

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ
ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК
АПВЕЛЛИНГА
В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ
ЧЕРНОГО МОРЯ И
У ПОБЕРЕЖЬЯ КРЫМА
В 2005-2008 ГГ.**

Э.Н. Михайлова, М.А. Музылёва,
А.Б. Полонский, Д.М. Соловьев,
С.В. Станичный*

Морской гидрофизический институт
НАН Украины

г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

*Филиал Московского государственного
университета им. М.В. Ломоносова
в г. Севастополе,
г. Севастополь, ул. Героев Севастополя, 7

*Рассмотрена пространственно-времен-
ная изменчивость характеристик апвеллинга
в северо-западной части Черного моря и у по-
бережья Крыма по данным спутниковых на-
блюдений 2005 – 2008 гг.*

Введение. Одно из распространенных явлений в Черном море – апвеллинг, возникающий у берегов (а иногда и в его открытой части) при определенных гидрометеорологических условиях [1]. Необходимость рассмотрения апвеллинга и выделение районов его наиболее частого возникновения обусловлена расширением круга проблем рационального природопользования в прибрежной зоне. В настоящей работе рассматривается апвеллинг, протекающий в теплое время года (в период с мая по октябрь).

Известно, что в северо-западной части Черного моря возникает апвеллинг как сгонный (в мелководной северо-западной части Черного моря), так и экмановский (у ЮБК) [1, 2]. Оба типа апвеллинга вызываются ветром. В ряде работ рассмотрен не только механизм образования апвеллинга, но и его статистические характеристики и их изменения за длительный период времени [1–3]. Однако такой анализ выполнялся по данным отдельных гидрометеорологических станций, что делает невозможным изучение пространственной структуры апвеллинга. В последнее время стало возможным использование спутниковых данных с высоким разрешением.

Это позволяет описать пространственную структуру апвеллинга.

Целью настоящей работы явился анализ пространственно-временной изменчивости апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма с использованием данных гидрометнаблюдений, спутниковых данных о температуре поверхности моря (ТПМ) за теплый период 2005 – 2008 гг. и данных японского реанализа JRA.

Характеристика использованных материалов и методика обработки. Для характеристики апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма были использованы:

1. Данные спутниковых наблюдений за ТПМ NOAA-15/17 с разрешением 1 км за май – октябрь 2005 – 2008 гг.

2. Данные японского реанализа JRA по ветру и приземному давлению за май – октябрь 2005 – 2008 гг.

3. Наблюдения 14 береговых гидрометеорологических станций (Очаков, Приморское, Одесса, Усть-Дунайск, Скадовск, Хорлы, Цареградское Гирло, Стерегущий, Черноморское, Севастополь, м. Сарыч, Евпатория, Алушта, Судак) за период 2005–2008 гг. Использовались наблюдения, проводимые четыре раза в сутки (в синоптические сроки 3, 9, 15 и 21 ч.).

За случаи апвеллингов принимались понижения температуры поверхности моря, превышающие 5 °C за 6 часов [2].

На основе данных ре-анализа JRA строились карты приземного давления и поля ветра для анализа синоптической ситуации в период апвеллинга.

На основе данных гидрометстанций рассчитывались розы ветров для периодов, соответствующих апвеллингу. Т.к. наиболее интенсивный прибрежный апвеллинг вызывается продолжительными ветрами сгонных направлений, то основной акцент в анализе данных гидрометстанций был сделан на продолжительные ветра со скоростью более 10 м/с. Поскольку данные наблюдений за ветром в открытом море отсутствуют, для построения полей ветра использовались только данные JRA – реанализа.

Для более подробного описания трехмерной структуры апвеллинга были использованы результаты численного эксперимента на основе многоуровневой модели [3]. На поверхности моря задавались тангенциальное напряжение ветра, соответствующее

внезапно возникшему северо-западному ветру со скоростью 15 м/с, и условие отсутствия потока тепла. На боковых (твердых) границах задавались условия прилипания. В начальный момент времени скорости течения во всей области принимались равными нулю, а температура горизонтально-однородной и устойчиво-стратифицированной по вертикали. Толщина верхнего перемешанного слоя в начальный момент задавалась равной 4 м.

Результаты и их анализ. По данным спутниковых наблюдений в северо-западной части Черного моря и у берегов Крыма в период 2005 – 2008 гг. было выявлено 7 зон апвеллинга, представленные на рисунке 1. Все они характеризовались спецификой пространственно-временной изменчивости ТПМ. В большинстве случаев апвеллинг возникал в каждой из выделенных зон независимо друг от друга при определенных ветровых условиях. В исследуемый период наибольшее количество апвеллингов наблюдалось в зоне В (14 случаев), а наименьшее в зонах А и Г (по 4 случая соответственно).

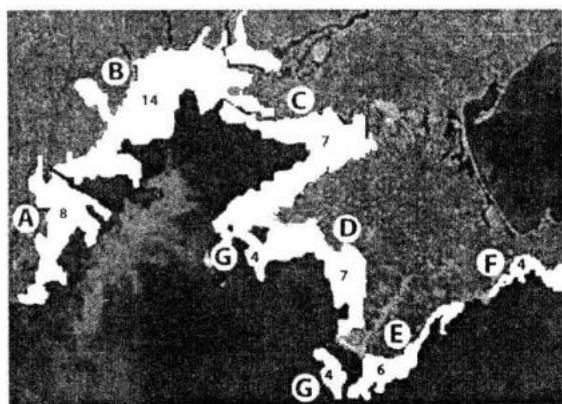


Рисунок 1 – Количество случаев апвеллинга в семи структурных зонах по данным спутниковых наблюдений (май–октябрь 2005–2008 гг.). Буквами (А, В, С, Д, Е, Ф, Г) обозначены зоны, а цифрами внутри зоны – количество случаев апвеллинга

Ширина зоны, охваченной апвеллингом, максимальна в зоне В. Наиболее узкая полоса апвеллинга наблюдается в зоне Г (рисунок 1, 2). Это связано с шириной шельфа. Апвеллинг в северо-западной части Черного моря распространяется до

100 км вглубь акватории, тогда как у ЮБК, в районе свала глубин – до 50 м.

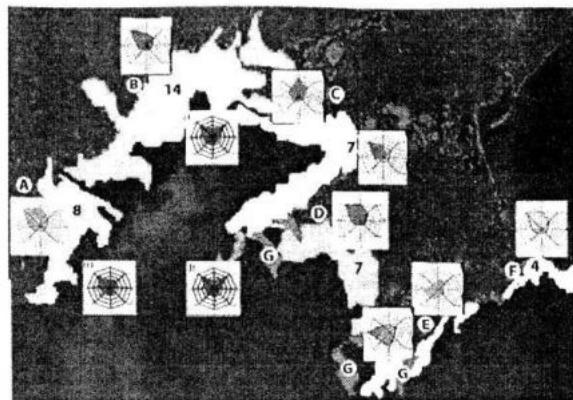


Рисунок 2 – Преобладающие направления ветров в период понижения ТПМ в семи структурных зонах (май – октябрь 2005 – 2008 гг.). Римскими цифрами обозначены 3 точки ре-анализа JRA

Розы ветров, представленные на рисунке 2, показывают, что северо-западный ветер наиболее часто вызывает апвеллинг вдоль побережья от границы с Румынией до о. Долгий (зоны А и В), в Каламитском заливе (зона Д), от м. Меганом до Керченского пролива (зона Ф). В структурной зоне С значительные понижения ТПМ генерируются северным и северо-западным ветром в северной части Каркинитского залива (на участке побережья от о. Долгий до пос. Степногорский). По-видимому, холодные воды проникают на юг залива за счет горизонтальной адвекции. Для проверки этого предположения были привлечены результаты численного моделирования, о которых пойдет речь ниже. От м. Херсонес до м. Меганом (зона Е) западные и юго-западные ветра вызывают апвеллинг, который является экмановским [1].

Апвеллинг, возникающий у юго-западной оконечности Крыма в районе м. Херсонес, а также у оконечности м. Тарханкут и у м. Айя (зона Г), представляющий собой горизонтальные неоднородности температуры в виде "языков" холодных вод, является следствием перестройки поля плотности из-за меандров ОЧТ, подходящих близко к шельфу [1, 5].

Всего в период 2005 – 2008 гг. было выделено 50 случаев апвеллинга, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Повторяемость апвеллинга в семи структурных зонах

Район	2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	Всего за период 2005–2008 гг.
A	3	2	1	2	8
B	5	3	2	4	14
C	2	2	1	2	7
D	2	1	3	1	7
E	2	2	1	1	6
F	1	0	1	2	4
G	2	0	0	2	4
Всего:	17	10	9	14	50

При этом отмечается значительная межгодовая изменчивость в повторяемости апвеллинга. Наибольшее количество апвеллингов наблюдалось в 2005 г. (17 случаев), а наименее в 2007 г. (9 случаев).

Наиболее ярко межгодовая изменчивость выражена в зоне В, где повторяемости апвеллинга изменялась от 2 до 5 случаев за сезон. Это связано с межгодовой изменчивостью поля ветра.

За анализируемый период времени апвеллинг во всех выделенных районах одновременно наблюдался дважды:

12.06 – 14.06.2005 г. и 6.08 – 7.08.2008 г. Рассмотрим более подробно первый, более продолжительный и интенсивный случай подъема вод.

За 12 ч. до проявления горизонтальных неоднородностей температуры на поверхности моря над северо-западной частью Черного моря преобладал ветер южного и юго-восточного направления. За 6 ч. до понижения ТПМ ветер сменил своё направление на северо-западное. Скорость ветра в этот период составляла 15 м/с. Понижение температуры (с 24 до 17 °C) вдоль всего побережья от о. Змеиного до Алушты было отмечено 12.06.05 в синоптический срок 21 ч. В последующие сроки ветер сохранял свое направление, вызывая распространение зон апвеллинга до 90 км вглубь акватории. Максимальная скорость северо-западного ветра (25 – 27 м/с) была зарегистрирована 13.06.05 (в 3 ч.). ТПМ у берега понизилась до 13–15 °C. Своего максимального развития апвеллинг достиг 14.06.05 (в срок 9 ч.).

В этот момент интенсивность ветрового воздействия несколько снизилась. Однако направление ветра оставалось северо-западным, а скорость ветра в этот срок достигала 17 – 19 м/с. В 15 часов 14.05.06 г. отмечено резкое уменьшение скорости ветра (до 10 – 11 м/с) и изменение его направления на южное. По спутниковым данным области апвеллинга стали постепенно сужаться и 14.06.05 г. в синоптический срок 21 ч. уже не отмечались вообще.

Такой ветровой режим был вызван уникальной синоптической ситуацией. В период 12–14.06.05 г. наблюдалась эволюция мало-подвижного циклона с центром над Крымом. Рядом с ним располагался обширный блокирующий антициклон (давление в центральной части более 1030 мбар). Это привело к формированию больших горизонтальных градиентов давления в исследуемом регионе (рисунок 3а) и явилось причиной сильного (до 27 м/с) северо-западного ветра (рисунок 3б), который сохранял относительную однородность в течение трех суток. Такая же структура изобар наблюдалась и в последующие сроки, когда наблюдался апвеллинг.

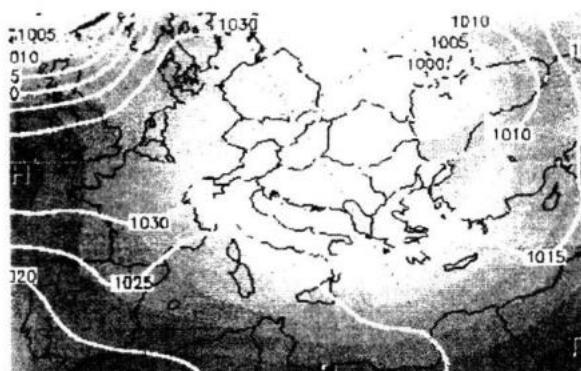


Рисунок 3а – Поле приземного давления по данным JRA (12 – 14.06.05 г.)

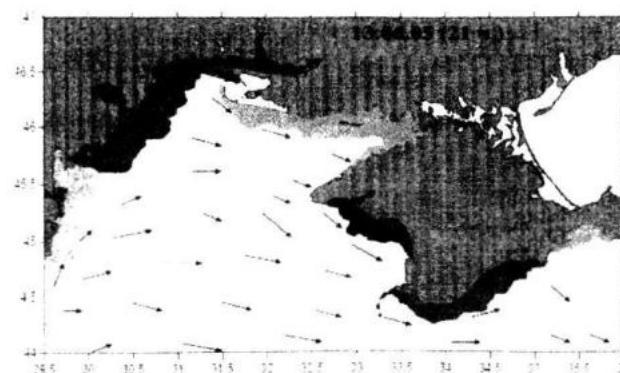


Рисунок 3б – Поле приводного ветра (12 – 14.06.05 г.) и области пониженной ТПМ

Для дополнительного анализа был проведен численный эксперимент в рамках трехмерной численной модели с разрешением $2,3 \times 3,3$ км. Моделировалось развитие апвеллинга при внезапно возникшем однородном северо-западном ветре (15 м/с). На рисунке 4 показано развитие апвеллинга на вторые модельные сутки. Видно, что аномалии ТПМ достигают $7,5^{\circ}\text{C}$, а генерируемые ветром скорости северо-западного течения до 20 см/с. Апвеллинг в зоне С развивается вдоль побережья от о. Долгий до пос. Степрекущий. В последующие модельные сутки холодная вода за счет горизонтальной адвекции распространяется до южной части Каламитского залива. Результаты моделирования позволили получить трехмерную структуру полей поверхностной температуры и скорости течения, а также показали, что модель адекватно воспроизводит наблюдавшуюся 12.06.05 – 14.06.05 г. изменчивость ТПМ.

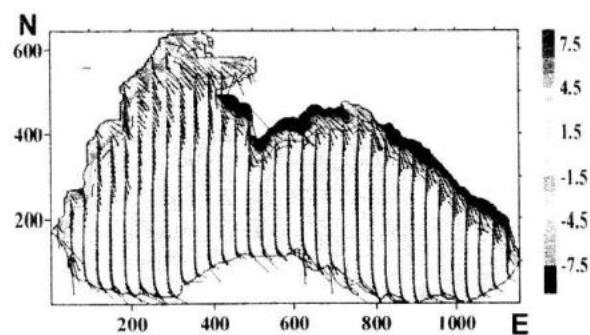


Рисунок 4 – Аномалии температуры и вектора течений на поверхности моря

Выводы.

1) В теплый период года (май – октябрь) прибрежный апвеллинг чаще всего наблюдался в северо-западной части Черного моря от оз. Шагани до о. Долгий (зона В): 14 случаев из 50. Реже всего апвеллинг наблюдался у побережья от м. Меганом до Керченского пролива (зона F), а также в виде "языков" холодных вод в районе м. Херсонес, м. Тарханкут и у м. Аия (зона G): по 4 случая.

2) Наблюдается значительная межгодовая изменчивость повторяемости апвеллинга. Наибольшее количество апвеллингов зафиксировано в 2005 г. (17 случаев), наименьшее – в 2007 г. (9 случаев).

3) 12–14.06.05 г. наблюдался уникальный случай продолжительного апвеллинга, который охватывал все исследуемые зоны северо-западной части Черного моря и ЮБК. Он был вызван малоподвижным циклоном с центром над Крымом, расположенным рядом с блокирующим антициклоном. Такая синоптическая ситуация вызвала устойчивый и относительно однородный (над рассматриваемой акваторией) северо-западный ветер со скоростями до 27 м/с.

4) Результаты моделирования эволюции прибрежного апвеллинга при равномерном северо-западном ветре (15 м/с) в рамках показали, что модель адекватно воспроизводит наблюдавшуюся изменчивость ТПМ (12.06.05 – 14.06.05 г.).

Литература

- Блатов А.С., Иванов В.А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря. – Наукова Думка, Киев, 1992. – С. 26 – 35.
- Ловенкова Е.А., Полонский А.Б. Климатические характеристики апвеллинга у побережья Крыма и их изменчивость. – Метеорология и Гидрология. 2005. – № 5, – С. 44 – 52.
- Иванов В.А., Михайлова Э.Н. Апвеллинг в Черном море. – Севастополь: ИПЦ «ЕКОСИ-Гидрофизика». – 2008. – С. 92.
- Иванов В.А., Коснырев В.К., Михайлова Э.Н. Апвеллинг в северо-западной части Черного моря в период летнего прогрева // Морской гидрофизический журнал. 1996. № 4. – С. 26 – 35.
- Коснырев В.К., Михайлова Э.Н., Станичный С.А. Апвеллинг в Черном море по результатам численных экспериментов и спутниковым данным // Морской гидрофизический журнал. 1996. № 5. – С. 34 – 46.