

УДК 504.423, 551.46

О ПРИДОННОМ НЕФЕЛОИДНОМ СЛОЕ В ГЛУБОКОВОДНОМ ПРОХОДЕ КЕЙН

© 2022 г. В. В. Сивков^{1,2,*}, Е. С. Бубнова^{1,2}

Представлена академиком РАН Л.И. Лобковским 20.11.2021 г.

Поступило 20.11.2021 г.

После доработки 08.12.2021 г.

Принято к публикации 08.12.2021 г.

По распределению интенсивности обратного акустического рассеяния получены первые данные о существовании придонного нефелоидного слоя в глубоководном проходе Кейн (Центрально-Восточная Атлантика). Он находился в пределах трансформированной Антарктической донной воды, его мощность достигала 150 м. Высокие скорости придонных течений в проходе предполагают перманентность придонного нефелоидного слоя. Выявлена придонная тонкая структура вертикального распределения трассеров антарктической донной воды – кислорода и минерального кремния. Крупные биоминеральные агрегаты (~40 мкм) обнаружены в придонной взвеси прохода Кейн. Они образуются в высокопродуктивном районе Канарского апвеллинга и быстро оседают в придонный слой океана за счет “балластинга” гелеобразных продуктов жизнедеятельности фитопланктона плотными минеральными частицами из пустыни Сахара. Поверхностные и придонные течения переносят агрегаты взвеси к проходу Кейн.

Ключевые слова: глубоководный проход Кейн, придонный нефелоидный слой, обратное акустическое рассеяние, трансформированная Антарктическая донная вода, балластинг

DOI: 10.31857/S2686739722040168

В придонном нефелоидном слое (ПНС) содержится и переносится преобладающее количество тонкодисперсного осадочного вещества, рассеянного в водах Мирового океана [1, 2]. Вертикальное развитие (мощность) ПНС определяется балансом гравитационного оседания и вертикальной турбулентной диффузии взвеси, зависящей от скорости придонных течений.

Глубоководные каналы и проходы представляют собой локальные объекты в масштабах океанского дна, но именно они в значительной степени регулируют распространение придонных вод океана. В каналах и проходах происходит значительное ускорение придонных течений. Ярким примером в этом смысле является канал Вима, расположенный на границе Аргентинской и Бразильской котловин Атлантического океана. Через него в северном направлении распространяется Антарктическая донная вода (ААДВ). Глубоководные каналы и проходы также оказывают заметное влияние на динамику осадочного вещества. В частности, на

их периферии формируются гигантские конусы выноса и дельты [3]. По вертикальному распределению объемной концентрации взвеси в канале Вима был выявлен ПНС мощностью до 500 м [4].

Значительно менее изучен расположенный в Восточной Атлантике глубоководный проход Кейн, через который происходит обмен ААДВ между котловинами Зеленого Мыса и Сьерра-Леоне.

Основной маршрут распространения ААДВ в Атлантическом океане проходит западнее Срединно-Атлантического хребта. Проникая через долины трансформных разломов в Восточную Атлантику, ААДВ заметно трансформируется, что дает основания к востоку от хребта выделять самостоятельную придонную водную массу. Так, например, в [5] используется термин “Северо-восточная Атлантическая донная вода” с районом формирования от экватора до 30° с.ш. Все же в настоящей работе мы используем термин ААДВ, поскольку к востоку от Срединно-Атлантического хребта явно прослеживается генетическая связь придонных вод с ААДВ (пониженные значения температуры, солёности, содержания растворенного кислорода и повышенные значения концентрации растворенного кремния).

К настоящему времени сформировалось общее представление о гидрологическом режиме в

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской академии наук, Москва, Россия

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Калининград, Россия

*E-mail: vadim.sivkov@atlantic.ocean.ru

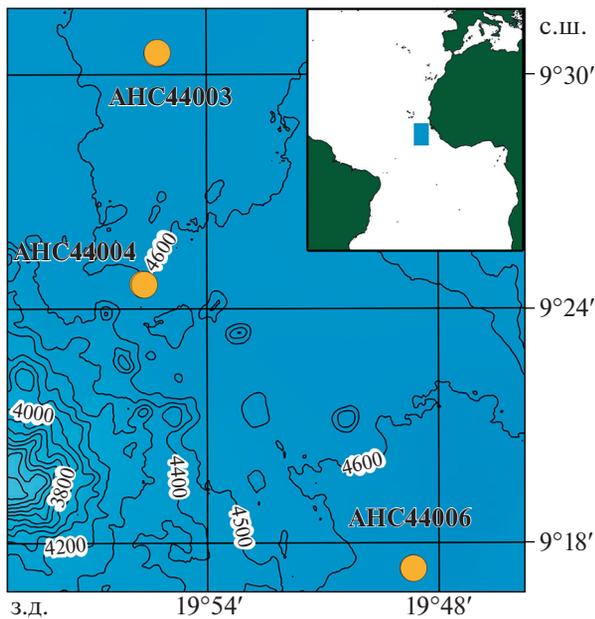


Рис. 1. Расположение океанологических станций 44-го рейса НИС “Академик Николай Страхов” в глубоководном проходе Кейн (изобаты даны по [9]).

проходе Кейн [6]. О заметной роли придонных течений в динамике осадков свидетельствует обнаруженный недавно на северной периферии прохода обширный контуритовый дрейф. Происхождение дрейфа связывается с разгрузкой течения ААДВ [7]. Вместе с тем сведения о концентрации взвеси в придонном слое прохода Кейн до настоящего времени остаются единичными, а данные о существовании ПНС отсутствовали. Настоящая работа призвана заполнить, в известной мере, этот пробел.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Акустические сигналы доплеровских профилографов течений рассеиваются взвешенным веществом. Поэтому регистрируемая интенсивность обратного акустического рассеяния может быть использована для оценки относительной концентрации взвеси (например, [8]).

В 44-м рейсе НИС “Академик Николай Страхов” 17–19 октября 2019 г. в глубоководном проходе Кейн на трех станциях (рис. 1) в режиме вертикального зондирования были выполнены измерения амплитуды (интенсивности) обратного акустического рассеяния. Для этой цели использовался доплеровский измеритель течений Nortek Aquadopp Deep Water 6000 m (частота излучателя 2 МГц, разрешение 0.45 дБ). Интенсивность обратного акустического рассеяния была рассчитана согласно методике производителя [10].

Для изменения гидрофизических параметров на станциях использовался СТД-зонд SBE 19plus V2 SeaCAT (точность измерения температуры – 0.005°C, электропроводности – 0.0005 С/м, давления – 0.1% от глубины зондирования).

На каждой станции в придонном слое было отобрано по несколько проб воды для определения вещественного состава взвеси, содержания растворенного кислорода и концентрации минерального кремния. Использовался пробоотборник карусельного типа SBE32, оснащенный батометрами Нискина (объемом 1.7 и 5 л), и дополнительный батометр, крепившийся на 2 м ниже пробоотборника (минимальное расстояние до дна по альтиметру составляло 8–12 м). Взвесь собиралась путем фильтрации проб воды объемом 1–3 л через мембранные фильтры с диаметром пор 0.4 мкм при давлении 0.4 бар. После рейса пробы взвеси были исследованы в Балтийском Федеральном университете им. Иммануила Канта с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6390LV/Oxford INCAEnergy “JEOL”. Гидрохимические анализы были выполнены методами, принятыми в ИО РАН [11]: определение содержания растворенного кислорода проводилось титриметрическим методом Винклера (относительная ошибка ±1%), концентрации минерального кремния – спектрофотометрическим методом (спектрофотометр КФК-3) по голубому кремнемолибденовому комплексу по методу Королева на длине волны 810 нм (относительная ошибка ±2.5%).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По вертикальному распределению интенсивности обратного акустического рассеяния (EL) на всех станциях проявился ПНС (рис. 2). Его мощность составила около 100 м на крайних станциях, и около 150 м – на средней станции. Не вдаваясь в дискуссию о критериях положении границы ААДВ, мы вслед за [6] определили ее по изотерме $\theta = 1.9^\circ\text{C}$, которая располагалась на глубине ~4300 м. Это означает, что выявленный ПНС находился в пределах ААДВ, причем, в значительной степени, в пределах слоя экмановского трения, мощность которого в проходе Кейн оценивается в ~100 м [12]. Максимальные значения EL были отмечены на придонных горизонтах, при этом они немного уменьшались в южном направлении. В соответствии со сложившимися представлениями о ПНС [1] можно предположить, что ниже полученных профилей, непосредственно у дна (слой 8–12 м), значения EL могут еще более возрасти. В пределах ПНС (станции АНС44004 и АНС44006) отмечены локальные максимумы EL.

Очевидно, что существование выраженного ПНС в узком проходе (ширина не более 50 км) ас-

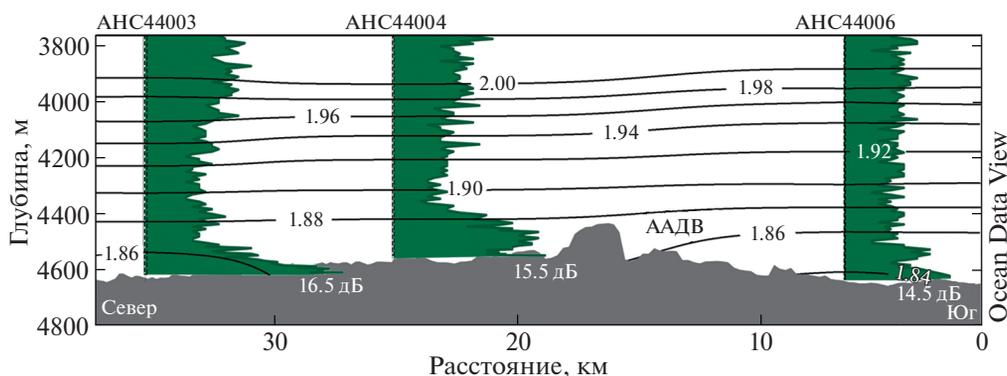


Рис. 2. Вертикальное распределение интенсивности обратного акустического рассеяния EL (дБ, зеленая заливка) – показателя относительной концентрации тонкодисперсной взвеси в придонном слое глубоководного прохода Кейн на фоне потенциальной температуры θ (°C, сплошные линии). Для каждой станции приведены максимальные (придонные) значения EL.

социруется с придонным течением, которое переносит через проход ААДВ. По данным работы [6] направление переноса меняется несколько раз в год, а среднегодовая скорость придонного течения на глубине 4562 м в период измерения (2010–2011 гг.) составила 14 см/с при его южном направлении и 11 см/с – при северном. Согласно [13] такие скорости обеспечивают поддержание глинистых осадочных частиц во взвешенном состоянии. Таким образом, имеются основания полагать, что выявленный ПНС является перманентным.

Полученные нами значения трассеров ААДВ – содержания кислорода и концентрации минерального кремния, в целом согласуются со значениями, полученными в районе исследования ранее [5, 14, 15]. Вместе с тем обращают на себя внимание небольшие ступени в вертикальном распределении этих трассеров. На станциях АНС44004 и АНС44006 такие ступени прослеживаются на глубине ~4400–4500 м, они соответствуют снижению содержания кислорода на ~0.10 мл/л и повышению концентрации кремния на ~1–4 $\mu\text{моль/кг}$ (рис. 3). На станциях АНС44003 и АНС44006 отмечено резкое падение содержания кислорода в нескольких метрах от дна. Если на первой из этих станций содержание кислорода уменьшилось на 0.14 мл/л, то на второй падение было экстремальным – на 1.50 мл/л (с 5.16 до 3.66 мл/л). Концентрации кремния у дна в обоих случаях были максимальными и практически не менялись. Следует оговориться, что единичное экстремальное значение кислорода требует подтверждения, поскольку ранее полученных данных по содержанию кислорода в непосредственной близости от дна в районе исследования нами найдено не было. Вместе с тем не исключено, что нами зафиксированы последствия интенсивного окисления органического вещества донных осадков, которое в больших количествах поступает к проходу Кейн из высокопродуктивного района

Канарского апвеллинга, о чем было упомянуто в работе [14].

Исследование вещественного состава придонной взвеси с помощью электронного микроскопа позволило обнаружить, наряду с обычными для открытого океана мелкими частицами кварца и глинистых минералов, крупные биоминеральные агрегаты (размером ~40 мкм) (рис. 4). Их присутствие на абиссальной глубине в почти ненарушенном виде может быть объяснено ускоренной седиментацией взвеси, обусловленной “балластингом” [16–18], суть которого заключается в следующем. Активное формирование агрегатов взвеси, как известно, происходит в высокопродуктивных районах океана, где в результате жизнедеятельности фитопланктона в больших количествах образуются гелеобразные прозрачные экзополлимерные частицы. Если в эти же районы поступает большое количество более плотных частиц взвеси, то в результате их слипания возникают крупные биоминеральные агрегаты, в которых плотные частицы играют роль балласта. Скорость седиментации агрегатов возрастает на порядок по сравнению с отдельными частицами, и, как следствие, агрегаты успевают достигнуть абиссальных глубин мало измененными в ходе биохимического разложения.

В рассматриваемом случае механизм балластинга реализуется к северу от прохода Кейн – в биопродуктивном районе Канарского апвеллинга. Сюда поступают большие массы золотой терригенной взвеси из Сахары [19]. Обнаружение биоминеральных агрегатов в проходе Кейн согласуется с выводами работы [20] о существовании дальнего переноса агрегатов взвеси от района Канарского апвеллинга в южном направлении, к району прохода Кейн. Перенос обеспечивается Канарским течением, системой экваториальных течений, а также течением ААДВ, согласно [14] идущему на восток-юго-восток, к проходу Кейн, из долины трансформного разлома Вима.

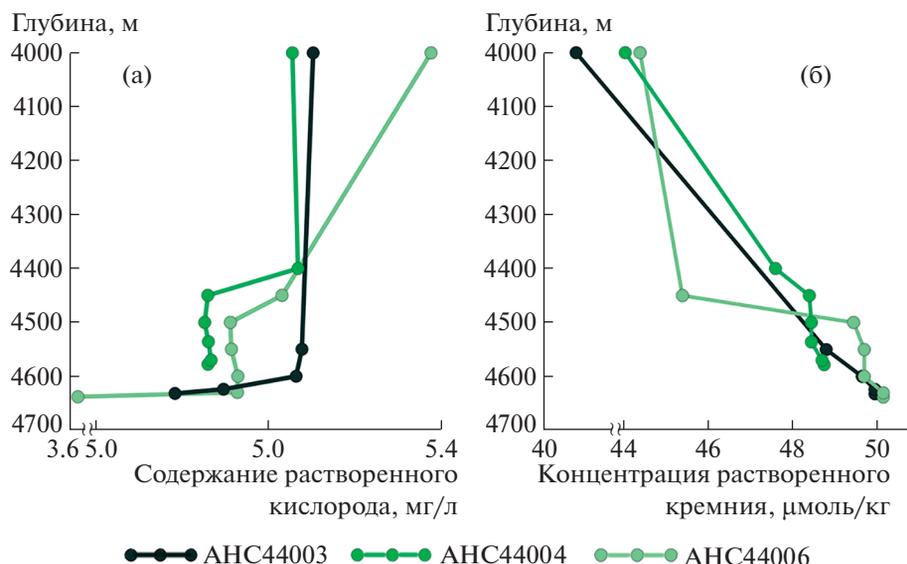


Рис. 3. Распределение растворенного кислорода (а) и растворенного минерального кремния (б) в глубоководном проходе Кейн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по данным об интенсивности обратного акустического рассеяния получены первые данные о существовании ПНС в глубоководном проходе Кейн. Он находится в пределах ААДВ, и его мощность достигает 150 м. Постоянные высокие скорости придонных течений (>10 см/с), позволяющие удерживать осадочные частицы во взвешенном состоянии, свидетельствуют в пользу перманентности ПМС. В пределах ПМС выявлена тонкая придонная структура вертикального распределения трассеров ААДВ – кислорода и минерального кремния. Предпо-

жительно, она может формироваться в ходе окисления органического вещества донных осадков, поступающего из высокопродуктивного района Канарского апвеллинга. Отсюда же, благодаря поверхностным и придонным течениям, в придонный слой прохода Кейн попадают крупные, быстро оседающие биоминеральные агрегаты взвеси (~ 40 мкм), которые образуются в результате балластинга гелеобразных биогенных частиц плотными частицами терригенной эоловой взвеси, поступающей из района Сахары.

БЛАГОДАРНОСТИ

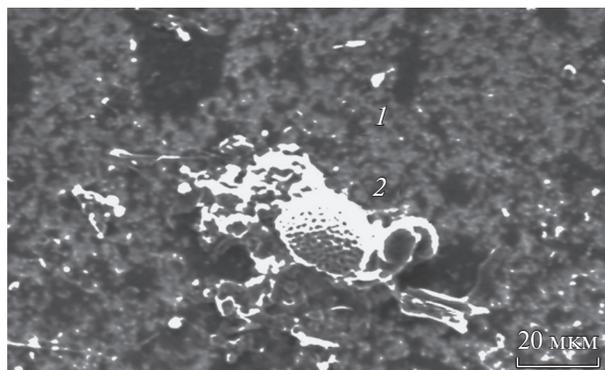
Авторы выражают благодарность: В.А. Кречик (АО ИО РАН) за выполнение гидрофизических измерений в экспедиции и члену-корреспонденту РАН, профессору С.А. Добролюбову (МГУ им. М.В. Ломоносова) за предоставление доплеровского измерителя течений, STD-зонда и карусельного пробоотборника.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Экспедиционные гидрологические и седиментологические работы, а также совместный анализ полученных данных выполнены за счет средств проекта РФФ № 19-17-00246. Гидрохимические данные были получены за счет государственного задания ИО РАН № 0128-2021-0012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *McCave I.N.* Local and Global Aspects of the Bottom Nepheloid Layers in the World Ocean // *Netherlands Journal of Sea Research*. 1986. V. 20. (2–3). P. 167–181.
2. *Gardner W.D., Richardso M.J., Mishonov A.V., et al.* Global Comparison of Benthic Nepheloid Layers



АНС44006

Рис. 4. Частицы взвешенного вещества из придонного слоя в проходе Кейн (станция АНС44006, горизонт 4638 м): 1 – частица кварца, 2 – сложный биоминеральный агрегат. Изображение получено сканирующим электронным микроскопом JSM-6390LV/Oxford INCAEnergy “JEOL”.

- Based on 52 Years of Nephelometer and Transmissometer Measurements // *Progress in Oceanography*. 2018. V. 168. P. 100–111.
3. *Rebesco M., Hernández-Molina F.J., Van Rooij D., et al.* Contourites and Associated Sediments Controlled by Deep-water Circulation Processes: State-of-the-art and Future Considerations // *Marine Geology*. 2014. V. 352. P. 111–154.
 4. *Sivkov V., Kravchishina M., Klyuvitkin A.* Abyssal Channels in the Atlantic Ocean: Water Structure and Flows // In: *Abyssal Channels in the Atlantic Ocean: Water Structure and Flows*. 2010. Springer Science & Business Media. 2010. P. 159–165.
 5. *Liu M., Tanhua T.* Water Masses in the Atlantic Ocean: Characteristics and Distributions // *Ocean Sci*. 2021. V. 17. P. 463–486.
 6. *Morozov E.G., Tarakanov R.Y., Van Haren H.* Transport of Antarctic Bottom Water through the Kane Gap, Tropical NE Atlantic Ocean // *Ocean Science*. 2013. V. 9 (5). P. 825–835.
 7. *Sivkov V.V., Bashirova L.D., Dorokhova E.V., et al.* Study of the Contourite Drift North of the Kane Gap (Eastern Equatorial Atlantic) // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2019. V. 19 (2). <https://doi.org/10.2205/2019ES000658>
 8. *Gartner J.W.* Estimating Suspended Solids Concentrations from Backscatter Intensity Measured by Acoustic Doppler Current Profiler in San Francisco Bay, California // *Marine Geology*. 2004. V. 211 (3–4). P. 169–187.
 9. *Dudkov I.Y., Sivkov V.V., Dorokhov D.V., et al.* Multi-beam Bathymetry Data from the Kane Gap and South-eastern Part of the Canary Basin (Eastern Tropical Atlantic) // *Data in brief*. 2020. V. 32. P. 106055.
 10. *Lohrmann A.* Monitoring Sediment Concentration with Acoustic Backscattering Instruments // Technical Report 03, 2001. Nortek AS, <http://www.nortekas.com/lib/technical-notes/seditments>.
 11. *Бордовский О.К., Чернякова А.М.* Современные методы гидрохимических исследований океана. М.: ИО РАН. 1992. 200 с.
 12. *Morozov E.G., Demidov A.N., Tarakanov R.Y., et al.* Abyssal Channels in the Atlantic Ocean: Water Structure and Flows. Springer Science & Business Media, 2010. 266 p.
 13. *McCave I.* Size Sorting during Transport and Deposition of Fine Sediments / In *Developments in Sedimentology*; Elsevier BV: Amsterdam, the Netherlands. 2008. V. 60. P. 121–142.
 14. *McCartney M.S., Bennett S.L., Woodgate-Jones M.E.* Eastward Flow through the Mid-Atlantic Ridge at 11 N and Its Influence on the Abyss of the Eastern Basin // *Journal of Physical Oceanography*. 1991. V. 21 (8). P. 1089–1121.
 15. *Соков А.В., Морозов Е.Г., Шановалов С.М. и др.* Структура вод в экваториальной Атлантике по данным трансатлантического разреза 2000 года // *Океанология*. 2002. Т. 42. № 1. С. 5–10.
 16. *Allredge A.L., Passow U., Logan B.E.* The Abundance and Significance of a Class of Large, Transparent Organic Particles in the Ocean // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 1993. V. 40 (6). P. 1131–1140.
 17. *Armstrong R.A., Lee C., Hedges J.I., et al.* A New, Mechanistic Model for Organic Carbon Fluxes in the Ocean Based on the Quantitative Association of POC with Ballast Minerals // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2001. V. 49 (1–3). P. 219–236.
 18. *Louis J., Pedrotti M.L., Gazeau F., et al.* Experimental Evidence of Formation of Transparent Exopolymer Particles (TEP) and POC Export Provoked by Dust Addition under Current and High p CO₂ Conditions // *PLoS one*. 2017. V. 12 (2). e0171980.
 19. *Van der Jagt H., Friese C., Stuut J.-B. W., et al.* The Lasting Effect of Saharan Dust Deposition on Aggregate Dynamics and Carbon Export: Aggregation, Settling, and Scavenging Potential of Marine Snow // *Limnology and Oceanography*. 2018. V. 63 (3). P. 1386–1394.
 20. *Sivkov V., Bubnova E.* Distribution of Suspended Particulate Matter at the Equatorial Transect in the Atlantic Ocean // *Ocean Science*. 2021. V. 17. P. 1421–1435.

REGARDING THE BOTTOM NEPHELOID LAYER IN THE KANE GAP

V. V. Sivkov^{a,b,#} and E. S. Bubnova^b

^a*Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation*

[#]*E-mail: vadim.sivkov@atlantic.ocean.ru*

Presented by Academician of the RAS L.I. Lobkovskiy November 20, 2021

The first evidence of the existence of a bottom nepheloid layer in the Kane Gap (Central East Atlantic) was obtained from acoustic backscattering data. It was located within the transformed Antarctic Bottom Water and was 150 m thick. The high velocities of bottom currents in the Gap suggest the permanence of the bottom nepheloid layer. The detailed structure of the vertical distribution of Antarctic Bottom Water tracers — oxygen and mineral silica — has been revealed. Large biomineral aggregates (~40 μm) were found in the bottom suspended matter of the Kane Gap. They form in the highly productive North African upwelling area and are rapidly deposited to the ocean bottom layer due to “ballasting” of gel-like phytoplankton products by dense mineral particles from the Sahara Desert. Surface and bottom currents carry the suspended sediment aggregates to Kane Gap.

Keywords: Kane Gap, bottom nepheloid layer, acoustic backscattering, transformed Antarctic Bottom Water, ballasting