



УДК 551.465

М. Н. Голенко

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АПВЕЛЛИНГА В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКЕ

Исследовались особенности апвеллинга в Юго-Восточной Балтике путем сравнения данных натурных наблюдений и результатов численного моделирования. Рассмотрен апвеллинг, зарегистрированный в октябре 2005 г., когда после спокойной погоды наступил шторм продолжительностью около трех суток, вызванный северо-восточным ветром. Шторм вызвал понижение температуры на 4°C в полосе шириной 8 км в области с глубинами 25 м, отстоящей от берега на расстоянии 8 км. Возникшие в результате шторма изменения термохалинной структуры были промоделированы с помощью Принстонской модели океана (POM). Моделирование показало, что особенности пространственной структуры апвеллинга зависят от географического положения места наблюдения апвеллинга, скорости и продолжительности ветра, вызывающего апвеллинг. Была найдена зависимость сценария апвеллинга от числа Фруда.

35

The article examines some features of the upwelling observed in the South-East Baltic in October 2005 which were investigated by means of comparison of the field measurement data and numerical simulated data. The article explores the upwelling which took place after calm weather when thermohaline fields had parameters close to summer ones. Upwelling was produced by North-East wind with speed of about 15 m/s and duration of about 3 days. After the gale the along-shore belt of respectively cold water of width 8 km and placed apart the shore at 8 km had been formed in an area with depth of 25 m. The temperature in the upwelling core had dropped by 4 C. Changes in thermohaline structure due to the gale were simulated by 3D numerical model, based on the Princeton Ocean Model (POM). By means of numerical simulation it was confirmed that features of upwelling space structure depend upon bottom topography in an area of observation, strength of wind velocity and its duration. The dependence of the upwelling scenario on the Froude number was obtained.

Ключевые слова: пространственная структура апвеллинга, моделирование, факторы.

Введение

Сезонную изменчивость полей температуры и солености связывают, как правило, с вертикальными турбулентными потоками тепла и импульса. С началом весеннего прогрева в Балтике формируется термоклин, который препятствует турбулентному обмену теплом и импульсом между



верхним слоем и лежащими под термоклином водами. В результате воды, находящиеся между термоклином и халоклином, на протяжении всего теплого сезона остаются холодными. Известно, что при апвеллингах происходит выход холодных вод на поверхность. С возникновением техники спутниковых измерений температуры занятые апвеллинговыми водами области могут быть обозначены на панорамных снимках. Однако для исследования самого процесса апвеллинга и его пространственной структуры необходимы данные не только по поверхности, но и по всей водной толще. Так как апвеллинг возникает лишь в отдельные промежутки времени, то получение данных о его структуре связано с определенными трудностями. Чтобы восполнить недостаток данных, явление апвеллинга исследуется методами численного моделирования [2; 3; 5].

В настоящей работе анализируются уникальные экспериментальные данные по пространственной структуре апвеллинга, наблюдавшегося в Юго-Восточной Балтике, и данные численного моделирования. Работа посвящена исследованию пространственной структуры апвеллинга и влиянию на нее особенностей рельефа дна и интенсивности ветра. Анализ проводился на основе экспериментальных данных, полученных в октябре 2005 г. во время мониторинговой экспедиции на НИС «Профессор Штокман» по программе ЛУКОЙЛа, а также методами численного моделирования.

Описание данных экспериментальных измерений

В работе анализировались экспериментальные данные на вертикальном разрезе, проходящем вдоль российско-литовской границы. На рисунке 1 этот разрез обозначен буквой L.

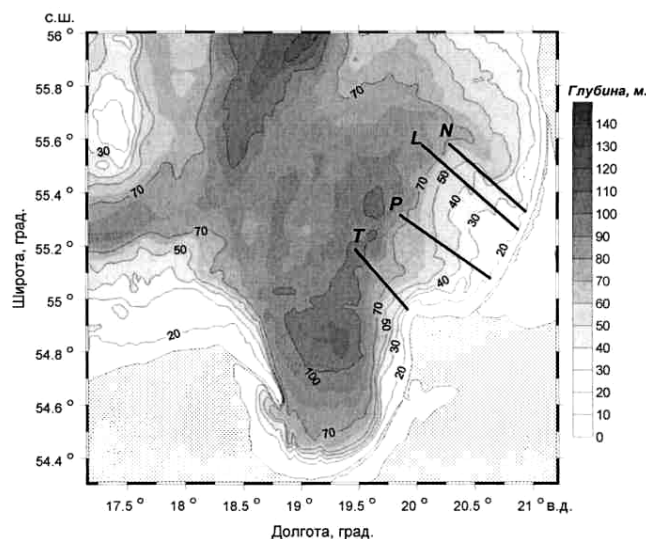


Рис. 1. Батиметрическая карта Юго-Восточной части Балтийского моря. Линиями N, L, P и T нанесены разрезы, на которых анализировались данные моделирования. Положение экспериментального разреза совпадает с положением линии L



Измерения проводились сканирующим прецизионным STD-зондом Mark 3. Зонд сканировался от поверхности до дна при скорости буксировки около 5 узлов ($\sim 2,6$ м/с). Точность по каналам давления, температуры и солёности была не хуже 0,2 м, 0,01 °С, 0,01 практических единиц солёности соответственно. Разрешение по вертикали было около 0,5 м. По горизонтали разрешение менялось от нескольких десятков метров в мелководной части моря до 400–600 м на глубинах 50–80 м.

Анализируемые данные были получены 17 октября 2005 г. Измерения проводились в течение примерно 12 ч в конце шторма, во время которого скорость северо-восточного ветра достигала 15 м/с. Шторму предшествовал длительный интервал спокойной погоды, во время которого термохалинная структура в море практически сохраняла летние особенности стратификации.

На рисунке 2 приведены данные температуры и солёности, полученные на высоко разрешенном разрезе L (рис. 1). Проведенные измерения показывают, что зона наиболее холодных вод простиралась на поверхности на 5 км, а в придонном слое – более чем на 12 км. Полоса холодной воды находилась примерно в 8 км от берега на участке моря с глубиной около 25 м. Температура в этой области, которую естественно называть ядром апвеллинга, понизилась на 4,5 °С.

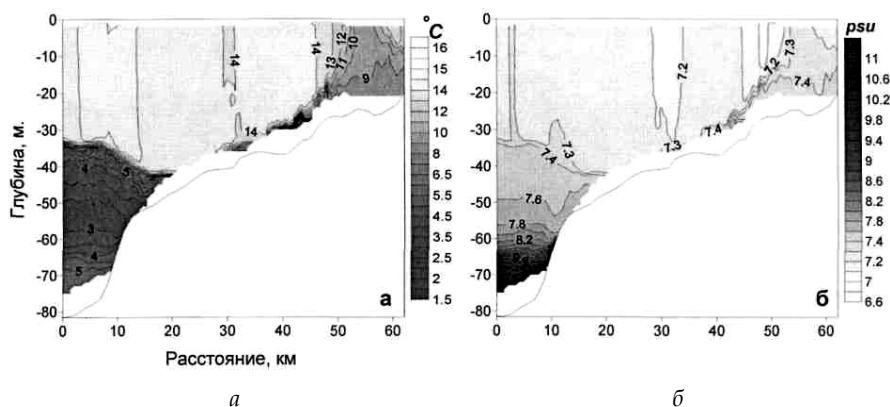


Рис. 2. Экспериментальные поля температуры 1 (разрез а) и солёности S (разрез б), полученные в 74-м рейсе НИС «Профессор Штокман» 17 октября 2005 г. на разрезе, обозначенном на рисунке 1 линией L, из открытой части моря в сторону берега

Апвеллинг, в результате которого возникла наблюдавшаяся структура, можно считать в значительной степени развившимся, поскольку изотермы в интервале от 10 до 14 °С, находившиеся ранее в термоклине, вышли на поверхность. Значительные изменения испытала изотерма 9 °С. Другие изотермы, в том числе и изотермы в термоклине, во время апвеллинга подверглись деформации, выразившейся в выклинивании термоклина в зоне глубин 36–42 м. Заглубление термоклина в области склона на глубинах 45–50 м сопровождалось противofазным подъемом изолиний температуры и солёности в халоклине.



Описание модели, начальных и граничных условий

За основу была взята трехмерная численная гидродинамическая модель Принстонского университета POM (Princeton Ocean Model) [4]. Отметим, что эта модель неоднократно использовалась для описания событий апвеллинга в Балтике [3; 5].

Начальное поле плотности в численных экспериментах было взято из натуральных данных по термохалинной структуре, которая исследовалась в 74-м рейсе НИС «Профессор Штокман», полученных до начала шторма, после которого наблюдался апвеллинг. Начальные стратификации полей температуры и солености были взяты однородными по горизонтали. Моделирование начиналось из состояния покоя (начальное поле скоростей — нулевое) при невозмущенной свободной поверхности. В качестве граничного условия на дне был задан реальный рельеф. С боков были заданы граничные условия открытого типа (условия излучения [1, с. 102]). В качестве возмущающей силы задавался ветер, полученный при судовых измерениях и скорректированный по данным измерений на берегу. Пространственное разрешение в горизонтальной плоскости составляло около 1 км по долготе и широте. По вертикали было задано 36 слоев. Область моделирования представлена на рисунке 1.

38

Результаты моделирования явления апвеллинга в октябре 2005 г.

Термохалинная ситуация, наблюдавшаяся в октябре 2005 г., моделировалась на основе численной модели POM. На рисунке 3 представлена серия разрезов по температуре и солености, построенных по данным моделирования.

На разрезах, полученных по данным моделирования (рис. 3, б), видно, что наиболее холодные воды выходят на поверхность в районе изобаты 25 м. Область их выхода на поверхность имеет ширину около 5–8 км и прерывается в прибрежной области. Ядро апвеллинга по данным моделирования отмечается практически в том же самом месте, где оно реально находилось по данным измерений 17 октября 2005 г. (рис. 2). Абсолютные значения температуры в ядре апвеллинга практически совпали с реально наблюдаемыми величинами. Структура поля температуры на вертикальном разрезе, воспроизведенная при численном моделировании, сходна со структурой, реально наблюдавшейся в природе (рис. 2, а и 3, б). Сходство в поле солености данных наблюдений и моделирования менее выражено.

Полного выклинивания термоклина в области глубин 36–42 м, как это отмечалось на экспериментальном разрезе, к моменту формирования ядра не произошло, хотя тенденция такого выклинивания отмечается. На модельных данных, как и в действительности, отмечается заглубление термоклина в области склона на глубинах 45–50 м, которое сопровождалось противofазным подъемом изолиний температуры и солености в халоклине.

В целом можно заключить, что основные параметры и структурные особенности апвеллинга были весьма удовлетворительно воспроизведены при численном моделировании.

Представляется важным понять, является ли формирование ядра апвеллинга на заметном расстоянии от берега в области изобаты 25 м локальным явлением, присущим месту проведения измерений, либо эта особенность распространена и в других местах.

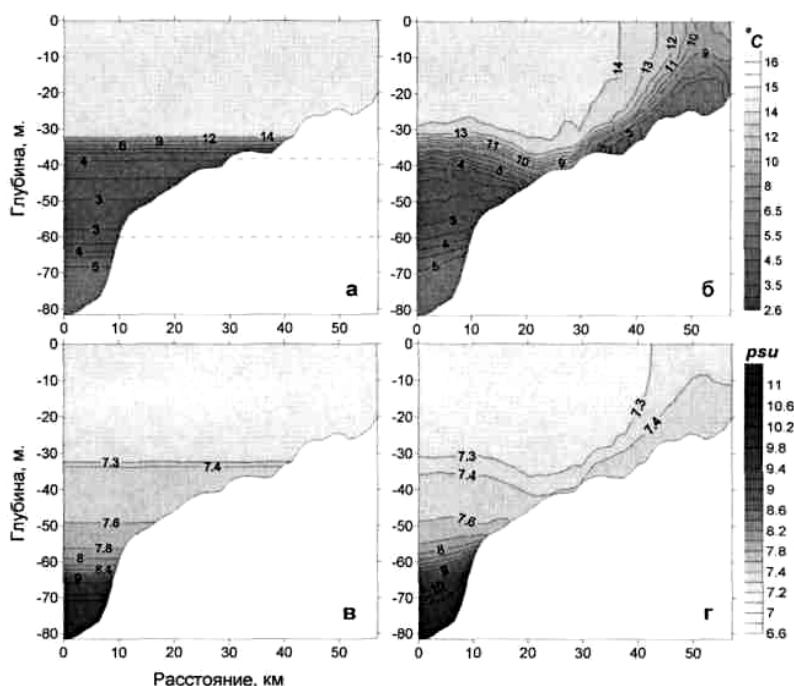


Рис. 3. Серия разрезов, построенных по данным моделирования. Разрезы соответствуют: *a* – полю температуры в начальный момент времени, *б* – полю температуры спустя 2 суток, 16 часов модельного времени, *в* – полю солёности в начальный момент времени, *г* – полю солёности спустя 2 суток, 16 часов модельного времени, северо-восточному ветру 15 м/с и потоку тепла 100 Вт/м от моря в атмосферу. Именно такие метеоусловия наблюдались во время рассматриваемого события апвеллинга в октябре 2005 г.

Для этого при тех же самых потоках тепла и импульса на основе той же самой модели были воспроизведены термохалинные поля на серии разрезов, расположенных в различных местах. Один из таких гипотетических разрезов расположен северо-восточнее основного разреза и обозначен N, другой (обозначенный P) лежит северо-западнее основного, третий (Г) отходит от мыса Таран. Положение этих разрезов приведено на рисунке 1. На рисунке 4 представлены результаты моделирования на упомянутых разрезах. Видно, что ни на одном из разрезов не отмечается ядро апвеллинга, отделенное от берега более теплыми водами. Интересно, что на промежуточном разрезе P апвеллинг слабо выражен. В районе у мыса Таран, для которого характерно резкое заглубление дна, температурный контраст на поверхности моря составил менее 2°C – на 2°C меньше, чем на основном разрезе L и соседнем с ним разрезе N. Одна из основных особенностей апвеллинга у мыса Таран состоит в том, что наибольшее охлаждение происходит непосредственно у берега, а также отмечается значительный подъем – почти на 40 м – вод промежуточного слоя.

Для того чтобы уточнить динамику вод в период апвеллинга, была построена карта области, включающая анализируемый разрез, на которую были наложены векторы скорости и распределение температуры в придонной области (рис. 5).

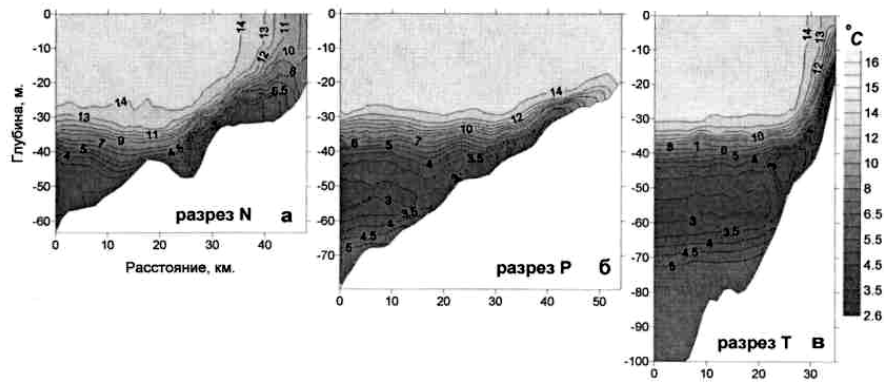


Рис. 4. Температурные разрезы, построенные по данным моделирования по прошествии 2 дней 16 часов при задании северо-восточного ветра 15 м/с и потока тепла 100 Вт/м от моря в атмосферу. Разрезы соответствуют: а – местоположению N, б – местоположению P, в – местоположению T

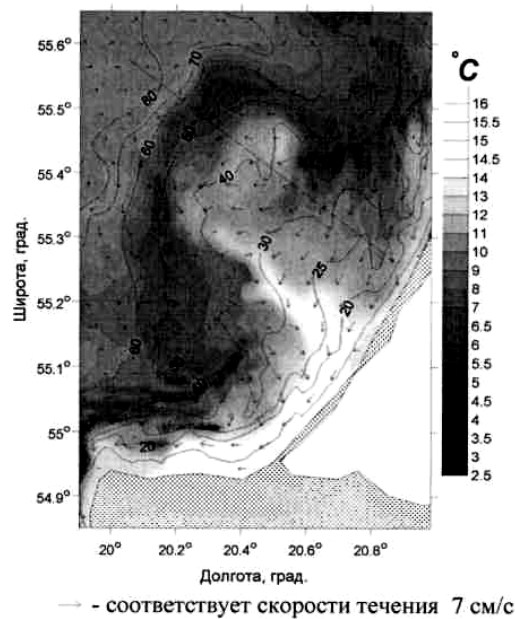


Рис. 5. Распределения скорости течения и температуры в придонном слое, наложенные на батиметрическую карту в районе наблюдавшегося 17 октября 2005 г. апвеллинга, по данным моделирования по прошествии 2 дней 16 часов

На этом рисунке явно обозначилась область в районе изобаты 40 м с относительно высокой температурой, где происходит выклинивание термоклина. Очевидно, что эта область сформировалась из-за особенностей рельефа дна. Такое заглубление отмечается как на экспериментальных данных, так и на воспроизведенных при моделировании разрезах (рис. 2 и 3). При этом в действительности контраст температуры в рассматриваемой неоднородности выражен в большей степени, чем в модельных данных.



Распределение поля скорости в придонном слое свидетельствует о переносе относительно холодных вод с севера и северо-востока. Вследствие такого переноса возникла градиентная зона в поле температуры на юго-западном склоне Самбийско-Куршского поднятия (рис. 5). К юго-западу от этой градиентной области направления течений меняются на западные и юго-западные. Апвеллинг в этой части моря (примыкающей к основанию Куршской косы) не развивается. По-видимому, главной причиной этого является изменение направления экмановского переноса в придонной области, где поток импульса связан с придонным трением.

Были произведены модельные расчеты при задании более слабого северного ветра. При скорости ветра 10 м/с ядро апвеллинга на разрезе L смещается в сторону берега. Одна из главных особенностей апвеллинга на анализируемом разрезе — появление ядра на заметном расстоянии от берега — исчезает при уменьшении силы ветра. Были рассмотрены пространственные особенности апвеллинга на анализируемом разрезе в зависимости от числа Фруда $Fr = U/(N \cdot H)$, которое в рассматриваемом контексте определяет возможность жидких частиц подняться по склону на высоту H . Здесь U — модуль скорости в придонном слое, N — частота Вайяля — Брендта. При оценках числа Фруда были взяты следующие значения параметров: $H = 5$ м, $N = 0,01$, скорость U бралась из модельных расчетов в точке пересечения анализируемого разреза с изобатой 30 м. При скорости ветра 15 м/с $Fr = 1,2$, и при этом ядро апвеллинга сформировалось на расстоянии от берега в районе изобаты 25 м. При скорости ветра 10 м/с величина Fr составила 0,6. При этом холодные апвеллинговые воды примыкали непосредственно к берегу. Наконец, при скорости ветра около 4 м/с $Fr = 0,1$, и апвеллинг при этом не развивался. Таким образом, при критических величинах числа Фруда около 1 апвеллинговое ядро формировалось на расстоянии от берега, при умеренных его значениях (около 0,5) ядро апвеллинга вырождалось и примыкало непосредственно к берегу, при малых величинах числа Фруда (0,1) апвеллинг не формировался.

Выводы

Один шторм с направлениями ветра северо-восточных румбов продолжительностью около 3 суток и силой ветра около 15 м/с вызвал понижение температуры примерно на 4°C в полосе шириной около 8 км в области с глубинами около 25 м, отстоящей от берега на расстоянии примерно 8 км.

Возникшие в результате шторма изменения термохалинной структуры были воспроизведены с помощью трехмерной численной модели. Достаточно удовлетворительно была воспроизведена пространственная структура апвеллинга, положение его ядра, выклинивание термоклина на глубинах 45–50 м, которое сопровождалось противофазным подъемом изолиний температуры и солёности в халоклине.

На основе моделирования была воспроизведена структура термохалинных полей на нескольких вертикальных разрезах, расположенных у основания Куршской косы, у мыса Таран и на разрезе, находящемся примерно на 10 км севернее основного разреза. Структуры термохалинных полей при апвеллинге на всех рассмотренных разрезах заметно отличались друг от друга и зависели от особенностей рельефа дна. Такая особенность, как возникновение апвеллингового ядра на удалении от берега, оказалась характерна только для конкретного района, где были проведены измерения.



Пространственная структура апвеллинга наряду с рельефом дна связана со скоростью возникающих вследствие специфического воздействия ветра придонных течений и стратификации. Различным сценариям апвеллинга соответствуют числа Фруда, равные примерно 1,2; 0,6 и 0,1.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №07-05-00833, 06-05-65295 и №06-05-64138.

Авторы благодарят администрацию фирмы «ЛУКОЙЛ Калининграднефтегаз» за предоставленные для анализа данные экспериментальных наблюдений.

Список литературы

1. Андросов А. А., Вольцингер Н. Е. Проливы мирового океана. Общий подход к моделированию. СПб.: Наука, 2005.
2. Власенко В. И., Иванов В. А., Стацук Н. М. Генерация квазиинерционных колебаний при апвеллинге у южного берега Крыма // Океанология. 1996. Т. 36, №1. С. 43–51.
3. Журбас В. М. [и др.]. Мезомасштабная изменчивость апвеллинга в Юго-Восточной Балтике: ИК-изображения и численное моделирование // Океанология. 2004. Т. 44, №5. С. 660–669.
4. Blumberg A. F., Mellor G. L. A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model. Washington, DC: American Geophysical Union, 1987. P. 16.
5. Jankowski A. Application of a σ -coordinate baroclinic model to the Baltic Sea // Oceanologia. 2002. V. 44, №1. P. 59–80.

Об авторе

М. Н. Голенко — мл. науч. сотр., Атлантическое отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, golenko@ioran.baltnet.ru