пик лунного прилива M2, на суперинерционных частотах.

Спектры  $E(f)$  для горизонтов 100 и 1700 м выполнены в низкочастотной области при  $f < 6 \cdot 10^{-7}$  Гц (период  $\tau > 72$  сут) и  $f < 1 \cdot 10^{-6}$  Гц ( $\tau > 11,5$  сут) соответственно. На более высоких частотах, вплоть до нижней границы широкого минимума  $f \approx 6 \cdot 10^{-6}$  Гц ( $\tau \approx 2$  сут), спектры компонент скорости течения на горизонте 100 м пропорциональны  $f^{-1,8}$ , а на горизонте 1700 м —  $f^{-2,9}$ . Таким образом, наклон спектра в верхней части пикноклина Чёрного моря близок к значению  $-2$ , предсказанному в [11]. Однако в нижнем слое моря наклон спектра скорости течения в частотном диапазоне  $1-6 \cdot 10^{-6}$  Гц очень близок к значению  $-3$ . На временных масштабах от 2 до 11 сут каскад энергии в нижнем слое моря спадает с частотой быстрее, чем в верхнем слое моря. Такой крутой наклон спектра скорости течения не наблюдался ранее в океане [11, 12], а из известных нам работ наиболее крутой наклон ( $-2,5$ ) в спектрах скоростей течений был отмечен в районе Саргассова моря [13].

Другой неожиданный результат анализа заключается том, что в определённом частотном диапазоне уровень спектральной энергии скорости течений на верхнем и нижнем горизонтах измерений отличается весьма незначительно. Такая особенность наблюдается вблизи частоты  $1 \cdot 10^{-6}$  Гц в области перегиба спектра скорости течения на глубоководном горизонте. Это может свидетельствовать о мезомасштабных баротропных динамических образованиях, проходящих в водной толще над АГОС за примерно 10–11 сут. Также можно предположить, что окрестность частоты  $1 \cdot 10^{-6}$  Гц является областью энергетической подпитки глубоководных течений.

На горизонте 100 м наблюдаются сильные инерционные колебания, о чём свидетельствует пик с раздвоенной вершиной с максимумами на частотах  $f$ :  $1,6 \cdot 10^{-5}$  и  $1,67 \cdot 10^{-5}$  Гц (рис. 2), причём значение второй частоты сдвинуто на  $\sim 4\%$  в высокочастотную область относительно локальной инерционной частоты, которая, как это следует из простейшей модели, должна быть равна  $f_i = 1,606 \cdot 10^{-5}$  Гц, т.е. иметь период  $\tau_i = 17,296$  ч на  $43^\circ 47,0'$  с.ш. В верхнем слое моря инерционные колебания генерируются в результате атмосферных воздействий: штормов и аномалий приземного атмосферного давления. Пространственный масштаб и интенсивность атмосферных воздействий наряду с вертикальной стратификацией водной толщ влияют на проникновение инерционных колебаний вглубь моря [13].

На горизонте 1700 м инерционный пик также имеет два максимума на частотах  $1,625 \cdot 10^{-5}$  и  $1,69 \cdot 10^{-5}$  Гц. Эти максимума сдвинуты на  $1\%$  и  $\sim 5\%$  относительно  $f_i$ , т.е. наблюдается так называемое “голубое смещение” частоты инерционных движений [14], и величина этого смещения согласуется с теоретическими и экспериментальными значениями, полученными в других районах Мирового океана (например, [15]), причём “голубое смещение” растёт с глубиной, что также не противоречит теории.

В целом длительная постановка АГОС как компоненты четырёхмерной океанологии дала совершенно новые сведения о частотном спектре скорости глубоководного течения. Для продолжения изучения глубоководных течений и оценивания их пространственных энергетических спектров необходима постановка кластера АГОС. Соответствующий натуральный эксперимент был бы чрезвычайно важен для изучения потоков вещества в каскадах разномасштабных вихрей в море.

**Источники финансирования.** Экспедиции проведены при поддержке РФФ (грант № 14–27–00114–П). Методологическая часть работы поддержана РФФИ

(грант № 19–0–00787). Обработка данных выполнена при поддержке госзадания (№ 014–2019–0011).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Murray J. W., Top Z., Özoğuz E. // Deep Sea Res. A. 1991. V. 38. Suppl. 2. P. S663–S689.
2. Korotaev G., Oguz T., Riser S. // Deep-Sea Res. II. 2006. V. 53. № 17–19. P. 1901–1910.
3. Герасимова С.В., Лемешко Е.Е. В кн.: Системы контроля окружающей среды. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. В. 15. С. 187–196.
4. Маркова Н.В., Багаев А.В. // Мор. гидрофиз. журн. 2016. № 3. С. 26–39.
5. Ключиткин А.А., Кравчишина М.Д., Русанов И.И. и др. // Океанология. 2018. Т. 58. № 4. Приложение (Декабрь 2018). С. S30–S32.
6. Thomson D. J. // Proc. IEEE. 1982. V. 70. P. 1055–1096.
7. Percival D.B., Walden A.T. // Cambridge University Press. 1993. 583 p.
8. Wunsch C. // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1999. V. 80. P. 245–255.
9. Морозов А.Н., Федоров С.В., Маньковская Е.В. // Океанология. 2018. Т. 58. № 5. С. 681–688.
10. Jörn C., Ferrari R. // J. Phys. Oceanogr. 2013. 43. № 11. P. 2456–2474.
11. Frankignoul C., Muller P. // J. Phys. Oceanogr. 1979. V. 9. № 1. P. 104–127.
12. Ferrari R., Wunsch C. // Tellus A. 2010. V. 62. № 2. P. 92–108.
13. Reznik G.M. // Ocean Dyn. 2018. V. 68. P. 987–1000.
14. Richman J.G., Wunsch C., Hogg N.G. // Rev. Geophys. Space Phys. 1977. V. 15. № 4. P. 385–420.
15. Новотрясов В.В. // Океанология. 1998. Т. 38. № 1. С. 64–67.

## THE ENERGY SPECTRUM OF THE CURRENT VELOCITY IN DEEP LAYERS OF THE BLACK SEA

A. A. Klyuvitkin<sup>1</sup>, A. G. Ostrovskii<sup>1</sup>, Academician of the RAS A. P. Lisitzin<sup>1</sup>,  
Correspondent Member of the RAS S. K. Konovalov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russian Federation*

Received April 4, 2019

In 2016–2017, for the first time, nearly year-long measurements of the current velocities were carried out below the thermocline at a depth of 100 m and at a depth of 1700 m that was about 100 m above the seabed by using the mooring station in the deep central part of the Black Sea. Analysis of the new data set allowed us to uncover the followings. In the near-bottom layer, the significant flow velocities were recorded, reaching a peak magnitude of 0.13 m/s. Near the frequency of  $1 \cdot 10^{-6}$  Hz, in the transition region of the energy spectrum, the spectral energy of the deep current was close to that observed in the same range in the subthermocline layer of the sea. In the range of balanced geostrophic motions, the energy spectrum had a slope of  $-2,8$  that should be compared to a spectrum slope of  $-1,8$  obtained for current below the thermocline. The regular strong horizontal currents were observed near the local inertial frequency  $f_l$ . There was a “blue shift” of the inertial maximum up to 5% with respect to  $f_l$  in the energy spectrum.

**Keywords:** deep-sea current, long-term measurements, Eulerian velocities, inertial motions, energy spectrum, spectrum slope, Black Sea.