

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 10⁰С. 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 10⁰С 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-

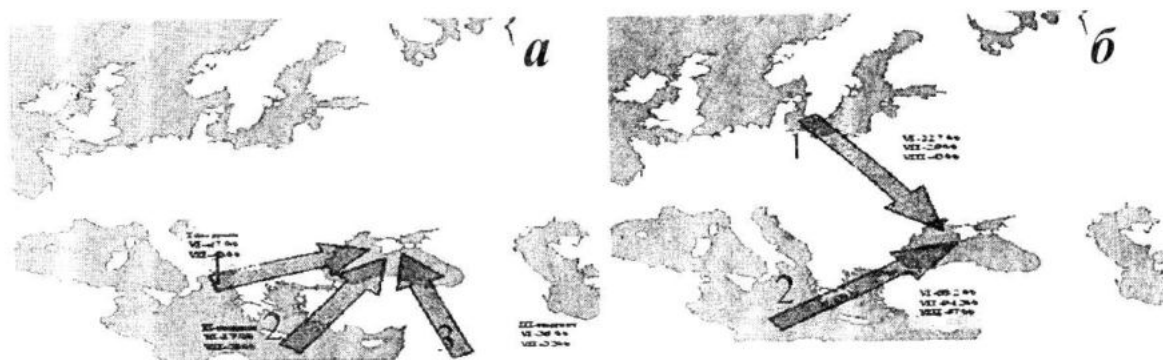


Рисунок 1 – Выход циклонов в район ЮБК: а- южный тип; б- 1- северный тип, 2- антициклоны

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).

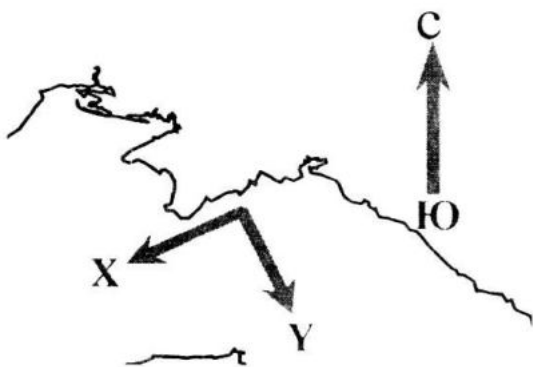


Рисунок 2 – Система координат модели для выбранного района

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 $1,2,4,7 \text{ м}/\text{с}$.

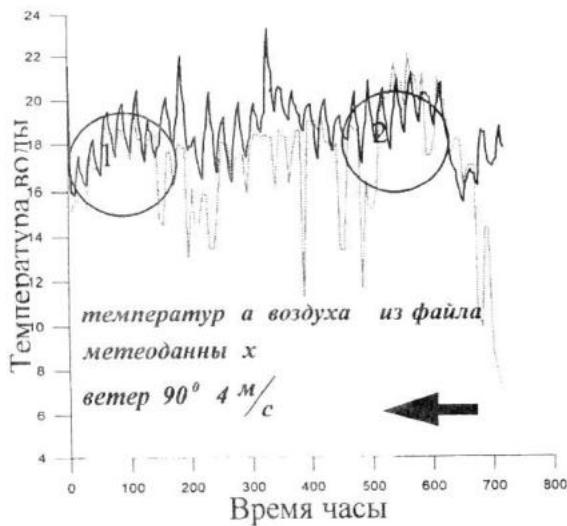


Рисунок 3 – Совпадение температуры воды. Серый график – метеоданные, черный – расчет. Горизонтальная стрелка влево соответствует восточному ветру

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 $16-26^\circ\text{C}$ для воздуха, то есть 2 недели расчет-

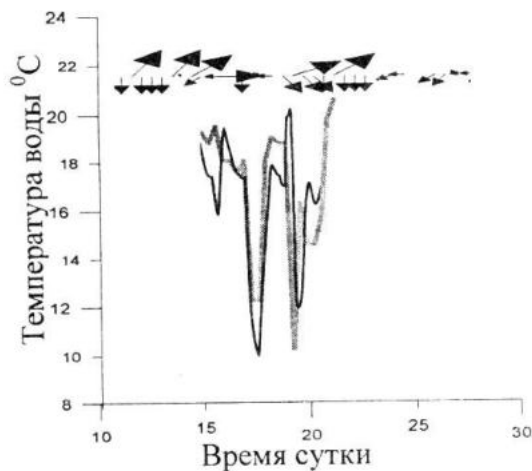


Рисунок 4 – Апвеллинг в районе Ялты. Серый график- метеоданные, черный – расчет. Вверху стрелками показано направление ветра. Величина стрелок пропорциональна скорости ветра. Горизонтальная стрелка вправо соответствует западному ветру

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 $1, 2, 4, 7 \text{ м/с}$. Для такого температурного

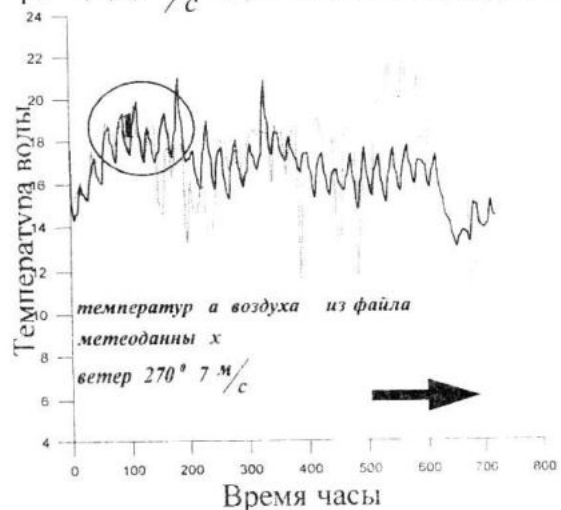


Рисунок 5 – Совпадение температуры воды. Серый график - метеоданные, черный – расчет. Горизонтальная стрелка вправо соответствует западному ветру

режима особый интерес представляет не только скачок температуры в заданной точке, но и тренд после скачка на протяжении последующих 4-5 суток, так как на такой тренд могут накладываться последующие колебания температуры воздуха и ветра..

При моделировании постоянного направления ветра в течение месяца и температуры воздуха, взятой из метеонаблюдений, выявились следующие закономерности. Получена хорошо совпадающая с наблюдениями расчетная кривая температуры воды, которая попадает в диапазон 18-24°C (рис. 3). Именно в этой области температур для определенных направлений и скоростей ветра проявляется суточный нагрев-охлаждение поверхностных слоев воды, которые затем проникают на глубину 4-7 м у береговой черты. Заметим, что совпадения, как для отдельных пиков, так и для их групп, получаются при различных по направлению и скорости ветрах (область 1 на рис. 3 и область 1 на рис. 4).

В случае моделирования ситуации с постоянной температурой атмосферы, при использовании реальных скорости и направления ветра, получено совпадение метеоданных и результатов расчета по резкому падению температуры для апвеллинга, вызванного прохождением южного циклона первого типа с 13 по 19 июня (рис. 4 – Вверху стрелками показаны скорость и направление ветра). Видно, что основной апвеллинг вызывается западным ветром. На втором пике заметна задержка модельного расчета порядка 6 часов. Точность прогноза апвеллинга на 3-5 суток (сгон поверхностной воды с последующим притоком к поверхности холодных нижних слоев) находится в диапазоне 5⁰С и менее.

Выводы. Формирование прибрежного апвеллинга в северо-западной части Черного моря и ЮБК (температура воды 10 градусов и ниже) в летний период происходит при активных синоптических процессах:

1. Выход южных циклонов (80%)
2. Выход северных циклонов (12%)
3. Антициклоны (8%)

Моделирование прибрежного апвеллинга в районе ЮБК для синоптической ситуации типа 1, подтипа 1 с помощью двумерной модели показало возможность успешного прогноза понижения температуры воды на ЮБК с заблаговременностью 3-5 суток.

Использование среднесрочного прогноза барических полей, поправочных коэффициентов для тангенциального напряжения ветра, учет задержки (порядка 6 часов) в развитии апвеллинга позволит прогнозировать

апвеллинг с большими заблаговременностью и достоверностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Б. Штокман. Ветровой нагон и горизонтальная циркуляция в замкнутом море. Известия АН СССР, серия географ. и геофиз., №1, 1941.
2. В.Б. Штокман. Исследование влияния ветра и рельефа дна на результирующую циркуляцию и распределение масс в неоднородном океане. Тр. Инст. Океанол. АН СССР, т. III, 1949.
3. Е.А. Ловенкова, А.Б. Полонский. Климатические характеристики апвеллинга у побережья Крыма и их изменчивость. Метеорология и гидрология, № 5, 2005. – С. 44–52.
4. В.К. Коснырев, Э.Н. Михайлова, Н.Б. Шапиро. Численное моделирование апвеллинга в северо-западной части Черного моря. – Метеорология и гидрология, № 12, 1996. – С. 65–72.
5. Э.Н. Михайлова, В.А. Иванов, В.К. Коснырев. Апвеллинг в северо-западной части Черного моря в период летнего прогресса. Морской гидрофизический журнал, № 4, Севастополь, МГИ, 1996. – С. 26–35.
6. А.И. Андросович, Э.Н. Михайлова, Н.Б. Шапиро. Численная модель и расчеты циркуляции вод в северо-западной части Черного моря. – Морской гидрофизический журнал, № 5, Севастополь, МГИ, 1994. – С. 28–42.
7. В.В. Белоусов, Э.И. Белоусова. Влияние неравномерности ветра и рельефа дна на вертикальные движения в прибрежной зоне моря. – сб. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь, 2001. – С. 35–42.
8. В.В. Белоусов Э.И. Белоусова. Установившиеся течения в прибрежной зоне неоднородного моря. Научная конференция “Ломоносовские чтения”, 29–30 апреля, г. Севастополь, 2003. – С. 87.
9. Э.И. Белоусова В.В. Белоусов. “Моделирование ветровых течений на северо-восточном шельфе Черного моря” Научная конференция “Ломоносовские чтения”, Севастополь, 4–5 мая, 2004. – С. 70–71.
10. А.С. Блатов, В.А. Иванов. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря (на примере Южного берега Крыма). – Киев: Наукова думка, 1992. – 244 с.