

Изменчивость Бенгельского апвеллинга по спутниковым данным солёности

В. А. Павлушин, А. А. Кубряков

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия

E-mail: pavlushin.92@mail.ru

Исследована сезонная и межгодовая изменчивость интенсивности Бенгельского апвеллинга (БА) на основании спутниковых измерений поверхностной солёности океана. БА вызывает интенсивный подъём глубинных вод с низкой солёностью и высоким содержанием питательных веществ. Поднятые апвеллингом распреснённые воды распространяются под действием горизонтальной адвекции на запад, влияя на термохалинную структуру западной части южного Атлантического океана. Проведённый анализ показал, что максимальные значения солёности в Северном Бенгельском апвеллинге, соответствующие ослаблению апвеллинга, наблюдаются с апреля по июнь, наименьшие — в октябре–декабре с вторичным минимумом в феврале–марте. Сезонный ход солёности отличен от изменчивости температуры, так как воды апвеллинга подвержены сезонному прогреву, который, в свою очередь, маскирует усиление апвеллинга в октябре–ноябре в поле поверхностной температуры. Спутниковые измерения фиксируют значительную короткопериодную изменчивость солёности апвеллинга, которая связана с прохождением антарктических циклонов. При взаимодействии восточной периферии циклона с континентом у берега образуется зона интенсивных южных ветров, которые приводят к даунвеллингу и росту солёности на 0,5 ПЕС (практическая единица солёности). Смещение треков таких циклонов на север в определённые годы выступает одной из важных причин наблюдающейся межгодовой изменчивости солёности, в частности резкого роста солёности и уменьшения интенсивности апвеллинга в 2018 г.

Ключевые слова: Бенгельский апвеллинг, сезонная и межгодовая изменчивость, поверхностная солёность, спутниковые измерения, SMAP

Одобрена к печати: 27.09.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-261-272

Введение

Бенгельский апвеллинг (БА) располагается между 34 и 15° ю.ш. и представляется одной из наиболее протяжённых зон апвеллинга в мировом океане. БА вызывает интенсивный подъём глубинных вод с высоким содержанием питательных веществ и резкий рост биологической продуктивности. Интенсивность Бенгельского апвеллинга характеризуется значительной межгодовой изменчивостью, которая исследовалась в большом количестве работ (например (Lutz et al., 2015; Rouault et al., 2003; Vizu, Cook, 2018)). В большинстве работ, анализирующих крупнейшие апвеллинги Мирового океана, в качестве характеристики апвеллингов используются данные о поверхностной температуре, которая выступает индикатором подъёма глубинных холодных вод. Для описания временной изменчивости характеристик апвеллинга часто используется термический индекс апвеллинга (ТИА), рассчитанный по разнице температуры поверхности океана (ТПО) в зоне апвеллинга и в удалённой зоне, расположенной за пределами апвеллинга (Павлушин, Кубряков, 2022а; Полонский, Серебренников, 2019; Lamont et al., 2018).

Метод выделения апвеллинговых вод по данным поверхностной температуры имеет свои недостатки, связанные с интенсивными внешними потоками тепла, обладающими значительной сезонной изменчивостью (Hagen et al., 2001). Из-за солнечного прогрева распространяющиеся воды апвеллинга в тёплый период года быстро нагреваются, что препятствует их трассированию при удалении от берега. В холодный период этот эффект менее выражен, что приводит к неточностям при описании сезонного хода характеристик апвеллинга при использовании ТИА.

Глубинные воды, поднимающиеся в результате апвеллинга, имеют также отличную от окружающих вод солёность. В тропической Атлантике солёность уменьшается с глубиной, поэтому в результате действия апвеллинга солёность в верхнем слое снижается (Павлушин, Кубряков, 2022б; Ren et al., 2014). Солёность менее подвержена воздействию атмосферы, чем поверхностная температура, и является более консервативным трассером для изучения интенсивности и ареалов апвеллинга. Поднятые Бенгальским апвеллингом опреснённые воды распространяются на тысячи километров на запад под действием горизонтальной адвекции, влияя на потоки соли в южной части Атлантического океана (Backeberg et al., 2012). Изменение интенсивности апвеллинга влияет на количество и скорость переноса глубинных вод и, как следствие, на приток соли в Южную Атлантику.

С появлением спутниковых измерений солёности возникла возможность регулярно определять изменчивость халинных характеристик поверхностного слоя океана. В частности, ряд авторов демонстрировал возможности использования этих данных для исследования вертикального вовлечения вод низкой солёности на поверхность в результате ветрового перемешивания и апвеллингов (Grodsky et al., 2012, 2014; Reul et al., 2021), особенно экваториальных (см. обзор в публикации (Reul et al., 2020)). В то же время работ, посвящённых исследованию межгодовой изменчивости восточных апвеллингов по спутниковым измерениям солёности, ранее практически не проводилось.

В настоящее время наибольшим разрешением для исследования изменчивости поверхностной солёности характеризуется спутник SMAP (*англ.* Soil Moisture Active Passive), запущенный в 2015 г. В данной работе впервые на основе измерений SMAP исследуется синоптическая, сезонная и межгодовая изменчивость солёности БА за 2016–2021 гг. Эти данные продемонстрировали наличие резкой изменчивости солёности апвеллинга, причины которой анализируются в настоящей работе. Также исследуется короткопериодная изменчивость солёности, вызываемая прохождением через зону апвеллинга антарктических циклонов.

Используемые данные

Для исследования Бенгельского апвеллинга был выбран регион с координатами 40–18° ю.ш. и 5–20° в.д. Использовались данные о поверхностной солёности, полученные по измерениям прибора SMAP (V.4.0) за 2015–2019 гг. из архива REMSS. Пространственное разрешение данных — 0,25°, временная дискретность — 8 дней.

Для описания температуры в работе используется массив температуры поверхности океана (*англ.* sea surface temperature — SST) (Reynolds et al., 2007), основанный на измерениях радиометров AVHRR (*англ.* Advanced Very High Resolution Radiometer) и AMSR (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer). Данные получены из бесплатного архива спутниковых данных LAADS Web (*англ.* Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System) (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) и имеют пространственное разрешение 0,25° и временную дискретность 1 день.

Для описания изменчивости скорости ветра используется оперативный продукт NCEP (*англ.* National Centers for Environmental Prediction, Национальный центр прогнозирования состояния окружающей среды США) High Resolution Global Forecast System с пространственным разрешением 1×1° (Yang, 2006). Данные NCEP основаны на расчётах модели WRF-NMM (*англ.* Weather Research and Forecasting Non-hydrostatic Mesoscale Model). Данные были получены на сайте <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>.

Результаты

Средняя и сезонная изменчивость солёности в Бенгельском апвеллинге

На среднем распределении солёности по измерениям SMAP (*рис. 1а*, см. с. 263) отчётливо выделяется зона апвеллинга, в которой солёность понижена на 0,5–1 ПЕС относительно

окружающей среды. Для сравнения на *рис. 1б* представлена средняя карта температуры, на которой хорошо видна зона апвеллинга, где температура относительно мористой части ниже на 4–6 °С. Бенгельский апвеллинг можно разделить на две широкие области холодных вод с границей в районе 28° ю. ш. (Hagen et al., 2001): Северный и Южный Бенгельский апвеллинг (СБА и ЮБА). В то же время хорошо видны значимые в распределении аномалии солёности и температуры, особенно в СБА. Область пониженных значений солёности распространяется гораздо дальше на запад, до долготы 10°, по сравнению с областью холодных вод (пунктирная линия на *рис. 1а*). Такая разница связана с интенсивными потоками тепла из атмосферы, которые быстро нагревают холодные воды.

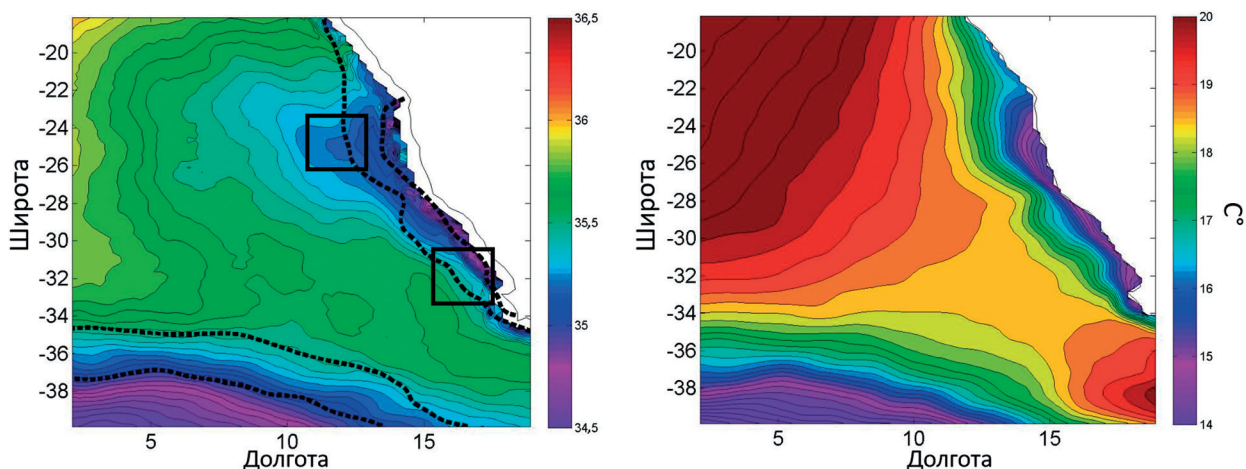


Рис. 1. Пространственное распределение средней солёности (*слева*) и температуры (*справа*) по данным спутниковых измерений в исследуемой области. Пунктирной линией обозначена область холодных вод по данным солёности. Двумя квадратами показаны зоны исследования сезонной изменчивости в СБА и ЮБА

Анализ сезонной изменчивости солёности и термического индекса в районе апвеллинга наглядно демонстрирует эти различия. Максимальные значения солёности в СБА наблюдаются с апреля по июнь (порядка 35,3 ПЕС), а наименьшие — в октябре–декабре (около 34,8 ПЕС) (*рис. 2*).

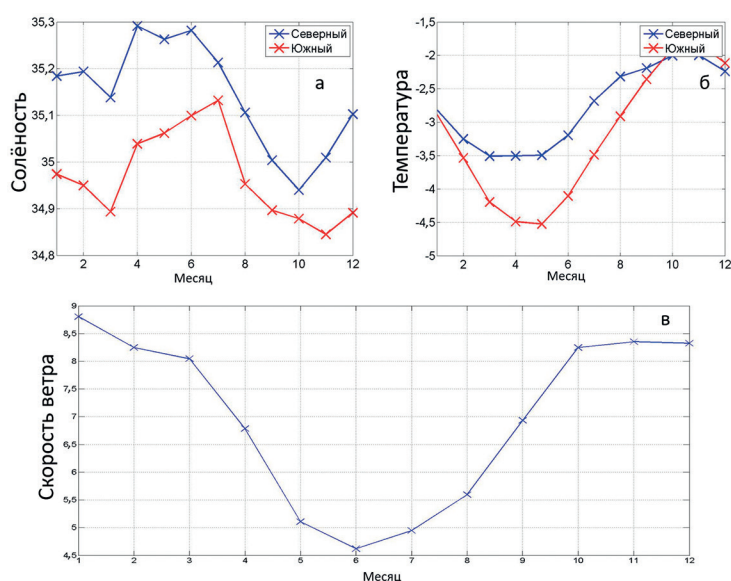


Рис. 2. Сезонная изменчивость солёности (*а*) и термический индекс (*б*) в северной и южной части Бенгельского апвеллинга и сезонная изменчивость скорости ветра (*в*)

Также наблюдается второй минимум солёности в феврале–марте (34,9). Отставание сезонного хода ЮБА относительно СБА составляет порядка 1 мес с максимумом солёности в июле и минимумом в ноябре. Второй минимум солёности в марте также наблюдается в ЮБА, где он более выражен, чем в СБА (см. *рис. 2а*). Сезонная изменчивость скорости ветра (см. *рис. 2в*) в значительной степени коррелирует с изменчивостью солёности. Минимум интенсивности ветра приходится на май–июль, что совпадает с ростом солёности, т. е. с ослаблением интенсивности апвеллинга. Высокие меридиональные скорости ветра отмечаются в зимний период, с октября по март, что совпадает с периодами снижения солёности.

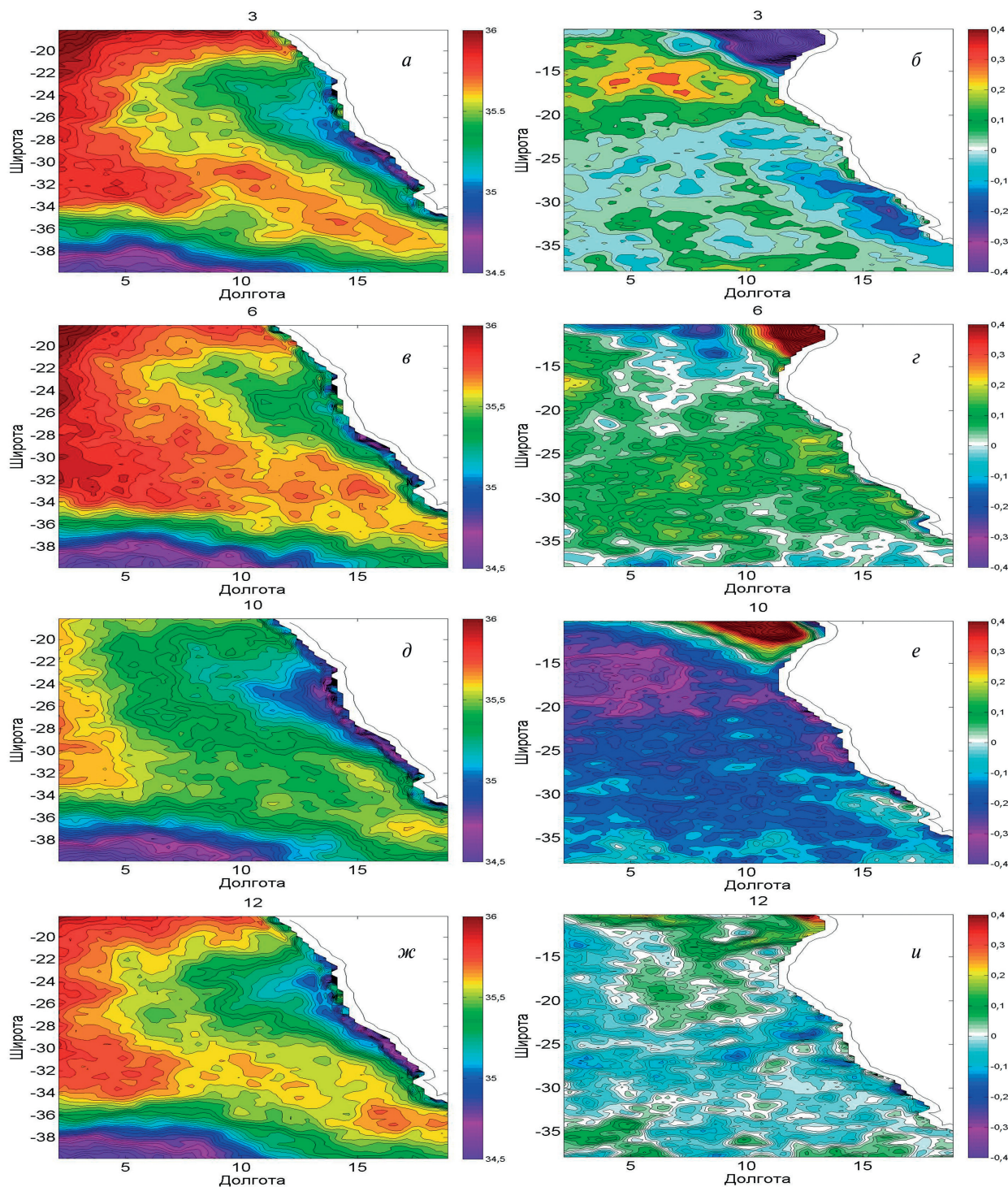


Рис. 3. Карты средней солёности и аномалии за март (*а*), июнь (*в*), октябрь (*д*) и декабрь (*ж*), а также их аномалии (*б, г, е, и*)

На *рис. 3* (см. с. 264) представлены среднемесячные карты солёности за разные месяцы, а также их аномалии. Так, например, март (см. *рис. 3б*) соответствует второму минимуму солёности, когда наиболее сильные отрицательные аномалии солёности наблюдаются в районе ЮБА. В то же время в СБА апвеллинг менее интенсивен. В июне (см. *рис. 3г*) отмечаются положительные аномалии на всей протяжённости апвеллинга, что свидетельствует об ослаблении его интенсивности. На октябрь (см. *рис. 3е*) приходится пик отрицательных аномалий и, как следствие, наибольшая интенсивность апвеллинга, особенно в районе СБА. В конце года, в ноябре (см. *рис. 3и*), апвеллинг ослабевает. Подобная изменчивость связана в первую очередь с годовым ходом ветра, а также с влиянием на зону апвеллинга пограничных течений (см. *рис. 2в*).

Сезонный ход солёности отличен от изменчивости температуры, так как воды апвеллинга подвержены сезонному прогреву, который, в свою очередь, маскирует усиление апвеллинга в октябре–ноябре в поле поверхностной температуры (*рис. 4*). На графике термического индекса (см. *рис. 2б*) фиксируется только один минимум температуры — в марте–мае, а наиболее интенсивный минимум в осенний период отсутствует. В период прогрева температура вод открытого океана значительно растёт и термический индекс увеличивается. В результате наибольшая разница между ТПО в районе апвеллинга наблюдается в период прогрева (март–май).

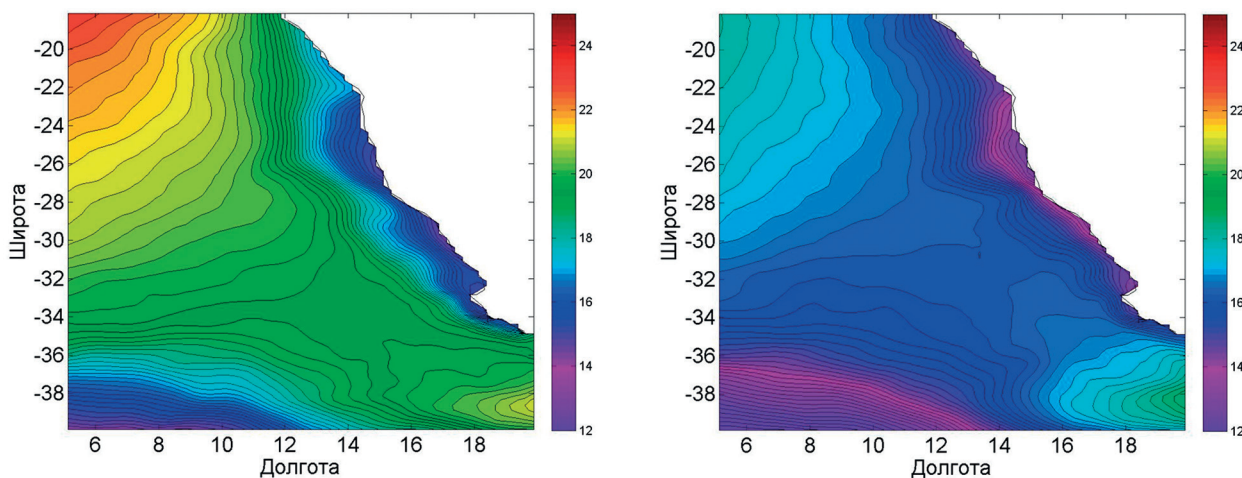


Рис. 4. Карта средней температуры за апрель (слева) и октябрь (справа)

Для примера на *рис. 4* приведены карты температуры за апрель и октябрь. По данным солёности интенсивный апвеллинг наблюдается как в апреле, так и в октябре (см. *рис. 3*). Однако на картах температуры апвеллинг осенью намного слабее. Это связано с тем, что в апреле Центральная Атлантика прогрета сильнее, чем в октябре, и разница значений температуры растёт. Таким образом, анализ термических индексов (аномалии температуры) может приводить к ошибкам в оценке изменчивости апвеллинга на сезонных масштабах и использование солёности как индикатора апвеллинга обеспечивает большую точность (Павлушин, Кубряков, 2022б). В период осенне-зимнего перемешивания величины термического индекса, определяемые как разница между температурой апвеллинга и температурой открытого моря, значительно снижаются. Эффекты недооценки интенсивности апвеллинга в осенние месяцы могут также оказывать значимое влияние на оценки межгодовой изменчивости по термическому индексу, который наиболее часто используют в литературе для этих целей (Hardman-Mountford et al., 2003; Lamont et al., 2018; Strub et al., 1998; Vizu, Cook, 2018).

Рисунок 5 демонстрирует пространственные различия в изменчивости солёности и температуры на разрезе 26° ю. ш. за октябрь, когда апвеллинг был наиболее интенсивен по данным спутниковой солёности. На этих картах хорошо видно, что солёность меняется более плавно и снижение её градиента отмечается на $9\text{--}10^\circ$ в. д. В то же время температура меняется до-

вольно резко у берега, а на долготе 11–12° её градиенты достаточно сильно снижаются. Это связано с тем, что поднятые холодные воды подвергаются температурному прогреву, который маскирует дальнейшее распространение вод апвеллинга. Наряду с этим солёность является более консервативным трассером, позволяющим отследить движение апвеллинговых вод на большие расстояния.

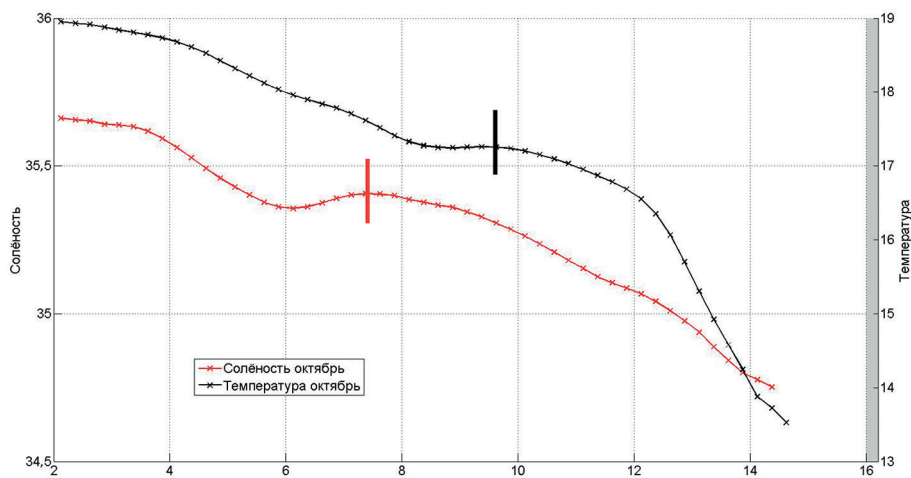


Рис. 5. Изменчивость температуры на разрезе 26° ю. ш. за октябрь. Вертикальными линиями обозначены места резкого изменения градиента

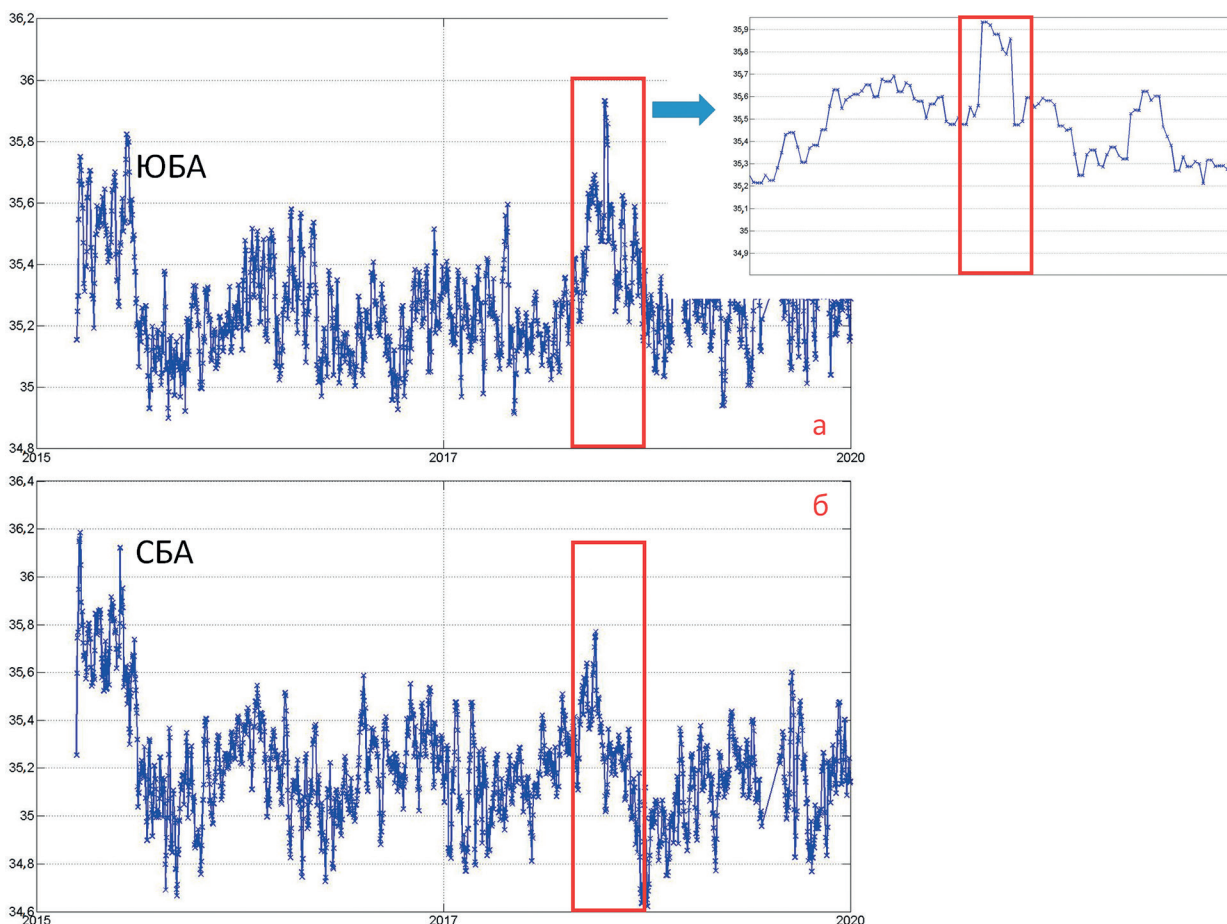


Рис. 6. Высоочастотная изменчивость солёности в районе ЮБА и СБА. Красным прямоугольником выделен период резкого повышения солёности (ослабления апвеллинга)

Высоочастотная и межгодовая изменчивость солёности Бенгельского апвеллинга и её связь с ветром

Спутниковые измерения фиксируют выраженную короткопериодную изменчивость средней поверхностной солёности в районе БА (рис. 6, см. с. 266). На рис. 6 приведён пример резкого увеличения и последующего падения солёности в июне – августе 2018 г. (выделено красным прямоугольником). Солёность резко выросла на 0,5 ПЕС: от 35,4 до 35,9 ПЕС.

Анализ ветровых данных показал, что такой резкий рост солёности был вызван проходящим через исследуемую область циклоном. Во время этого события сильный западный ветер подавлял развитие апвеллинга, в результате чего на картах солёности (см. рис. 9) апвеллинг был слабо виден. Рассмотрим на конкретном примере два этих явления (рис. 7). В середине июня 2018 г. на широтах 30–60° проходил мощный атмосферный циклон со скоростью до 20 м/с. При взаимодействии восточной периферии циклона с континентом у берега образовалась зона интенсивных южных ветров, которые привели к даунвеллингу у берега Африки. В результате воды солёностью менее 35 ПЕС, характерные для апвеллинга, практически исчезли с поверхности моря. В рассмотренном случае во всей зоне БА солёность выросла на 0,7–1 ПЕС: до 35,7–36 ПЕС. Так как циклоны приходят с юга, данное явление более развито в ЮБА, где средняя солёность резко выросла на 0,5 ПЕС (см. рис. 7). Остаточные языки опреснённых вод наблюдались только у берега и к востоку от СБА, где солёность была несколько ниже (35,2 ПЕС), чем в центральной Атлантике (35,5 ПЕС).

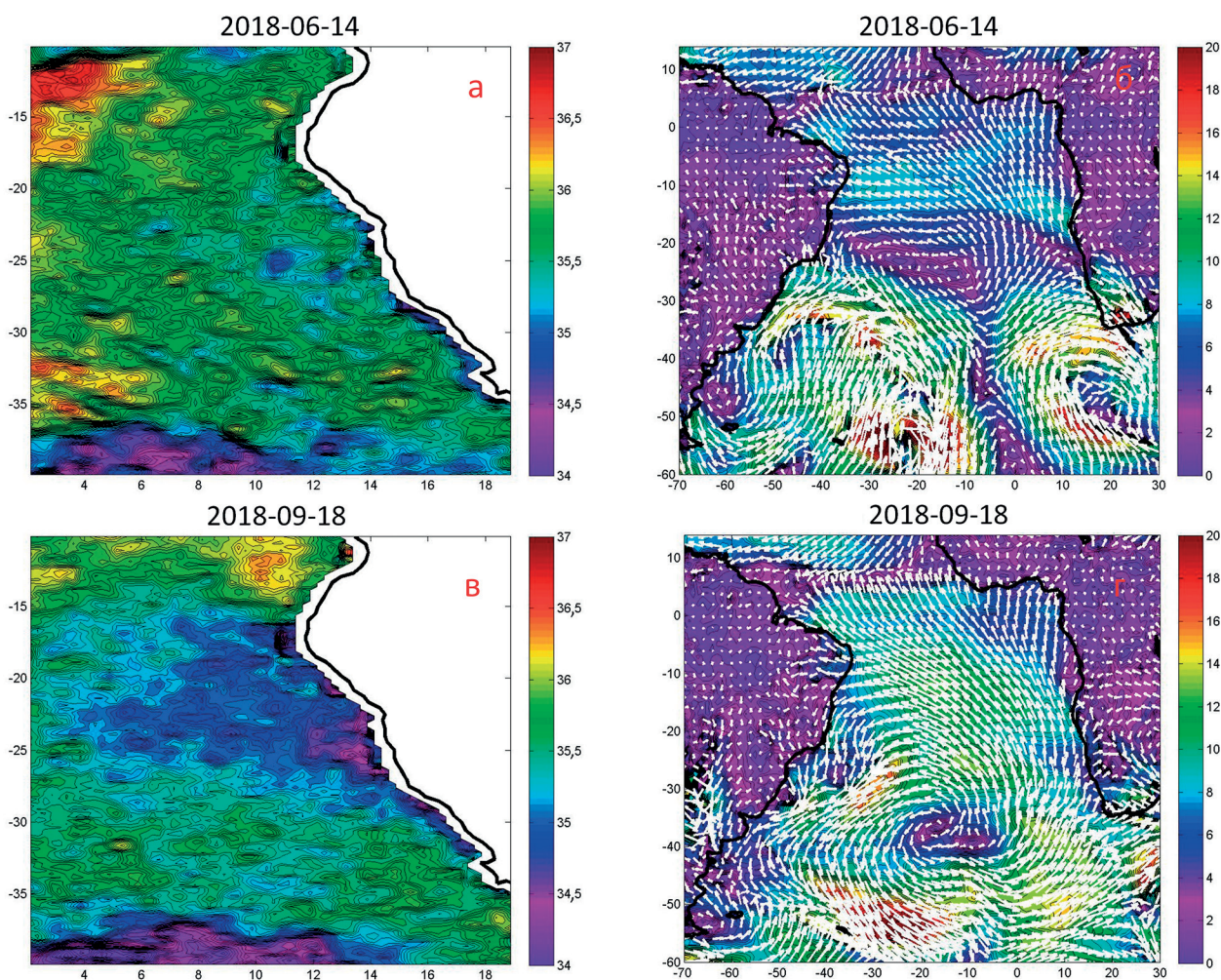


Рис. 7. Карты солёности и поля ветра 14 июня 2018 г. (а, б) и 18 сентября 2018 г. (в, г)

Спустя три месяца, в сентябре 2018 г., через исследуемую зону проходил уже синоптический антициклон (см. *рис. 7*). Он, в свою очередь, вызывал усиление северных ветров у берега Африки и способствовал интенсивному развитию апвеллинга. В результате солёность уменьшилась примерно на 1 ПЕС. Время отклика между прохождением циклона и резким ослаблением (усилением) апвеллинга, как правило, небольшое и не превышает 1 сут.

Эти события могут значительно влиять и на межгодовую изменчивость интенсивности БА. На *рис. 8* представлен график среднегодовой изменчивости солёности в районе апвеллинга. Хорошо заметно ослабление апвеллинга в 2018 г. Это также можно видеть на примерах карт среднегодовых аномалий за 2016 и 2018 гг. (*рис. 9*, см. с. 269). В 2016 г. аномалии в районе апвеллинга были преимущественно отрицательными, в то время как в 2018 г. — положительными.

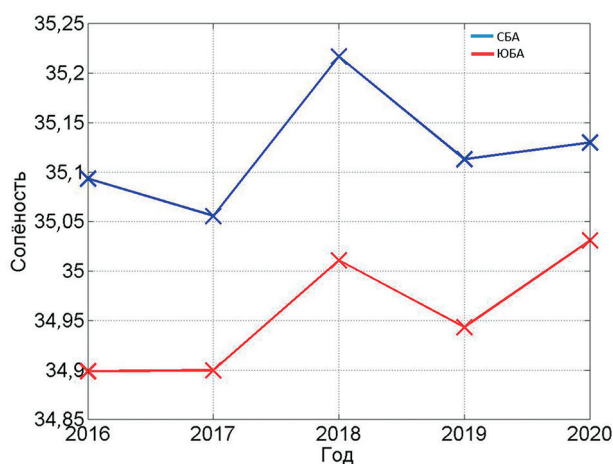


Рис. 8. Среднегодовая солёность в районе Северного и Южного Бенгельского апвеллинга

Направление и сила ветра оказывают значительное влияние на интенсивность Бенгельского апвеллинга (Tim, 2015). В 2016 г. аномалии скорости ветра в районе апвеллинга были близки к 0, а значение солёности — к средним за 5-летний период. Аномалии скорости ветра в 2018 г. в районе апвеллинга были направлены на юг, что способствовало подавлению апвеллинга. При этом аномалии скорости ветра имеют вид циклона радиусом около 100 км. Такие аномалии были вызваны прохождением одного мощного антарктического циклона, который подробнее показан на *рис. 7*. Хорошо видно, что аномалии солёности в БА повторяют вид аномалий скорости ветра. Наибольшие положительные аномалии наблюдаются в СБА и совпадают с положением аномалий скорости ветра, направленных на восток, в сторону берега. В ЮБА аномалии солёности ниже, но тоже хорошо видны. При этом зона положительных аномалий солёности также имеет полукруглую форму, совпадающую с аномалиями скорости ветра.

Таким образом, антарктические циклоны и антициклоны в значительной степени влияют на короткопериодную изменчивость интенсивности Бенгельского апвеллинга. В частности, особое влияние оказывает то, насколько далеко эти циклоны и антициклоны продвигаются на север. Смещение синоптических циклонов на север в определённые годы приводит к значительному росту солёности апвеллинга, отражающему ослабление интенсивности БА. Регулярные спутниковые измерения полей ветра позволяют отслеживать эти изменения.

Выводы

В настоящей работе на основе использования массива данных поверхностной солёности проведён анализ сезонной и межгодовой изменчивости характеристик Бенгельского апвеллинга. Анализ показал, что максимальные значения солёности в СБА, соответствующие ослаблению апвеллинга, наблюдаются с апреля по июнь (порядка 35,3 ПЕС).

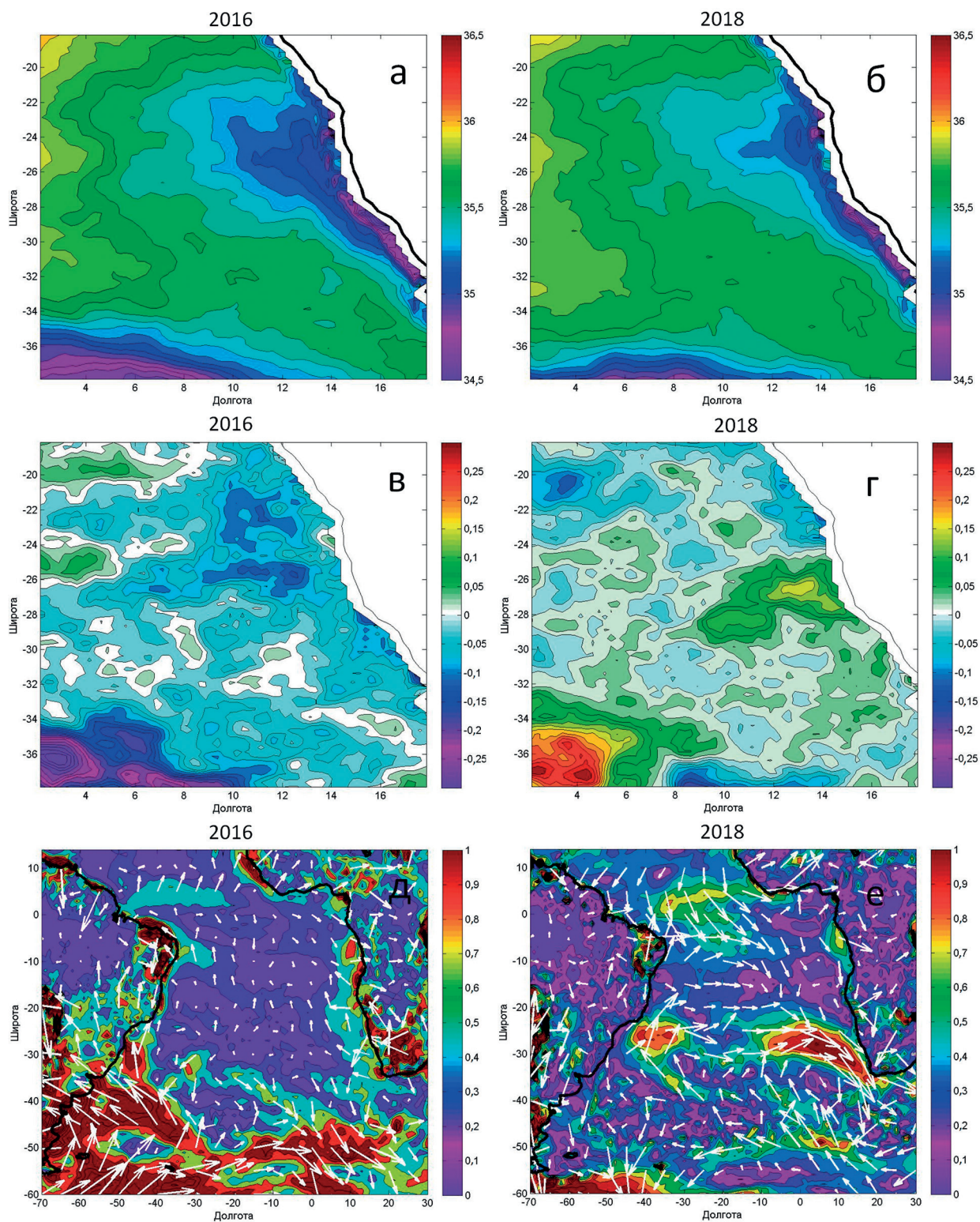


Рис. 9. Средние карты солёности (а, б), аномалии солёности (в, г) и среднее поле ветра (д, е) за 2016 и 2018 гг.

Наиболее резкое уменьшение солёности, вызванное подъёмом глубинных вод, отмечается в октябре – декабре (около 34,8 ПЕС). В этот период воды с низкой солёностью в районе СБА достигают 10° в.д. Также наблюдается второй минимум солёности в феврале – марте (34,9 ПЕС). Отставание сезонного хода солёности ЮБА относительно СБА составляет порядка 1 мес с максимумом солёности в июле и минимумом в ноябре. Второй минимум солёности

также наблюдается в ЮБА, однако здесь отсутствует отставание от сезонного хода. Такая изменчивость согласуется с данными о скорости ветра, но не согласуется с изменчивостью термического индекса, где фиксируется только один минимум температуры — в марте — мае, а наиболее интенсивный минимум в осенний период отсутствует. Это связано с влиянием сезонного прогрева, который вызывает резкое увеличение разницы температуры между апвеллингом и водами Атлантики в тёплый период года и снижение в период осенне-зимнего перемешивания. По данным о спутниковой солёности ширина апвеллинга также больше, чем по данным о температуре. Это связано с тем, что сильный прогрев в районе тропиков вызывает быстрый рост температуры поднятых холодных вод, в то время как солёность представляется более консервативным трассером.

Спутниковые измерения фиксируют значительную короткопериодную изменчивость солёности апвеллинга. Анализ ветровых данных показывает, что резкий рост солёности в районе Бенгельского апвеллинга вызван прохождением антарктических циклонов, которые вызывают даунвеллинг у берегов Арктики. Смещение треков таких циклонов на север в определённые годы становится одной из важных причин наблюдающейся межгодовой изменчивости солёности, в частности резкого роста солёности и уменьшения интенсивности апвеллинга в 2018 г.

Работа выполнена в рамках госзадания FNNN-2021-0006.

Литература

1. Павлушин В. А., Кубряков А. А. (2022а) Изменчивость площади и формы Бенгельского апвеллинга в 1985–2017 гг. и ее связь с динамическими характеристиками по спутниковым измерениям // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 2. С. 38–51. DOI: 10.31857/S0205961422020075.
2. Павлушин В. А., Кубряков А. А. (2022б) Сезонная и межгодовая изменчивость термохалинной структуры Бенгельского апвеллинга по данным буев «Арго» // Морской гидрофиз. журн. 2022. Т. 38. № 1(223). С. 18–33. DOI: 10.22449/0233-7584-2022-1-18-33.
3. Полонский А. Б., Серебренников А. Н. Об изменении температуры поверхности океана в зоне Бенгельского апвеллинга. Часть 1: сезонный цикл // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 3. С. 33–44. DOI: 10.31857/S0205-96142019333-44.
4. Backeberg B. C., Penven P., Rouault M. Impact of intensified Indian Ocean winds on mesoscale variability in the Agulhas system // Nature Climate Change. 2012. V. 2. No. 8. P. 608–612. DOI: 10.1038/nclimate1587.
5. Grodsky S. A., Reul N., Lagerloef G. et al. Haline hurricane wake in the Amazon/Orinoco plume: AQUARIUS/SACD and SMOS observations // Geophysical Research Letters. 2012. V. 39. No. 20. Article L20603. 8 p. DOI: 10.1029/2012GL053335.
6. Grodsky S. A., Carton J. A., Bentamy A. Salty anomalies forced by Tehuantepec and Papagayo gap winds: Aquarius observations // Remote Sensing Letters. 2014. V. 5(6). P. 568–574. DOI: 10.1080/2150704X.2014.935522.
7. Hagen E., Feistel R., Agenbag J. J., Ohde T. Seasonal and interannual changes in intense Benguela upwelling (1982–1999) // Oceanologica Acta. 2001. V. 24. No. 6. P. 557–568. DOI: 10.1016/S0399-1784(01)01173-2.
8. Hardman-Mountford N. J., Richardson A. J., Agenbag J. J. et al. Ocean climate of the South East Atlantic observed from satellite data and wind models // Progress in Oceanography. 2003. V. 59. No. 2–3. P. 181–221. DOI: 10.1016/j.pocean.2003.10.001.
9. Lamont T., García-Reyes M., Bograd S. J. et al. Upwelling indices for comparative ecosystem studies: Variability in the Benguela Upwelling System // J. Marine Systems. 2018. V. 188. P. 3–16. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2017.05.007.
10. Lutz K., Jacobeit J., Rathmann J. Atlantic warm and cold water events and impact on African west coast precipitation // Intern. J. Climatology. 2015. V. 35. No. 1. P. 128–141. DOI: 10.1002/joc.3969.
11. Ren L., Hackert E., Arkin P., Busalacchi A. J. Estimating the global oceanic net freshwater flux from Argo and comparing it with satellite-based freshwater flux products // J. Geophysical Research: Oceans. 2014. V. 119. No. 11. P. 7869–7881. DOI: 10.1002/2013JC009620.
12. Reul N., Grodsky S. A., Arias M. et al. Sea surface salinity estimates from spaceborne L-band radiometers: An overview of the first decade of observation (2010–2019) // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 242. Article 111769. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111769.
13. Reul N., Chapron B., Grodsky S. A. et al. Satellite observations of the sea surface salinity response to tropical cyclones // Geophysical Research Letters. 2021. V. 48. No. 1. Article e2020GL091478. DOI: 10.1029/2020GL091478.

14. Rouault M., Florenchie P., Fauchereau N., Reason C.J. South East tropical Atlantic warm events and southern African rainfall // *Geophysical Research Letters*. 2003. V. 30. No. 5. Article 8009. DOI: 10.1029/2002GL014840.
15. Strub P. T., Shillington F.A., James C., Weeks S.J. Satellite comparison of the seasonal circulation in the Benguela and California current systems // *African J. Marine Science*. 1998. V. 19. P. 99–112. DOI: 10.2989/025776198784126836.
16. Tim N., Zorita E., Hünnicke B. Decadal variability and trends of the Benguela upwelling system as simulated in a high-resolution ocean simulation // *Ocean Science*. 2015. V. 11. No. 3. P. 483–502. DOI: 10.5194/os-11-483-2015.
17. Vizy E. K., Cook K. H. Mesoscale convective systems and nocturnal rainfall over the West African Sahel: role of the Inter-tropical front // *Climate Dynamics*. 2018. V. 50. No. 1–2. P. 587–614. DOI: 10.1007/s00382-017-3628-7.
18. Yang J. The seasonal variability of the Arctic Ocean Ekman transport and its role in the mixed layer heat and salt fluxes // *J. Climate*. 2006. V. 19. No. 20. P. 5366–5387. DOI: 10.1175/JCLI3892.1.

Variability of the Benguela upwelling according to satellite salinity data

V. A. Pavlushin, A. A. Kubryakov

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia
E-mail: pavlushin.92@mail.ru

Seasonal and interannual variability of the intensity of the Benguela upwelling is studied on the basis of satellite measurements of surface salinity of the ocean. Benguela upwelling causes intense rise of deep waters with low salinity and high nutrient content. The desalinated waters raised by the upwelling spread under the influence of horizontal advection to the west, affecting the thermohaline structure of the western part of the South Atlantic Ocean. The analysis showed that the maximum salinity values in the northern Benguela upwelling, corresponding to the weakening of upwelling, are observed from April to June, the lowest in October–December with a secondary minimum in February–March. The seasonal course of salinity is different from the variability of temperature, because upwelling waters are subject to seasonal warming, which in turn masks an increase in upwelling in October–November in the field of surface temperature. Satellite measurements record a significant short-period variability of upwelling salinity, which is associated with the passage of Antarctic cyclones. When the eastern periphery of the cyclone interacts with the continent, a zone of intense southerly winds forms near the coast, which lead to downwelling and an increase in salinity by 0.5 PSU. The displacement of the tracks of such cyclones to the north in certain years is one of the important reasons for the observed interannual variability of salinity, in particular, a sharp increase in salinity and a decrease in the intensity of upwelling in 2018.

Keywords: Benguela upwelling, seasonal and interannual variability, surface salinity, satellite measurements, SMAP

Accepted: 27.09.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-261-272

References

1. Pavlushin V.A., Kubryakov A.A. (2022a), Variability of the Area and Shape of the Benguela Upwelling in 1985–2017 and Its Relation with Dynamic Characteristics from Satellite Measurements, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2022, No. 58, pp. 1037–1048, DOI: 10.1134/S000143382209016X.
2. Pavlushin V.A., Kubryakov A.A. (2022b), Seasonal and Interannual Variability of the Thermohaline Structure of the Bengel Upwelling Based on the Argo Buoys Data, *Physical Oceanography*, 2022, Vol. 29, No. 1, pp. 15–29, DOI: 10.22449/1573-160X-2022-1-15-29.

3. Polonsky A. B., Serebrennikov A. N., On the Change in the Ocean Surface Temperature in the Benguela Upwelling Region. Part I: Season Cycle, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, No. 55, pp. 1150–1159, DOI: 10.1134/S0001433819090391.
4. Backeberg B. C., Penven P., Rouault M., Impact of intensified Indian Ocean winds on mesoscale variability in the Agulhas system, *Nature Climate Change*, 2012, Vol. 2, No. 8, pp. 608–612, DOI: 10.1038/nclimate1587.
5. Grodsky S. A., Reul N., Lagerloef G. et al., Haline hurricane wake in the Amazon/Orinoco plume: AQUARIUS/SACD and SMOS observations, *Geophysical Research Letters*, 2012, Vol. 39, No. 20, Article L20603, 8 p., DOI: 10.1029/2012GL053335.
6. Grodsky S. A., Carton J. A., Bentamy A., Salty anomalies forced by Tehuantepec and Papagayo gap winds: Aquarius observations, *Remote Sensing Letters*, 2014, Vol. 5, No. 6, pp. 568–574, DOI: 10.1080/2150704X.2014.935522.
7. Hagen E., Feistel R., Agenbag J. J., Ohde T., Seasonal and interannual changes in intense Benguela upwelling (1982–1999), *Oceanologica Acta*, 2001, Vol. 24, No. 6, pp. 557–568, DOI: 10.1016/S0399-1784(01)01173-2.
8. Hardman-Mountford N. J., Richardson A. J., Agenbag J. J. et al., Ocean climate of the South East Atlantic observed from satellite data and wind models, *Progress in Oceanography*, 2003, Vol. 59, No. 2–3, pp. 181–221, DOI: 10.1016/j.pocean.2003.10.001.
9. Lamont T., García-Reyes M., Bograd S. J. et al., Upwelling indices for comparative ecosystem studies: Variability in the Benguela Upwelling System, *J. Marine Systems*, 2018, Vol. 188, pp. 3–16, DOI: 10.1016/j.jmarsys.2017.05.007.
10. Lutz K., Jacobeit J., Rathmann J., Atlantic warm and cold water events and impact on African west coast precipitation, *Intern. J. Climatology*, 2015, Vol. 35, No. 1, pp. 128–141, DOI: 10.1002/joc.3969.
11. Ren L., Hackert E., Arkin P., Busalacchi A. J., Estimating the global oceanic net freshwater flux from Argo and comparing it with satellite-based freshwater flux products, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2014, Vol. 119, No. 11, pp. 7869–7881, DOI: 10.1002/2013JC009620.
12. Reul N., Grodsky S. A., Arias M. et al., Sea surface salinity estimates from spaceborne L-band radiometers: An overview of the first decade of observation (2010–2019), *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 242, Article 111769, DOI: 10.1016/j.rse.2020.111769.
13. Reul N., Chapron B., Grodsky S. A. et al., Satellite observations of the sea surface salinity response to tropical cyclones, *Geophysical Research Letters*, 2021, Vol. 48, No. 1, Article e2020GL091478, DOI: 10.1029/2020GL091478.
14. Rouault M., Florenchie P., Fauchereau N., Reason C. J., South East tropical Atlantic warm events and southern African rainfall, *Geophysical Research Letters*, 2003, Vol. 30, No. 5, Article 8009, DOI: 10.1029/2002GL014840.
15. Strub P. T., Shillington F. A., James C., Weeks S. J., Satellite comparison of the seasonal circulation in the Benguela and California current systems, *African J. Marine Science*, 1998, Vol. 19, pp. 99–112, DOI: 10.2989/025776198784126836.
16. Tim N., Zorita E., Hünicke B., Decadal variability and trends of the Benguela upwelling system as simulated in a high-resolution ocean simulation, *Ocean Science*, 2015, Vol. 11, No. 3, pp. 483–502, DOI: 10.5194/os-11-483-2015.
17. Vizy E. K., Cook K. H., Mesoscale convective systems and nocturnal rainfall over the West African Sahel: role of the Inter-tropical front, *Climate Dynamics*, 2018, Vol. 50, No. 1–2, pp. 587–614, DOI: 10.1007/s00382-017-3628-7.
18. Yang J., The seasonal variability of the Arctic Ocean Ekman transport and its role in the mixed layer heat and salt fluxes, *J. Climate*, 2006, Vol. 19, No. 20, pp. 5366–5387, DOI: 10.1175/JCLI3892.1.