

ИЗУЧЕНИЕ АПВЕЛЛИНГА В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА

В.В. Белоусов*, Е.Н. Воскресенская*,
В.А. Наумова**

*Морской гидрофизический институт
НАН Украины

г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

**Севастопольская гидрометеорологическая
обсерватория

г. Севастополь, ул. Советская, 61

В статье анализируются типичные синоптические условия, приводящие к формированию апвеллинга в районе Южного берега Крыма. Приводятся результаты моделирования апвеллинга для одной из таких ситуаций.

Сгонно-нагонные течения на шельфовой зоне Южного Берега Крыма (ЮБК) представляют собой явление, со сложной пространственной структурой и временной неоднородностью, проявляющееся в резком колебании уровня моря и температуры воды. Изучением этой проблемы в 50-е годы занимался В.Б. Штокман [1] и теоретически доказал, что в случае движения воздушных масс над круглым морем по часовой стрелке в его центральной части должно происходить скопление более легкой воды и, соответственно, у берегов - подъём более холодных глубинных вод. Это соответствует ветрам от юго-западного до северо-западного направления для района ЮБК.

Е.А. Ловенковой и А.Б. Полонским [2] был проведен анализ повторяемости при-

брежных апвеллингов с 1948 по 2001 годы в Ялте, Алуште, Феодосии и на станции Херсонесский маяк. Ими показано, что апвеллинг вызывается не только сгонными ветрами, но, в некоторых случаях, развивается при ветрах нагонного типа. 84% случаев понижения температуры воды составляет до 10°C . Подобные результаты важны для использования в практической деятельности гидрометслужбы (ГМС). Поэтому в настоящей работе будут проанализированы синоптические условия, приводящие к формированию апвеллинга на ЮБК и принята попытка его моделирования.

Результаты и их обсуждение. Анализ долговременной синоптической информации за период 1947 – 2006 гг., накопленной в организациях ГМС Украины позволил выявить несколько типов мезомасштабных атмосферных аномалий, приводящих к апвеллингу у ЮБК. При этом рассматривались только случаи понижения, температуры прибрежной воды до 10°C и менее. Выяснено, что такие характерные синоптические ситуации, складывающиеся в регионе ЮБК, формируются в результате выхода на Черное море южного или северного циклонов, либо в результате установления там антициклонических условий, схематически представленных на рис.1а-1, рис.1б-1 и рис.1б-2, соответственно. Безусловно, представляется интересным воспользоваться полученным результатом и провести численное моделирование развития апвеллинга хотя бы при одном из описанных типов.

Для этого была выбрана конкретная ситуация, сложившаяся на протяжении июня месяца 1993г, которая сопровождалась вы-

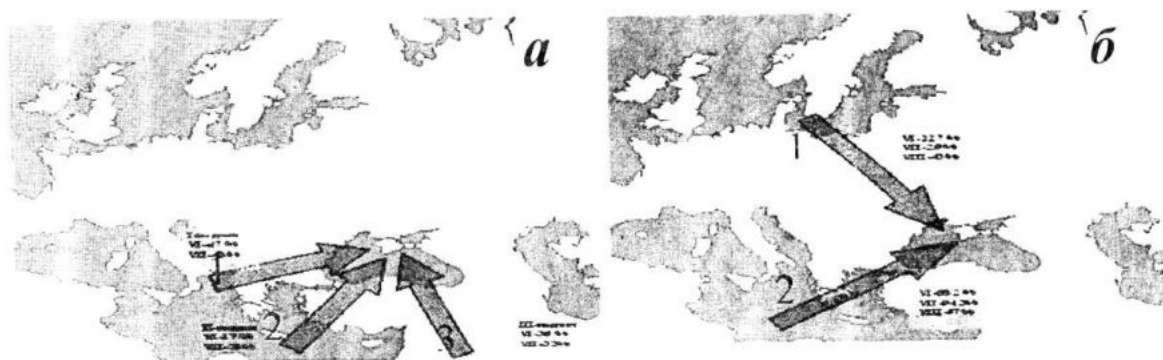


Рисунок 1 – Выход циклонов в район ЮБК: а- южный тип; б- 1- северный тип, 2- антициклоны

ходом южного циклона первого подтипа (помеченная на рис.1а как траектория 1) в период с 13 по 19 июня.

Обычно при моделировании апвеллинга с использованием трехмерных численных моделей [3]-[6], последние адаптируются для прибрежных районов с размерами сетки от 3×4 до 6×9 км. Это позволяет выявить общие тенденции возникновения и развития апвеллинга, но не дает возможности описать более тонкие особенности, связанные с конкретным географическим районом. Кроме того, трехмерное моделирование требует продолжительного времени счета, что не позволяет рассчитать большое количество (200 и более) вариантов взаимодействия ветра, температуры воздуха и течений за приемлемое время. При этом отсутствует привязка к натурным данным, что не позволяет сравнивать результаты расчета и наблюдений и судить о качестве калибровки модели по коэффициентам вертикального и горизонтального обмена количеством движения, коэффициентам диффузии и величинам тангенциального напряжения ветра. В этих работах старт модели осуществляется из состояния покоя и не учитывается реальный ветер, предшествующий сложившейся ситуации.

В настоящей работе применяется двумерная численная модель, основанная на примитивных уравнениях гидротермодинамики. При расчетах использовалась прямоугольная система координат с осью OY, направленной от берега, с осью OX, направленной вдоль него, OZ – вертикально вниз от невозмущенной поверхности моря ($z=0$)(рис.2).

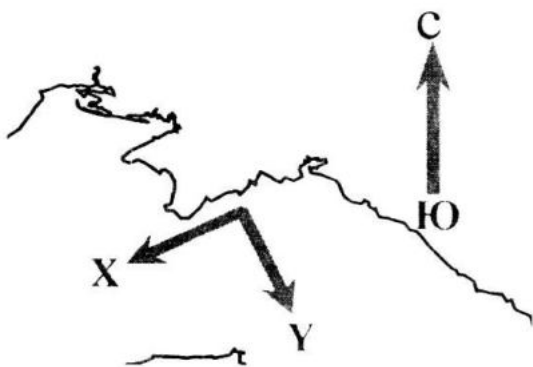


Рисунок 2 – Система координат модели для выбранного района

На поверхности моря задается тангенциальное напряжение ветра, потоки тепла и солёности. Кроме того, на поверхности моря принимается приближение "твёрдой крышки", то есть предположение, что вертикальная скорость течения отсутствует.

На твёрдых границах – условие прилипания и отсутствие потоков тепла и соли. На жидкой границе – условие свободного протекания. При втекании воды задаются температура и солёность как для начальной стратификации, характерной для данного времени года. Шаг сетки по горизонтали меняется от 500м у берега до 2-3км на внешней границе. Шаг сетки по вертикали – 0,2,4,6,8,10,20,...100, 110, 120, 140...380, 400,500,600,...1000, 1100, 1200, 1300,1500м. Размер расчетной области -1500м по глубине и 28 км перпендикулярно линии берега. Более подробно модель описана в работах [7]-[9]. В качестве начальных температуры и солёности задавались характерные по сезону для глубоководной части Черного моря профили [10]. Коэффициент горизонтального обмена количеством движения постоянный - $A_1 = 10^4 \text{ см}^2/\text{с}$, коэффициент вертикального обмена количеством движения до глубины 100м брался в соответствии с формулой $A_2 = 0.07 * h(i)$, где $h(i)$ - глубина в расчетной точке. При глубине более 100м $A_2 = 50.0 \text{ см}^2/\text{с}$. Коэффициенты вертикальной диффузии тепла и соли были выбраны в виде $K_z(i) = 0.25 * A_2(i)$ для наилучшей корреляции расчетной температуры воды при сравнении её с реальными метеоданными (рис3). Для реального ветра варьировался дополнительный множитель в диапазоне $0.6 \div 0.9$, чтобы согласовать вид расчетной кривой с наблюдаемой. Расчетная точка модели соответствует реальной точке измерений T^0 воды на Ялтинской метеостанции, на глубине 4м у берега. Глубина в месте измерения 12м.

Полученные при расчете результаты в виде графика представлены на рис.3. 4 и 5. Далее рассчитывались варианты развития апвеллинга для различных направлений ветра с дискретностью 45° и скоростей $1,2,4,7 \text{ м}/\text{с}$.

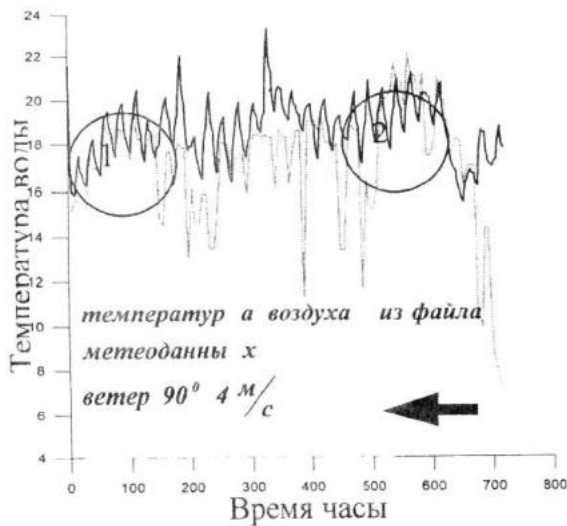


Рисунок 3 – Совпадение температуры воды. Серый график – метеоданные, черный – расчет. Горизонтальная стрелка влево соответствует восточному ветру

Расчетный период составлял 30 суток с поворотом ветра через 14 дней на угол $\pm 90^\circ$, 180° , что моделировало прохождение циклона. В результате был получен ряд значений T^0 воды в расчетной точке модели.

При анализе расчетных данных выявлен ряд закономерностей: максимальное падение рассчитанной температуры воды происходит в течение 1-2 суток после старта модели рис. 3 и 5. Это объясняется отсутствием инерции движения воды и, как следствие, более легкое перемешивание стратифицированной воды даже при слабых ($1 \div 2 \text{ м/с}$) ветрах. В работах использующих трехмерные численные модели [4,5,6] при расчетах апвеллинга рассматривается период времени моделирования ограниченный несколькими часами или, в крайнем случае, сутками. В данной работе расчеты проводились на месяц. Результат первых суток счета подвержен более сильному отклику модели и "апвеллинг", который появляется в этот момент, не учитывался.

Качественное совпадение измеряемых и расчетных данных достигнуто при совместном учете ветра и температуры воздуха (рис.4).

Общий вид измеряемой зависимости температуры воды от времени представляет собой ряд флюктуаций температуры на фоне линейного тренда.

Был проведен ряд численных экспериментов для различных направлений скорости ветра и температурных режимов.

Задавалась температурная ступенька 16-26°C для воздуха, то есть 2 недели расчет-

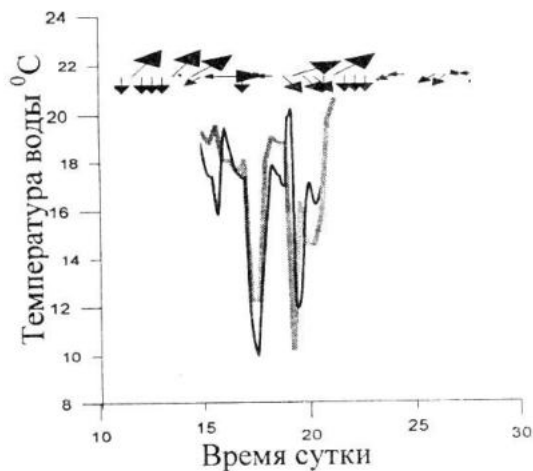


Рисунок 4 – Апвеллинг в районе Ялты. Серый график- метеоданные, черный – расчет. Вверху стрелками показано направление ветра. Величина стрелок пропорциональна скорости ветра. Горизонтальная стрелка вправо соответствует западному ветру

ного времени температура воздуха задавалась 16°C, а остальные 2 недели 26°C – это соответствует прохождению теплого фронта. Расчеты проводились для направлений ветра $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$. Для каждого из направлений ветра рассчитывалась температура в сопряженной для измерений точке модели при скоростях ветра 1,2,4,7 м/с. Для такого температурного

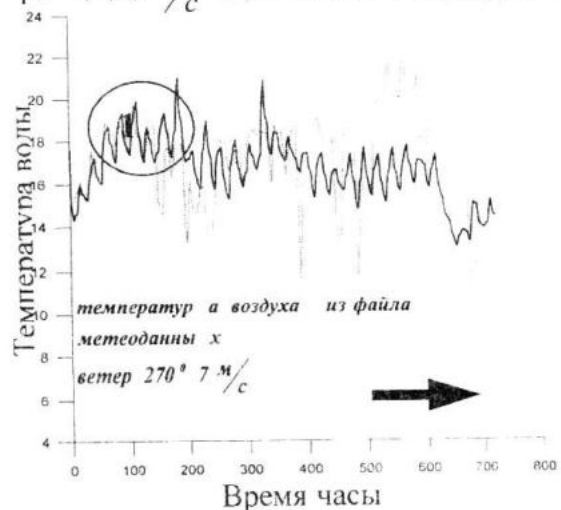


Рисунок 5 – Совпадение температуры воды. Серый график - метеоданные, черный – расчет. Горизонтальная стрелка вправо соответствует западному ветру

