

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА

Географический факультет

На правах рукописи

АРХИПКИН ВИКТОР СЕМЕНОВИЧ

Гидрология прибрежного апвеллинга

Черного и Каспийского морей

11.00.08 - океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

МОСКВА 1996

Издательство АО "Диалог-МГУ". ЛР N 063999
Подписано к печати 14.11.96г.
Усл.печ.л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ N 497.
Тел. 939-38-90, 939-38-91. Факс 939-38-93.
119899, Москва, Воробьевы Горы, МГУ

Работа выполнена на кафедре океанологии
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель:

доктор географических наук, профессор

А.Н. Косарев

Официальные оппоненты:

доктор географических наук,

старший научный сотрудник

Б.Н. Филюшкин

доктор физико-математических наук,

старший научный сотрудник

В.Н. Зырянов

Ведущая организация:

Государственный океанографический институт (г. Москва)

Защита состоится “19” декабря 1996 г. в 17⁰⁰ час. на заседании диссертационного совета Д-053.05.30 в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119899, Москва, ГСП-3, Ленинские горы, МГУ, географический факультет, 19-й этаж, ауд.1801.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке географического факультета МГУ на 21-м этаже.

Заявление разослан 18 ноября 1996 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

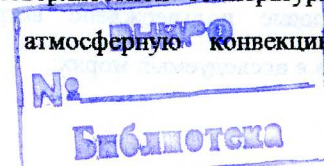
кандидат географических наук



С.Ф. Алексеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Апвеллинг (“upwelling”) в переводе с английского означает подъем, восходящее движение. В открытых акваториях океанов и морей апвеллинг наблюдается в центральных областях циклонических круговоротов, у кромки льдов, при прохождении тропических циклонов, во фронтальных разделах, на экваторе. Однако, наиболее сильный апвеллинг образуется в прибрежных районах у материков и островов. Влияние прибрежного апвеллинга на процессы, происходящие в океанах и морях, чрезвычайно велико, что обусловило его активное изучение в последние десятилетия. В результате интенсивных восходящих движений, поверхностные воды периодически или постоянно обогащаются биогенными веществами, и как следствие, в узкой прибрежной зоне создается богатая питательная среда для фито- и зоопланктона. На эти районы, занимающие менее 1% площади Мирового океана, приходится почти половина мирового улова рыбы. В то же время, имеются отдельные водоемы, например Черное море, где интенсивный подъем вод может вызвать негативный эффект - поступление в поверхностные слои вод, зараженных сероводородом. Одновременно с существенным изменением биологических условий, в районах прибрежного апвеллинга резко меняется и вся седиментационная обстановка, образуется характерный осадочный комплекс, свойственный этим районам. В районах круглогодичного и сезонного апвеллинга могут создаваться благоприятные условия для образования нефтяных месторождений. Крупномасштабный прибрежный апвеллинг влияет и на климат прилегающей суши. При наличии хорошо выраженной вертикальной термической стратификации он формирует поле аномально низкой поверхностной температуры воды, которое, в свою очередь, подавляет атмосферную конвекцию, испарение и создает



устойчивый засушливый климат, изменяет бризовую циркуляцию. Исследование структуры апвеллинга важно и для адекватной параметризации этого явления в глобальных моделях взаимодействия океана и атмосферы. В последнее время возросла необходимость детального знания процессов апвеллинга в связи с расширением круга проблем рационального природопользования в прибрежной зоне океанов и морей. Вместе с тем, тогда как прибрежный апвеллинг некоторых районов Мирового океана изучен довольно хорошо, то структура и динамика вод прибрежного апвеллинга Черного и Каспийского морей до сих пор исследованы крайне слабо.

Цель работы - изучение механизмов образования, особенностей структуры и изменчивости прибрежного апвеллинга в Черном и Каспийском морях и его влияния на гидрологическую структуру вод.

При этом решались следующие **основные задачи**:

- исследование влияния различных гидрометеорологических условий на процессы образования прибрежного апвеллинга;
- оценка параметров пространственно-временной изменчивости прибрежного апвеллинга и ее влияния на гидрологическую структуру вод;
- сопоставление результатов численного моделирования апвеллинга с данными натурных наблюдений.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- впервые дана наиболее полная характеристика прибрежного апвеллинга как природного явления в Мировом океане;
- впервые получены статистические параметры прибрежного апвеллинга и детально изучена гидрологическая структура вод в период апвеллинга в Черном и Каспийском морях;
- на количественном уровне подтверждено ветровое происхождение прибрежного апвеллинга в исследуемых морях;

- также впервые на основе различных методов сделаны оценки вертикальных скоростей прибрежного апвеллинга Черного и Каспийского морей;
- впервые исследована межгодовая изменчивость сезонного прибрежного апвеллинга в Каспийском море и выявлены возможные причины ее возникновения;
- на основе математических моделей показаны механизмы формирования структуры и динамики вод прибрежного апвеллинга в Черном и Каспийском морях.

Практическая значимость работы. Полученные результаты, разработанные модели и методы могут быть использованы при определении районов высокой биологической продуктивности, при разработке природоохранных мероприятий в прибрежной зоне. Предложенные методики позволяют прогнозировать возникновение прибрежного апвеллинга и связанное с ним изменение гидрологической обстановки.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на заседаниях *Бассейновой секции "Индийский океан и южные моря"* (Севастополь, 1985, 1986, 1988), *Ломоносовских чтениях МГУ* (Москва, 1986, 1988), *III-й конференции МГУ по проблемам Мирового океана* (Москва, 1986), *III-м съезде советских океанологов* (Ленинград, 1987), *республиканской научной конференции "Комплексные океанографические исследования Черного моря"* (Севастополь, 1988), *III-й всесоюзной научно-технической конференции "Перспективные методы планирования и анализа экспериментов при исследовании случайных полей и процессов"* (Гродно, 1988), *всесоюзном совещании "Проблемы освоения шельфовых зон Мирового океана"* (Кадивели, 1990), *IV-й всесоюзной научной конференции по исследованию роли энергоактивных зон океана в короткопериодных колебаниях климата (программа "Разрезы")* (Одесса, 1990), *XX и XXI*

General Assembly of the European Geophysical Society (1995, 1996), неоднократно на заседаниях кафедры океанологии МГУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Основная часть содержит 130 страниц, 30 рисунков, 4 таблицы. Список литературы состоит из 320 наименований, из которых 250 на иностранных языках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проблемы, излагаются цели и задачи работы, показана научная новизна и практическое значение исследования. Дается определение прибрежного апвеллинга как сложного динамического процесса, характеризующегося интенсивным восходящим движением воды в узкой прибрежной зоне между берегом и вдольбереговым струйным течением, представляющее собой жидкую границу и находящееся от берега на расстоянии порядка бароклинного радиуса деформации.

В первой главе рассматриваются общая характеристика прибрежного апвеллинга как природного явления и возможные механизмы формирования его структуры. Основные результаты этой главы изложены в работе [Архипкин, Иванов, Еремеев, 1987].

На основе обобщения натуральных и теоретических исследований проведена классификация прибрежного апвеллинга по местоположению на шельфе, механизмам формирования и временным масштабам.

Проведенный анализ географического распространения прибрежного апвеллинга в Мировом океане показал, что самый распространенный тип апвеллинга - синоптический ветровой, при этом в некоторых прибрежных районах он проявляется столь регулярно в определенный период года, что

можно говорить об образовании сезонного или круглогодичного прибрежного апвеллинга. В замкнутых водоемах апвеллинг такого масштаба не наблюдаются, за исключением Каспийского моря.

Большая часть главы посвящена натурным исследованиям прибрежного апвеллинга. Самые детальные наблюдения этого явления проводились по программам CUEA ("Coastal Upwelling Ecosystem Analysis"), CODE ("Coastal Ocean Dynamics Experiment"), OPUS ("Organization of Persistent Upwelling Structures") и некоторым другим. Эти работы показали, что всю толщу вод в районе апвеллинга можно подразделить на три слоя: поверхностный, промежуточный и придонный. Поверхностный (экмановский) слой толщиной около 10-40 метров характеризуется значительной однородностью и наличием поперечной составляющей скорости течения, направленной от берега, низкочастотные флуктуации которой хорошо согласуются с колебаниями вдольберегового напряжения ветра. Ниже поверхностного слоя наблюдаются слабые компенсационные течения к берегу, имеющие геострофическую природу. Выявлено, что суммарный перенос к берегу в промежуточном слое в два-три раза больше поверхностного, направленного от берега. С увеличением ветрового напряжения эта диспропорция уменьшается и при сильных вдольбереговых ветрах приблизительно выполняется нулевой баланс масс в направлении, поперечном к берегу. Выдвигается предположение [Smith, 1981], что такое превышение переноса вод в промежуточном слое над поверхностным обеспечивает значительный положительный градиент во вдольбереговой компоненте течения $\frac{\partial v}{\partial y}$. В пределах 10-30 м ото дна располагается придонный однородный слой, толщина которого уменьшается при удалении от берега. Течения в этом слое имеют незначительные скорости и направлены от берега при наличии подповерхностного противотечения, и к берегу в других случаях.

Одна из важных компонент прибрежного апвеллинга, обнаруженная в ходе натуральных экспериментов - поверхностное вдольбереговое струйное течение, направленное по ветру. Вне экмановских (поверхностного и придонного) слоев вертикальный сдвиг вдольбереговой компоненты течения относительно постоянен и находится в геострофическом балансе с поперечным наклоном изопикн (соотношение "термического ветра"). На нижней границе струи обнаружен внутренний слой трения, где приблизительно наблюдается фрикционный баланс. Наблюдения позволили выявить и другую характерную особенность апвеллинга - подповерхностное противотечение, направленное в сторону, противоположную направлению поверхностного течения.

Подъем вод из промежуточных слоев и выход их к поверхности моря образует полосу значительных горизонтальных градиентов плотности - фронтальную зону. В начальный период развития апвеллинга фронтальная зона движется от берега, затем, при ослаблении ветров, наблюдается ее перемещение к берегу, причем в это время фронт выражен наиболее четко. При сильных ветрах фронт апвеллинга, в основном, двумерное образование, в случае слабых или изменчивых ветров, во фронтальной зоне образуются меандры. Их толщина ограничена верхними 20÷30 м, а характерный масштаб близок к масштабу внутреннего радиуса деформации Россби. Некоторые натурные наблюдения показали связь фронта с поперечной двухъячейстой структурой циркуляции.

Использование ИСЗ позволило выявить два типа пространственных неоднородностей в областях прибрежного апвеллинга: локальные центры ("upwelling center") и поперечные струи или филаменты ("filament"). Локальные центры представляют собой пятна наиболее холодных вод, приуроченные к берегу. Их размеры и интенсивность хорошо коррелируют с локальным вдольбереговым ветром. Отмечена связь локальных центров с

топографией дна. Поперечные струи - это узкие, изогнутые полосы наиболее холодных вод, распространяющиеся далеко за пределы шельфа. Они обнаружены практически во всех зонах сезонных и круглогодичных апвеллингов, за исключением Бенгельского. Длина струй достигает до 400÷500 км, ширина - 10÷80 км. Время интенсивного развития струй 1÷2 суток, длительность существования их около двух недель. Практически всегда филаменты распространяются от фронта апвеллинга. Термические границы с южной стороны струй (в северном полушарии) выражены наиболее резко, чем с северной. Скорость течений в поперечных струях в поверхностных слоях изменяется от 40 см·с⁻¹ до 200 см·с⁻¹.

Отдельно рассмотрены механизмы формирования структуры прибрежного апвеллинга. Поперечная структура хорошо объясняется с помощью экмановской модели ветровых течений: для ветров дующих вдоль берега, находящегося слева, баланс между вертикальным трением и силой Кориолиса создает течение от берега в тонком поверхностном слое толщиной порядка $D = \sqrt{\frac{2 \cdot A_v}{f}}$ и одностороннюю дивергенцию у берега. Неразрывность масс обеспечивает возникновение подъема вод у берега и глубинного компенсационного течения к берегу. Наибольшие скорости восходящих движений воды наблюдаются в узкой прибрежной зоне, где поперечный масштаб движений соответствует бароклинному радиусу деформации. Это связано тем, что процесс возникновения апвеллинга сопровождается излучением энергии в сторону открытого моря посредством длинных внутренних волн, причем длина волны излучающего возмущения имеет порядок внутреннего радиуса деформации. Характер и интенсивность поперечной шельфовой циркуляции в период апвеллинга контролирует целый комплекс процессов. В него входит и пространственная изменчивость поля ветра. Математическое моделирование показало, что для вдольбереговых масштабов воздействия более 10³ км апвеллинг

простирается до дна и локальный поперечный баланс масс достигается. Для промежуточных масштабов ($\sim 10^2$ км) апвеллинг ограничивается поверхностными слоями, в этом случае локальный поперечный баланс не соблюдается.

Далее показано, что существование поверхностного струйного течения в прибрежной зоне в период апвеллинга обуславливается такими факторами как сохранение потенциального вихря, геострофический баланс между вертикальным градиентом вдольбереговой компоненты скорости течения и поперечным наклоном изопикнических поверхностей, и наличие прибрежного пограничного слоя.

Обзор теоретических исследований выявил большой разброс в объяснениях причин возникновения подповерхностных противотечений. К ним относятся: пространственная неоднородность поля ветра, вдольбереговой градиент давления, особенности параметризации термохалинного перемешивания. При этом существуют различные точки зрения на формирование, например, вдольберегового градиента давления. В одних работах показано, что это совместный результат β - эффекта, свердруповского соотношения в открытой части океана и геострофического вдольберегового течения в зоне апвеллинга, в других для образования этого градиента используется баротропный возбуждающий механизм в форме атмосферного градиента давления, в третьих формирование вдольбереговых градиентов давления происходит благодаря волнам Кельвина.

В этом разделе обсуждается также влияние вдольбереговых особенностей рельефа дна и береговой линии на структуру прибрежного апвеллинга. Отмечено, что влияние изменений характера береговой линии более слабое, чем изменений рельефа дна.

В второй главе характеризуются используемые данные и методы определения основных параметров прибрежного апвеллинга. Для

определения районов распространения прибрежного апвеллинга и его пространственно-временных параметров в Черном и Каспийском морях анализировались данные срочных наблюдений за температурой воздуха и воды, ветром и уровнем моря, выполненных с мая по сентябрь в 1961-1975 г.г. (для южного берега Крыма - дополнительно с 1980 по 1985 г.), всего на двадцати прибрежных гидрометстанциях. Теплый период года выбран по той причине, что прибрежный апвеллинг хорошо проявляется в это время по температуре воды. В зимний сезон апвеллинг также может возникнуть, но идентифицировать его крайне сложно. Помимо этого использовались квазисиноптические океанологические съемки и разрезы, проведенные в зоне апвеллинга, которых к сожалению оказалось не слишком много. Обработывались также данные наблюдений, полученные на автономных буйковых (АБС) и многосуточных гидрологических станциях, и многолетние массивы гидрологических данных по Черному (1920 - 1990 г.г.) и Каспийскому морям (1930 - 1985 г.г.). Для более детального исследования временного развития прибрежного апвеллинга в Черном море использовались данные наблюдений за ветром и поверхностной температурой воды с дискретностью 3 час., полученные с помощью автоматических регистраторов, расположенных на ГМС "Кацивели" и на морской платформе, находящейся примерно в 600 м от берега.

При анализе временных характеристик апвеллинга были введены такие понятия, как период становления или начального развития, интенсивность, начальная скорость изменения температуры воды, продолжительность. Перед их определением исходные временные ряды температуры воды подвергались фильтрации с помощью косинус - фильтра Тьюки для удаления колебаний, обусловленных суточным ходом температуры воздуха и бризовой циркуляцией ветра.

Процедура выделения апвеллинга (за исключением районов восточного побережья Среднего Каспия), учитывая аномальность этого явления, заключалась в следующем. Сначала из временных рядов температуры воды удалялись суточные колебания и сезонный тренд, затем выделялись выбросы с помощью метода "Тьюки 53X". Далее выяснялась их связь с колебаниями температуры воздуха, а если она связь отсутствовала, то эти понижения температуры воды объяснялись возникновением апвеллинга. Для района восточного побережья Среднего Каспия такая процедура не правомерна из-за регулярного образования апвеллинга, поэтому здесь использовались экспертные оценки.

При изучении межгодовой изменчивости сезонного апвеллинга у восточного берега Среднего Каспия был применен спектральный анализ методом быстрого преобразования Фурье.

Кроме того, для проведения различных расчетов и анализа пространственного распределения океанологических характеристик применялся объективный анализ методом крайгинга.

Распределение водных масс в зоне апвеллинга изучалось как на основе классического T,S - анализа, так и с помощью одного из наиболее быстро развивающихся методов многомерного анализа - кластерного анализа. В качестве меры сходства брались стандартизованные n-мерные евклидовы расстояния, где n - количество океанологических параметров.

В отдельный раздел главы выделена методика расчета первого бароклинного радиуса деформации Россби - важной характеристики прибрежного апвеллинга. За первый бароклинный радиус деформации принимается расстояние, которое проходит первая бароклиновая мода длинных внутренних волн, имеющая скорость C_1 , за время f^{-1} . Скорость C_1 определялась из задачи на собственные значения Штурма-Лиувилля, к которой сводится система линейных уравнений движения на

невращающейся плоскости методом разложения по нормальным модам. В частом случае, когда частота Вэйселя-Брента N по вертикали не меняется, скорость первой бароклиновой моды равна $C_1 = \frac{N \cdot N}{\pi}$, а радиус деформации -

$$R_d = \frac{N \cdot N}{\pi \cdot f}$$

Хотя величины вертикальных скоростей в зонах прибрежного апвеллинга на два-три порядка больше величины вертикальных скоростей в открытом океане, в настоящее время инструментальные наблюдения за вертикальной составляющей скорости течения практически отсутствуют. Поэтому, в одном из разделов второй главы приводятся различные косвенные методы оценок значений вертикальной скорости. Если имеются, выполненные через определенный промежуток времени, поперечные разрезы температуры и солёности воды, то вертикальную скорость можно определить по вертикальным перемещениям их изолиний. При наличии измерений течений на разных горизонтах одной АБС вблизи берега, для оценки вертикальной скорости можно использовать принцип сохранения массы при условии отсутствия вдольбереговых изменений скоростей течений. Уравнение диффузии плотности применяется тогда, когда имеются одновременные измерения температуры, солёности и течений на разных горизонтах одной АБС. Здесь учитывается, что в период апвеллинга для всей толщи воды, кроме экмановских пограничных слоев, выполняется геострофический баланс и соотношение "термического ветра" в уравнении движения по оси x , и квазигеострофичность в уравнении движения по оси y . Вертикальную скорость можно получить также и из диагностических моделей расчета течений.

Поскольку для описания циркуляции вод в области апвеллинга прямых инструментальных измерений течений явно недостаточно, в диссертации представлена, разработанная автором, линейная квазигеострофическая

диагностическая модель расчета течений, учитывающая влияния рельефа дна, напряжение ветра, параметра Кориолиса и бароклинности. Вкладом нелинейных членов и горизонтального турбулентного обмена пренебрегается, так как в синоптическом прибрежном апвеллинге он незначителен. Вводятся приближения Буссинеска и гидростатики. Кинематический коэффициент вертикального турбулентного обмена принимается постоянным по вертикали. На поверхности задается напряжение ветра, на дне прилипание. Результаты расчетов по этой модели обсуждаются в третьей главе.

Третья глава содержит основные результаты исследования пространственно-временной изменчивости прибрежного апвеллинга в Черном и Каспийском морях, причин его возникновения, изучения особенностей гидрологической структуры и циркуляции вод в зоне апвеллинга.

Имеющиеся материалы свидетельствуют, что в Каспийском море работы по исследованию апвеллинга ограничивались описанием структуры и циркуляции вод в зоне апвеллинга и качественным объяснением причин его образования. В Черном море изучение прибрежного апвеллинга вообще практически не проводилось. Следует отметить, что большинство авторов отдает предпочтение ветровому происхождению апвеллинга в обоих морях, хотя имеются работы [Бондаренко, 1993], в которых декларируется циркуляционный механизм возникновения апвеллинга в Каспийском море.

Поэтому, автор провел анализ выяснения причин возникновения апвеллинга уже на количественном уровне. Для этого учитывались особенности развития апвеллинга и ветровых течений в прибрежных мелководных районах. Известно, что процесс развития апвеллинга имеет три этапа: становления, максимального развития и разрушения. При этом связь между ветром и температурой воды на каждом этапе имеет свои

особенности. Так, на этапе начального развития эта связь практически линейная. На следующих этапах линейность нарушается из-за процессов перемешивания, прогрева поверхностного слоя или распространения захваченных волн. Помимо этого в мелководных районах, где глубина моря незначительно больше экмановской глубины трения, прибрежный апвеллинг может возникать не только благодаря вдольбереговому ветру, но и из-за сильных ветров с суши. Это связано с тем, что при таких условиях в поверхностном слое образуется составляющая полного потока в направлении действия ветра, отсутствующая в случае глубокого моря. Наконец, связь между ветром и температурой воды еще более отчетливо проявляется, если рассматривать не непосредственное напряжение ветра, а накопленное его действие, определяемое формулой $\int \tau \cdot dt$, где τ - составляющая ветрового напряжения, либо вдоль берега, либо по нормали к нему; T - время действия ветра одного направления. С учетом всего этого, корреляционная связь между температурой воды и накопленным действием ветра определялась на отдельных временных интервалах и отдельно для двух типов резких понижений температуры воды, вызванных либо вдольбереговым ветром, либо сильными ветрами с суши, при этом в период становления апвеллинга коэффициенты корреляции очень высокие для обоих случаев - $r=0.85-0.95$, иначе говоря ветровое происхождение апвеллинга подтверждается и на количественном уровне.

В рассматриваемую главу включен подробный анализ условий распространения апвеллинга в Черном и Каспийском морях и его временных характеристик. Наиболее часто апвеллинг в Черном море отмечался в районах северо-западного побережья, южного берега Крыма и кавказского побережья России; в Каспийском - у западного и восточного берегов Среднего Каспия. Во всех указанных районах, за исключением восточной части Среднего Каспия, апвеллинг образуется эпизодически и

представляет собой локальное явление - ветровой синоптический апвеллинг. В большинстве случаев он вызывается вдольбереговыми ветрами. Случаи апвеллинга, вызванного ветрами с суши, малочисленны и наблюдаются, главным образом, в тех прибрежных районах, где орография местности способствует возникновению таких ветров (например, фен или бора). Наиболее часто прибрежный апвеллинг образуется в июне-июле. Продолжительность его изменяется от 2 до 10 суток, интенсивность - от 3 до 10°C, период становления - от 12 час. до 3 суток. Отмечено, что интенсивность апвеллинга в Черном море в среднем больше, чем в Каспийском, что объясняется различным характером изменения температуры воды с глубиной в этих морях. У восточного берега Среднего Каспия повторяемость и продолжительность случаев синоптического апвеллинга в летние месяцы таковы, что вода не успевает прогреваться до температуры, которую она имела до апвеллинга. Это способствует образованию здесь сезонного апвеллинга. Иначе говоря, понижение температуры воды во время апвеллинга начинает преобладать над сезонным прогревом моря (рис. 1).

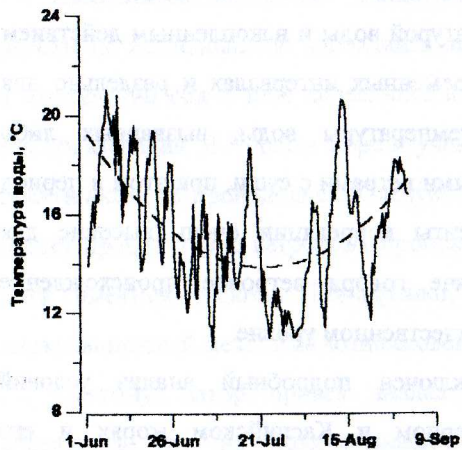


Рис. 1. Изменчивость поверхностной температуры воды в зоне сезонного прибрежного апвеллинга у восточного берега Среднего Каспия. Бейдаш, 1964 г.

На основе анализа распределения гидрологических характеристик на разрезах в зоне апвеллинга, расположенных по нормали к берегу, показано, что подъем вод из подповерхностных слоев к поверхности происходит в узкой прибрежной зоне шириной от 5 до 15 км (рис. 2). Затем, поднявшиеся на поверхность, холодные воды

переносятся от берега в сторону открытого моря под влиянием экмановского потока в поверхностном слое. Это обуславливает уменьшение вертикальной устойчивости вод у берега в 5-15 раз и образование фронтальной зоны апвеллинга с резкими горизонтальными градиентами температуры, солености (только для Черного моря) и плотности воды. При этом у восточного берега Среднего Каспия градиенты температуры меньше, чем в других районах апвеллинга, что в связи с размыванием фронта апвеллинга под действием устойчивых северо-западных ветров. Подъем вод прибрежного апвеллинга происходит, в основном, с нижней границы сезонного термоклина (20-40 м), а иногда и с более глубоких горизонтов, вызывая появление на поверхности вблизи берега вод холодного промежуточного слоя в Черном море ($T=7+8^{\circ}\text{C}$, $S=18.0+18.6\%$) и глубинной водной массы в Каспийском ($T=10+12^{\circ}\text{C}$, $S=12.7+12.9\%$).

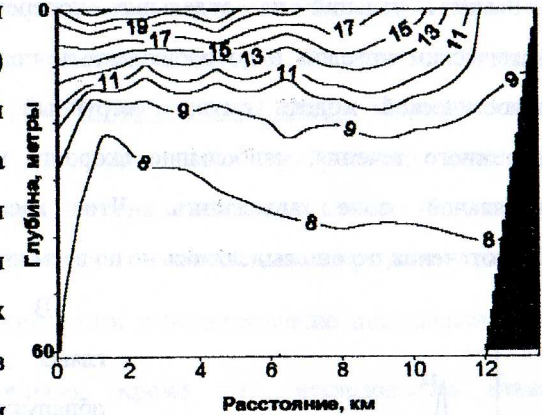


Рис. 2. Распределение температуры воды во время максимального развития прибрежного апвеллинга у южного берега Крыма на разрезе по 33°58' в.д. 11 июля 1981 г.

Использование различных методов оценки значений вертикальных скоростей в период апвеллинга выявило диапазон их изменения в пределах от 10^{-2} до 10^{-1} $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$, причем отмечается, что наибольшие скорости восходящих движений приходятся на периоды максимального развития компенсационного и вдольберегового течений.

Обработка данных измерений течений на нескольких АБС показала, что компенсационное течение, направленное к берегу, имеет наибольшие

скорости в придонном пограничном слое, а интенсивность вдольбереговой составляющей течения убывает с глубиной из-за действия придонного трения, ослабляющего влияние поперечного градиента урвонной поверхности в толще воды, особенно у дна.

Расчеты течений на отдельных поперечных к берегу разрезах динамическим методом и по наблюдаемым полям плотности с помощью диагностической модели выявили струйный характер вдольберегового прибрежного течения, наибольшие скорости которого расположены во фронтальной зоне апвеллинга. Что касается подповерхностного противотечения, то оно выделялось не по всем натурным наблюдениям.

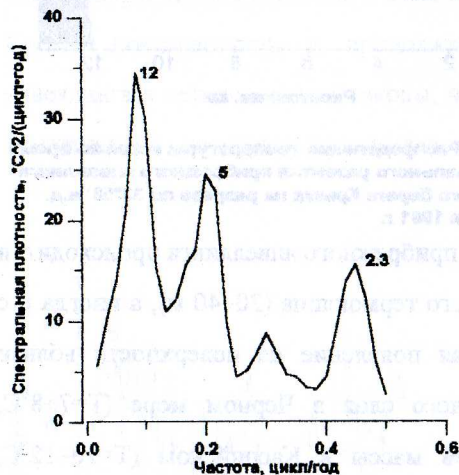


Рис. 3. Спектр межгодовых колебаний среднемесячной поверхностной температуры воды в августе у восточного берега Среднего Каспия. Бекдаш.

и 2+3 лет (рис. 3). Причина выделенных четких межгодовых колебаний температуры воды по-видимому связана с сильным откликом моря в зоне сезонного апвеллинга на крупномасштабные атмосферные процессы.

Третья глава заканчивается сравнением структуры апвеллинга Черного и Каспийского морей между собой и с апвеллингом в других прибрежных районах Мирового океана. Прибрежный апвеллинг в исследуемых морях

В предпоследнем разделе главы описывается, впервые обнаруженная, межгодовая изменчивость сезонного апвеллинга у восточного берега Среднего Каспия. В качестве индикатора сезонного апвеллинга взяты среднемесячные значения поверхностной температуры воды в июне, июле и августе. Были выделены резко выраженные колебания с периодами 10÷12, 4+5

отличается от океанского меньшими пространственными масштабами, подъемом вод со значительно меньших глубин и большей интенсивностью. Сезонный апвеллинг у восточного берега Среднего Каспия - аналог сезонного апвеллинга у западных побережий материков.

Некоторые задачи математического моделирования для объяснения отдельных механизмов формирования структуры апвеллинга в Черном и Каспийском морях рассмотрены в четвертой главе. Были рассчитаны наиболее благоприятные для образования прибрежного апвеллинга направления ветров. Оказалось, что они в некоторых случаях не совпадают с вдольбереговым. Также показано, что наличие вдольберегового градиента глубины моря $\frac{\partial H}{\partial y}$ может приводить к возникновению подповерхностного вдольберегового противотечения. Кроме того, исследовалось влияние пространственно-временных колебаний полей ветра на структуру прибрежного апвеллинга. На основе двухслойной модели течений, предложенной в работе [Csanady, 1982], построена номограмма для прогноза возникновения прибрежного апвеллинга. Предложенные модели адекватно объясняют образование, структуру и изменчивость прибрежного апвеллинга.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в настоящей работе:

- На основе обобщения данных натурных наблюдений и теоретических исследований прибрежного апвеллинга впервые получена подробная характеристика этого природного явления, выявлены возможные причины его возникновения и изменчивости.
- Разработаны методы определения скоростей вертикальных течений в зоне апвеллинга при отсутствии прямых инструментальных наблюдений, а также линейная диагностическая модель расчета течений, дающая результаты адекватные натурным данным.

- На количественном уровне подтверждено ветровое происхождение прибрежного апвеллинга в Черном и Каспийском морях. Выделены два основных вида апвеллинга: синоптический, возбуждаемый либо вдольбереговым ветром, либо сильными ветрами с суши, и сезонный, у восточного берега Среднего Каспия.
- Оценены пространственно-временные параметры апвеллинга в Черном и Каспийском морях, показано его влияние на гидрологическую структуру вод в районах подъема вод.
- На основе данных натуральных наблюдений проанализированы особенности циркуляции вод и оценены вертикальные скорости в зоне апвеллинга в исследуемых морях.
- Выявлена межгодовая изменчивость сезонного апвеллинга у восточного берега Среднего Каспия, предложен возможный механизм ее формирования.
- Разработаны математические модели адекватно представляющие основные факторы, формирующие структуру апвеллинга и определяющие его изменчивость.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. *Апвеллинг в пограничных областях океана* // Препринт, МГИ АН УССР, 1987, 46 с. (совместно с Еремеевым В.Н., Ивановым В.А.).
2. *Классификация и некоторые особенности апвеллинга в пограничных областях Мирового океана* // III съезд советских океанологов. Секция физика и химия океана. Полярная и региональная океанология. Л., Гидрометеиздат, 1987, с.34-35 (совместно с Ивановым В.А.).
3. *Структура течений прибрежного апвеллинга в замкнутых водоемах* // III съезд советских океанологов. Секция физика и химия океана.

- Полярная и региональная океанология. Л., Гидрометеиздат, 1987, с.36-37 (совместно с Осычным В.И.).
4. *Структура, динамика и изменчивость вод в шельфовых зонах Черного моря* // III съезд советских океанологов. Секция физика и химия океана. Полярная и региональная океанология. Л., Гидрометеиздат, 1987, с.32-34 (совместно с Баклановской В.Ф. и др.).
 5. *Комплексный статистический анализ структуры вод* // Перспективные методы планирования и анализа экспериментов при исследованиях случайных полей и процессов. М., 1988, с.73-74 (совместно с Ивановым В.А., Страчуком И.К.).
 6. *Моделирование баротропных сейш в южных морях* // Моделирование гидрофизических процессов и полей в замкнутых водоемах и морях. М., Наука, 1989, с.104-117 (совместно с Ивановым В.А., Николаенко Е.Л.).
 7. *Особенности структуры и динамики прибрежного апвеллинга в Каспийском море* // Каспийское море. Структура и динамика. М., Наука, 1990, с.61-74.
 8. *Алгоритмы и программы на Фортране по обработке океанологической информации* // М., МГУ, 1992, 83 с.
 9. *Водные массы* // Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том VI. Каспийское море. Вып.1, СПб, Гидрометеиздат, 1992, с.117-124 (совместно с Косаревым А.Н.).
 10. *Структура и динамика прибрежного апвеллинга* // Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря. Глава 3. Киев, Наукова Думка, 1992, с.30-76 (совместно с Блатовым А.С., Ивановым В.А.).
 11. *Особенности циркуляции вод у восточного берега Среднего Каспия* // Водные ресурсы, 1992, № 6, с.36-43 (совместно с Ведевым Д.Л., Косаревым А.Н., Бондаренко А.Л.).

12. *Об интерполяции океанологических полей* // Вест.Моск.ун-та, сер.5, география, 1994, № 3, с.64-70 (совместно с Баулиным А.В.).
13. *T,S-анализ вод Черного моря* //Океанология, 1994,т.34, № 2, с.178-192 (совместно с Мамаевым О.И., Тужилкиным В.С.).
14. *Coastal upwelling in the Black and the Caspian Seas* // J. Annales Geoph., part I, suppl. to v.13, 1995,p.237.
15. *Стерические колебания уровня Черного моря* // Океанология, 1995, т.35, № 6, с. (совместно с Бережным В.Ю.).
16. *Circulation of waters near east coast the Caspian Sea during coastal upwelling* // J. Annales Geoph., part II, Suppl. to v.14, 1996. p.410.

В.С. Тужилкин

Издательство "Наука"
117912, Москва, М-77, ул. Вавилова, 9
Тел. (095) 251-1515, 251-1516, 251-1517
Факс (095) 251-1518, 251-1519, 251-1520
E-mail: nauka@yandex.ru