

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ СТОКОВОЙ ФРОНТАЛЬНОЙ ЗОНЫ

Н. П. Булгаков, В. А. Скрипальева,
Р. А. Ярошина
Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

Распресняющее влияние крупных рек известно уже давно. Несмотря на значительное число районов, где наблюдается подобное явление, и на интересные физические, геохимические, биологические последствия взаимодействия речных и морских вод, в частности, явление "мертвой воды" (анормально высокое сопротивление движению судна за счет внутренних волн, возникающих на границе пресных и соленых вод), детальные физические условия в областях интенсивного речного стока в океаны и моря до сих пор очень плохо изучены. Многообразие гидрологических режимов в данных районах, определяемое соотношением расхода реки, формой и размерами устья, интенсивностью приливного перемешивания, глубиной и протяженностью шельфа, не позволяет построить универсальную теорию данного явления и описать все его стороны, включая фронты.

Известно, что стоковые фронты в океане возникают в тех случаях, когда речные воды, не успев перемешаться с морскими в устье реки, образуют на поверхности океана сравнительно тонкий слой ("линзу") пресных или существенно распресненных вод. Резкие соленостные фронты ограничивают такую линзу вдоль внешней, обращенной к океану, стороны, а под нею образуется резкий вертикальный скачок плотности, подавляющий перемешивание. Соленостные фронты и линзы распресненных вод могут встречаться за сотни километров от берега.

В имеющихся работах, посвященных речному стоку [1-5], говорится о наличии стоковых соленостных фронтов, но

даже не упоминается о таком явлении, как стоковая фронтальная зона, которая может проявляться в различных термохалинных полях и имеет сложную структуру.

Под фронтальной зоной, согласно определению К.Н. Федорова [6], понимается достаточно протяженная область в океане, в которой горизонтальные градиенты термохалинных характеристик резко обострены по сравнению с их среднеклиматическим распределением на одном и том же горизонте и той же широте.

Для определения структуры фронтальной зоны требуется установить ее физико-гидрологические характеристики, а именно: географическое положение, протяженность, ширину на поверхности и любом характерном горизонте, толщину или мощность фронтального слоя, глубину залегания нижней и верхней границ зоны, значения максимальных горизонтальных градиентов термохалинных характеристик внутри зоны и глубину, на которой они наблюдаются.

В данной работе была выделена стоковая фронтальная зона р.Амазонки и определена ее пространственная структура. Это удалось сделать с помощью климатического массива данных температуры и солености [7], приведенных к центрам одноградусных квадратов, путем выявления областей обостренных градиентов термохалинных характеристик, с использованием условного формального критерия γ , предложенного К.Н. Федоровым. Этот критерий представляет собой отношение абсолютного значения горизонтального градиента к его среднеклиматическому значению на одном и том же горизонте.

Методика выделения фронтальных зон в полях термохалинных характеристик подробно изложена в работах [8-12].

Расчет проводился для района Тропической Атлантики, границы которого проходят по экватору и 20° с.ш., а также по 60° з.д. и 12° в.д. Весь район исследования для каждого из 24 горизонтов (от

поверхности до 1500 м) был разбит на 1350 одноградусных квадратов. Плотность рассчитывалась по соотношению Кнудсена [13].

На основе данного массива, от поверхности до 200 м для каждого сезона и от 250 м до 1500 м для среднегодовых полей, вычислялись меридиональные, зональные и максимальные градиенты температуры, солености и плотности, их среднеклиматические значения, а также величины условного критерия γ . Под фронтальной зоной понималась область, в которой $\gamma \geq 10$.

В результате исследования получено, что стоковая фронтальная зона р. Амазонки (СФЗА) наблюдается только в полях солености и плотности в весенний и летний сезоны.

Рассмотрим основные особенности ее пространственной структуры.

Поле солености. Весной СФЗА располагается вдоль береговой линии от устья до $11-12^\circ$ с.ш. Глубина залегания составляет 0–20 м. Протяженность изменяется от 1200 до 1300 м, а ширина от 110 до 550 м в зависимости от направления. Мощность фронтального слоя составляет 10–20 м. Наибольшее обострение градиентов ($\gamma = 41$) наблюдается в меридиональном направлении на поверхности. Максимальное значение градиента составляет $13,69 \cdot 10^{-7} \% \cdot \text{см}^{-1}$ и наблюдается на поверхности в направлении наибольшего роста градиента.

Летом, в отличие от весны, СФЗА принимает форму незамкнутого вихря в районе $8-14^\circ$ с.ш. Глубина залегания составляет 0–30 м по меридиану и в направлении наибольшего роста градиента и 0–20 м по широте. Протяженность уменьшается до 1000 м, ширина – до 110–330 км. Мощность фронтального слоя увеличивается до 30 м. Наибольшее обострение градиентов ($\gamma = 21$) отмечается на поверхности в зональном направлении. Максимальное значение градиента уменьшается до $4,44 \cdot 10^{-7}$

$\% \cdot \text{см}^{-1}$ (зональное направление, поверхность).

Поле плотности. Весной положение СФЗА совпадает с положением зоны в поле солености. Глубина залегания – 0–20 м по меридиану и широте и 0–10 м в направлении наибольшего роста градиента. Протяженность изменяется от 1100 до 1200 м, а ширина – от 110 до 440 м в зависимости от направления. Толщина фронтального слоя составляет 10–20 м. Наибольшее обострение градиентов ($\gamma = 58$) отмечается на поверхности в зональном направлении. Максимальное значение градиента составляет $6,96 \cdot 10^{-7} \text{ г} \cdot \text{см}^{-4}$ (зональное направление, поверхность).

Летом положение и форма СФЗА не изменяются по сравнению с полем солености. Глубина залегания составляет 0–30 м по меридиану, 0–20 м по широте и 0–10 м в направлении наибольшего роста градиента. Протяженность и ширина уменьшаются до 660–880 м и 110–220 м соответственно. Мощность фронтального слоя составляет 10–30 м в зависимости от направления. Наибольшее обострение градиентов ($\gamma = 19$) отмечается на глубине 10 м в направлении наибольшего роста градиента. Максимальное значение градиента составляет $1,33 \cdot 10^{-7} \text{ г} \cdot \text{см}^{-4}$ (глубина 10 м, направление наибольшего роста градиента).

Установлено, что положение и форма СФЗА не изменяются с глубиной, а другие физико-гидрологические характеристики претерпевают некоторые изменения. Протяженность и ширина в полях солености и плотности весной на глубине 10 м уменьшаются в 1,5–3 раза в зависимости от направления. Летом протяженность на горизонте 10 м возрастает, а ширина остается неизменной. Степень обостренности градиентов весной наибольшая на поверхности ($\gamma = 41$ в поле солености и $\gamma = 58$ в поле плотности), а на глубине 10 м наблюдается ее резкое понижение – $\gamma = 29$ в поле солености и $\gamma = 17$ в поле плотности. Ле-

том в поле солености степень обострения градиентов с глубиной также уменьшается от $\gamma = 21$ до $\gamma = 19$. В поле плотности наблюдается рост обострения градиентов на глубине – от $\gamma = 15$ на поверхности до $\gamma = 19$ на горизонте 10 м.

Таким образом, определены следующие основные особенности проявления стоковой фронтальной зоны:

1. Стоковая фронтальная зона р. Амазонки – это достаточно протяженная область перемешанных амазонских и океанских вод, имеющая квазистационарное положение в верхнем 30-метровом слое с резко обостренными горизонтальными градиентами термохалинных характеристик, проявляющаяся только в полях солености и плотности весной и летом, т. е. имеющая ярко выраженный сезонный характер.

2. СФЗА проявляется весной вдоль берега от устья до $11-12^\circ$ с.ш., а летом принимает форму незамкнутого вихря в районе $8-14^\circ$ с.ш.

3. Форма и положение СФЗА с глубиной и в зависимости от выбранного направления не изменяются, изменяясь только от сезона к сезону, а остальные физико-гидрологические характеристики подвержены пространственной и сезонной изменчивости.

4. СФЗА наиболее резко выражена весной в полях солености и плотности на поверхности, а летом в поле солености на поверхности и в поле плотности на глубине 10 м..

5. Значения максимальных градиентов СФЗА весной превышают летние в поле солености в 3 раза, а в поле плотности – в 9 раз.

6. СФЗА практически полностью размывается, а градиенты сглаживаются на глубинах, превышающих 20 м весной и 30 м летом.

7. Соотношение средней толщины (20 м) области распресненных вод и ее средней ширины (200 км) соответствует известной для крупных рек консервативной величине 10^{-4} .

Помимо стоковой фронтальной зоны р. Амазонки в районе исследования была выделена крупномасштабная климатическая фронтальная зона, получившая название в соответствии с ее географическим положением – северо-западная тропическая фронтальная зона (СЗТФЗ) и проявляющаяся в каждом из термохалинных полей.

Рассмотрим основные особенности ее пространственной структуры.

Поле температуры. Зимой СЗТФЗ наблюдается в северо-западной части Тропической Атлантики в районе $0-19^\circ$ с.ш. Глубина залегания составляет 50-200 м в меридиональном направлении и 75-200 м в зональном и в направлении наибольшего роста градиента. Протяженность изменяется от 600 до 2000 км в зависимости от направления. Ширина – 110-1200 км. Мощность фронтального слоя – 125-150 м. Наибольшее обострение градиентов ($\gamma = 13$) отмечено в слое 75-100 м в направлении наибольшего роста градиента. Максимальное значение градиента составляет $8,40 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ \text{C} \cdot \text{см}^{-1}$ (слой 125-150 м, направление наибольшего роста градиента).

Весной СЗТФЗ прослеживается в районе $0-16^\circ$ с.ш. Глубина залегания – 75-200 м. Протяженность – 1800 км. Ширина уменьшается до 110-990 км. Толщина фронтального слоя – 125 м. Наибольшее обострение градиентов ($\gamma = 17$) отмечено на глубине 200 м в зональном направлении. Максимальное значение градиента – $10,56 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ \text{C} \cdot \text{см}^{-1}$ (слой 75-125 м, направление наибольшего роста градиента).

Летом СЗТФЗ проявляется в том же районе, что и весной. Глубина залегания – 100-200 м в меридиональном направлении, 75-200 м в зональном и 100-150 м в направлении наибольшего роста градиента. Протяженность уменьшается до 500-1700 км в зависимости от направления. Ширина также уменьшается до 110-550 км. Мощность фронтального слоя – 50-125 м. Наибольшее обострение градиентов ($\gamma = 16$) отмечено на

глубинах 100-200 м в меридиональном направлении. Максимальное значение градиента — $9,29 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ \text{C} \cdot \text{см}^{-1}$ (слой 75-200 м, зональное направление).

Осенью СЗТФЗ прослеживается от экватора до 18° с.ш. Глубина залегания — 75-200 м. Протяженность увеличивается до 2000 км. Ширина составляет 110-1100 км. Мощность фронтального слоя — 125 м. Наибольшее обострение градиентов ($\gamma = 17$) отмечено на глубинах 100-200 м в меридиональном направлении. Максимальное значение градиента — $7,52 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ \text{C} \cdot \text{см}^{-1}$ (слой 100-200 м, меридиональное направление).

Поле солености. Зимой СЗТФЗ проявляется в районе $0-16^\circ$ с.ш. в меридиональном и зональном направлениях и $7-13^\circ$ с.ш. в направлении наибольшего роста градиента. Глубина залегания составляет 50-200 м по меридиану и широте и 125-150 м в направлении наибольшего роста градиента. Протяженность — 660-1700 км в зависимости от направления. Ширина — 110-770 км. Наибольшее обострение градиентов ($\gamma = 17$) наблюдается на глубине 150 м в зональном направлении. Максимальное значение градиента — $1,01 \cdot 10^{-7} \text{ } \text{‰} \cdot \text{см}^{-1}$ (слой 125-150 м, зональное направление).

Весной, в отличие от зимы, СЗТФЗ смещается к западу и прослеживается в районе $11-13^\circ$ с.ш. в меридиональном направлении, $0-13^\circ$ с.ш. в зональном и $9-15^\circ$ с.ш. в направлении наибольшего роста градиента. Глубина залегания — 75-200 м по меридиану и в направлении наибольшего роста градиента и 125-200 м по широте. Протяженность уменьшается до 300-1400 км, ширина — до 110-550 км в зависимости от направления. Мощность фронтального слоя — 75-125 м. Наибольшее обострение градиентов ($\gamma = 20$) отмечено в слое 75-200 м в направлении наибольшего роста градиента. Максимальное значение градиента — $1,60 \cdot 10^{-7} \text{ } \text{‰} \cdot \text{см}^{-1}$ (слой 75-

200 м, направление наибольшего роста градиента).

Летом СЗТФЗ прослеживается в районе $15-17^\circ$ с.ш. на глубинах 75-150 м в меридиональном направлении, от экватора до 9° с.ш. в слое 100-200 м в зональном направлении и в районе $6-16^\circ$ с.ш. на глубине 75 м в направлении наибольшего роста градиента. Протяженность изменяется от 440 до 1200 км в зависимости от направления. Ширина — 110-330 км. Мощность фронтального слоя — 75-100 м. Наибольшее обострение градиентов ($\gamma = 16$) наблюдается на глубине 75 м в направлении наибольшего роста градиента. Максимальное значение градиента — $0,95 \cdot 10^{-7} \text{ } \text{‰} \cdot \text{см}^{-1}$ (слой 100-125 м, зональное направление).

Осенью СЗТФЗ прослеживается в районе $13-16^\circ$ с.ш. в меридиональном направлении, от экватора до 15° с.ш. в зональном направлении и в районе $12-17^\circ$ с.ш. в направлении наибольшего роста градиента. Глубина залегания — 75-200 м. Протяженность изменяется от 550 до 1600 км, ширина — от 110 до 550 км в зависимости от направления. Мощность фронтального слоя — 125 м. Наибольшее обострение градиентов ($\gamma = 14$) наблюдается в слое 75-200 м в меридиональном направлении. Максимальное значение градиента составляет $1,44 \cdot 10^{-7} \text{ } \text{‰} \cdot \text{см}^{-1}$ (слой 100-200 м, направление наибольшего роста градиента).

Поле плотности. Зимой СЗТФЗ прослеживается в районе $0-18^\circ$ с.ш. на глубинах 50-200 м по меридиану и широте и 50-150 м в направлении наибольшего роста градиента. Протяженность составляет 1400-2200 км в зависимости от направления. Ширина изменяется от 110 до 2000 км. Мощность фронтального слоя — 100-150 м. Наибольшее обострение градиентов ($\gamma = 33$) наблюдается в слое 125-150 м в направлении наибольшего роста градиента. Максимальное значение градиента — $1,14 \cdot 10^{-7} \text{ } \text{г} \cdot \text{см}^{-4}$

(слой 125-150 м, направление наибольшего роста градиента).

Весной СЗТФЗ наблюдается в районе 0-19° с.ш. на глубинах 50-200 м по меридиану, от экватора до 10° с.ш. в слое 75-200 м по широте и в районе 0-15° с.ш. в слое 100-200 м в направлении наибольшего роста градиента. Протяженность изменяется от 1100 до 2400 км в зависимости от направления. Ширина составляет 110-2000 км. Мощность фронтального слоя — 100-150 м. Наибольшее обострение градиентов ($\gamma = 38$) отмечается в слое 100-150 м в направлении наибольшего роста градиента. Максимальное значение градиента — $2,85 \cdot 10^{-7} \text{ г} \cdot \text{см}^{-4}$ (глубина 150 м, меридиональное направление).

Летом СЗТФЗ прослеживается от экватора до 15° с.ш. по меридиану, до 12° с.ш. по широте и до 19° с.ш. в направлении наибольшего роста градиента. Глубина залегания составляет 50-200 м в меридиональном направлении и 75-200 м в двух других направлениях. Протяженность — 1300-2400 км, ширина — 110-2000 км. Наибольшее обострение градиентов ($\gamma = 47$) отмечается в слое 100-150 м в направлении наибольшего роста градиента. Максимальное значение градиента составляет $2,35 \cdot 10^{-7} \text{ г} \cdot \text{см}^{-4}$ (слой 100-150 м, направление наибольшего роста градиента).

Осенью СЗТФЗ проявляется в районе 7-16° с.ш. в слое 50-200 м в меридиональном направлении, от экватора до 16° с.ш. в слое 100-200 м в зональном и направлении наибольшего роста градиента. Протяженность изменяется от 990 до 1600 км. Ширина составляет 110-1200 км. Мощность фронтального слоя — 100-150 м. Наибольшее обострение градиентов ($\gamma = 48$) отмечается в слое 100-150 м в зональном направлении. Максимальное значение градиента составляет $1,65 \cdot 10^{-7} \text{ г} \cdot \text{см}^{-4}$ (слой 100-150 м, направление наибольшего роста градиента).

Таким образом, выявлены следующие основные особенности проявления климатической фронтальной зоны северо-западной части Тропической Атлантики:

1. Образование сложной формы, значительное по протяженности, ширине и мощности охватываемого слоя.
2. Проявляется в каждом из термохалинных полей во все сезоны в слое 50-200 м.
3. Среднее положение в полях термохалинных характеристик в основном квазистационарно.
4. Физико-гидрологические характеристики зоны (протяженность, ширина, мощность фронтального слоя, максимальное значение горизонтального градиента) подвержены сезонным изменениям.
5. Среднемноголетнее сезонное положение фронтальной зоны изменяется с глубиной и в зависимости от выбранного направления (меридионального, зонального, наибольшего роста градиента).
6. Наиболее резкое обострение градиентов термохалинных характеристик отмечается в слое 100-200 м.

Проведенный выше анализ позволил установить ряд существенных различий в пространственной структуре стоковой фронтальной зоны (СФЗА) и климатической фронтальной зоны открытого океана (СЗТФЗ):

1. СФЗА прослеживается только в полях солености и плотности в весенний и летний сезоны, т.е. носит ярко выраженный сезонный характер. СЗТФЗ наблюдается в каждом из термохалинных полей в течение всего года.
2. СФЗА выявляется в верхнем 30-метровом слое, в то время как СЗТФЗ отмечается на глубинах 50-200 м.
3. Форма и положение СЗФА не изменяются в зависимости от выбранного направления и глубины, а среднемноголетнее сезонное положение СЗТФЗ меняется как по глубине, так и по направлению.

4. Максимальные значения горизонтальных градиентов солености и плотности внутри СФЗА на порядок выше значений градиентов термохалинных характеристик СЗТФЗ.

5. СФЗА наиболее резко выражена в слое 0-10 м, тогда как наибольшее обострение градиентов СЗТФЗ наблюдается на глубинах 100-200 м.

Полученные результаты могут быть использованы при математическом моделировании динамических процессов в океане.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ryther J.H., Meuzel D.W., Corwen N. Influence of Amazon River outflow on the ecology of the western tropical Atlantic (1) // J.Mar.Res. - 1967. - 25, №1. - P. 69-83.
2. Amos A.F., Langseth M., Mared R. Visible oceanic saline fronts // J.Phys. Oceanogr. - 1972. - 1, - P. 49-62.
3. Gade H.G. On some oceanographic observation in the southeastern Caribbean Sea and the adjacent Atlantic Ocean with special reference to the influence of the Orinoco River // Bul. Inst. Oceanogr. - Curanana, Venezuela. - 1961. - 1, №2. - P. 287-342.
4. Garvine R. W. Observations of the motion field of the Connecticut River plume // J.Geophys.Res. - 1977. - 82, №3. - P. 441-454.
5. Ichiye T. On the hydrography near Mississippi Delta // Oceanogr.Mag. - 1960. - 11, №2. - P. 65-78.
6. Федоров К.Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. - Л.: Гидрометеониздат, 1983. - 269 с.
7. Levitus S., Oort A.H. Global analysis of oceanographic data // Bul. Amer. Met. Soc. - 1977. - 58, №12. - P.1170-1184.
8. Воскресенская Л.А., Скрипалева Е.А., Ярошеня Р.А. Крупномасштабные неоднородности поля температуры Тропической Атлантики // Морской гидрофизический журнал. - 1995. - №2. - с.43-53.
9. Воскресенская Л.А., Скрипалева Е.А., Ярошеня Р.А. Крупномасштабные неоднородности поля плотности Тропической Атлантики // Морской гидрофизический журнал. - 1995. - №5. - с.66-72.
10. Воскресенская Л.А., Скрипалева Е.А., Ярошеня Р.А. Крупномасштабные неоднородности поля солености Тропической Атлантики // Морской гидрофизический журнал. - 1996. - №1. - с.23-34.
11. Воскресенская Л.А., Скрипалева Е.А., Ярошеня Р.А. Крупномасштабные неоднородности поля температуры Тропической Атлантики // Морской гидрофизический журнал. - 1995. - №2. - с.43-53.
12. Булгаков Н.П., Ярошеня Р.А., Скрипалева Е.А. и др. Термохалинные характеристики крупномасштабных неоднородностей и фронтальных зон Тропической Атлантики // Морской гидрофизический журнал. - 1998. - №1. - с.26-37.
13. Булгаков Н.П., Ярошеня Р.А., Скрипалева Е.А. и др. Физико-гидрологические характеристики климатических фронтальных зон Тропической Атлантики // Морской гидрофизический журнал. - 1998. - №4. - с.39-56.
14. Зубов Н.Н. Океанологические таблицы. - Л.: Гидрометеониздат, 1957. - 405 с.