

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ
ГИПОКСИИ НА СЕВЕРО-
ЗАПАДНОМ ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО
МОРЯ С ПОМОЩЬЮ
БЕЗМЕМБРАННОГО
КИСЛОРОДНОГО ДАТЧИКА**

*Ю.И. Попов, И.Г. Орлова,
А.П. Стунжас, В.В. Украинский*

Украинский Научный центр экологии
моря Минприроды Украины
г.Одесса, Французский бульвар, 89;
Институт океанологии имени
П.П.Ширшова, РАН,
г. Москва, ул. Красикова, 23
E-mail: uropov@te.net.ua

Рассмотрены физические аспекты механизма формирования и развития внутри- и подпикноклиной гипоксии в водах северо-западного шельфа Черного моря.

Введение. Эвтрофикация и связанное с ней нарушение кислородного режима являются одними из наиболее неблагоприятных факторов в жизнедеятельности экосистемы северо-западного шельфа (СЗШ) Черного моря. Ежегодное обескислороживание глубинных вод в значительной мере разрушило экосистему обширного шельфа, обладавшего ранее богатым биологическим разнообразием. Процесс, активно начавшийся в 70-х годах, продолжается и в настоящее время. Соответственно и исследования проблемы гипоксии и аноксии в водах СЗШ имеют давнюю историю. Однако до сих пор нет полной ясности механизмов развития этого процесса.

Цель настоящей работы – изучение механизмов формирования гипоксии и аноксии промежуточно-глубинных (подпикноклиных) вод СЗШ на основании данных, полученных с использованием безмембранного кислородного датчика.

Материалы и методика исследования. В основу анализа положены результаты 23 экспедиционных рейсов, выполненных Украинским центром экологии моря (УкрНЦЭМ) в 2000 г.

Основной объем работ по исследованию процессов развития и распростра-

нения гипоксии выполнен на НИС «Георгий Ушаков». Наблюдения производились на стандартных разрезах из восьми комплексных станций (рис.1). Базовым разрезом являлся разрез 1. Разрезы 2 и 3 выполнялись на завершающей фазе пространственного распространения гипоксии для определения ее восточной границы.

На других НИС УкрНЦЭМ («Владимир Паршин», «Юг») выполнены съемки, охватывающие узкую прибрежную зону от п. Ильичевск до п. Южный (с пространственным разрешением 3-5 миль), два взаимно перпендикулярных разреза: широтный – в приустьевой зоне Дуная и меридиональный – в центральных районах северо-западной части Черного моря (СЗЧМ)

Комплекс гидрофизических наблюдений выполнялся с использованием зондирующих комплексов «Гидрозонд», «Катран» и «Катран-06». С 1999 года, в опытно-производственную эксплуатацию был задействован канал непрерывной регистрации вертикального распределения содержания растворенного в воде кислорода с использованием открытого (безмембранного) датчика. Последний был разработан на базе трехэлектродной схемы, в которой под действием внешнего потенциала 0.8 вольт происходит восстановление кислорода на катоде (рабочем электроде – Pt или Au). Это напряжение приложено к аноду (Ni) и поддерживается постоянным посредством электрода сравнения (Ag/AgCl). Потенциал рабочего электрода практически нулевой. Ток рабочего электрода пропорционален числу молекул кислорода, прошедших через погранслою электрода, т.е. парциальному давлению кислорода. Толщина погранслоя должна поддерживаться постоянной, для чего скорость обтекания датчика водой должна быть равномерной. В качестве нулевого раствора для получения одной из калибровочных точек использовался 2% раствор Na₂SO₃. Для реализации условий относительно равномерного и ламинарного обтекания измерительных датчиков потоком воды, датчик кислорода помещался в тонкостенную винилпластовую трубку.

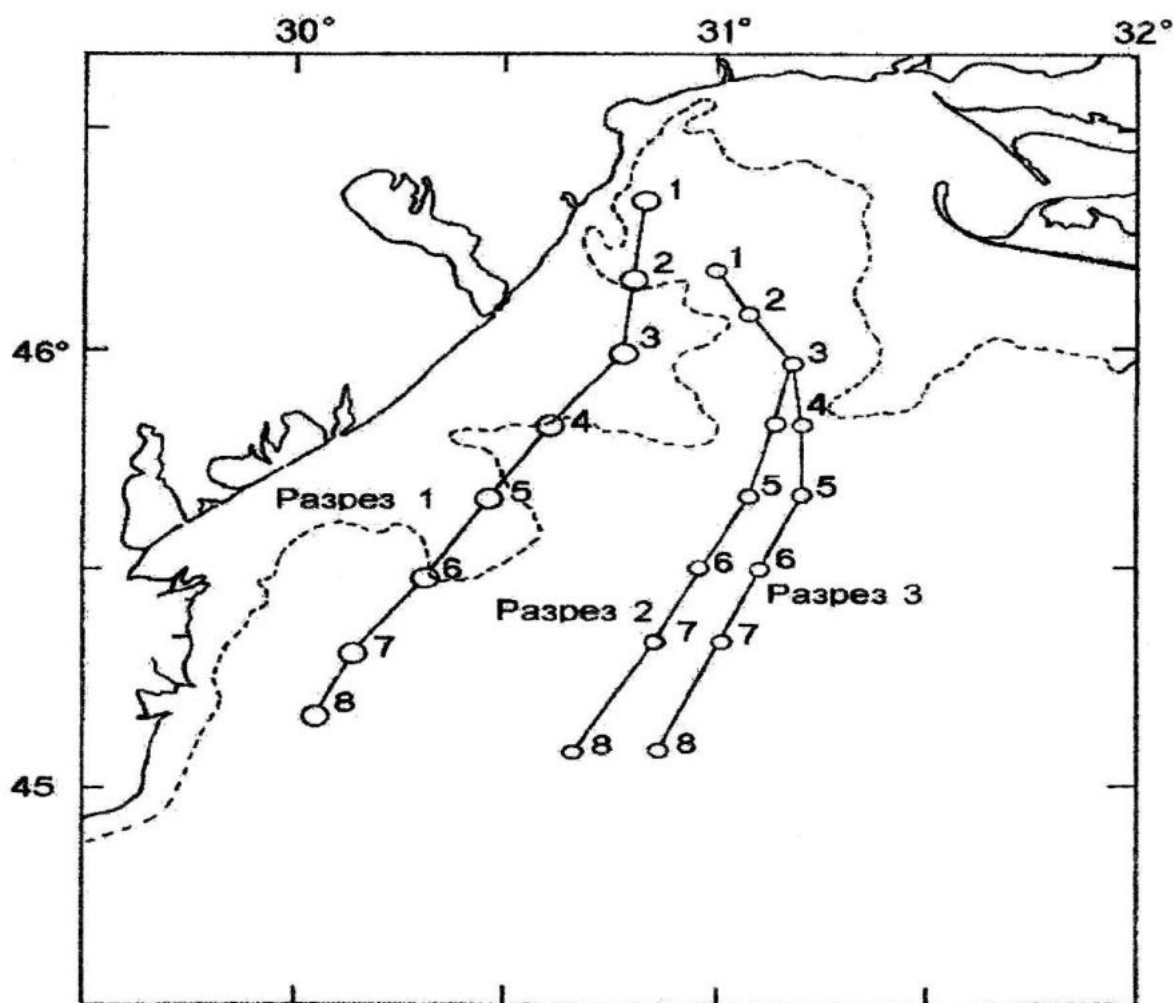


Рис.1— Расположение разрезов комплексного экологического мониторинга УкрНЦЭМ в 2000 году (НИС «Георгий Ушаков»)

Датчик был включен в схему зондирующего комплекса «Катран-06» вместо штатного рН - датчика. Выходной сигнал датчика кислорода фиксировался в памяти ПК в исходных кодах. Выход на реальные значения насыщения кислорода производился после расчета линейной регрессионной зависимости между выходными кодами и насыщением растворенного в воде кислорода. Реальное насыщение кислорода в пробах морской воды, синхронно отобранных на опорных горизонтах океанографических станций, определялось с использованием стандартного метода Винклера.

Обсуждение результатов. Анализ внутригодовых изменений вертикальной термохалинной структуры на каждой из восьми станций стандартного разреза показывают почти полную синхронность протекающих процессов. Период наибольшей энthalпии вод верхнего слоя приходится на период с первой декады

июня до второй декады сентября. Отмечается два максимума – слабый в первой половине июня, когда температура поверхностных вод составляла 20-21°C, а толщина однородного слоя 7-10 метров, и второй более мощный - в августеначале сентября, при соответствующих характеристиках - 25-26°C и 15 метров. Последний параметр характеризует вертикальное положение верхней границы термоклина и, соответственно, пикноклина. В совокупности с глубиной нижней границы, эти характеристики являются одними из важнейших параметров при анализе гипоксийно-аноксийных процессов.

В течение всего зимне-весенне-летнего периода 2000 г. преобладали западные и северо-западные ветры разной интенсивности. Именно эти ветровые потоки ответственны за волновой характер изменений положения пикноклина в те-

чение периода его существования. Они же определяют местоположение, границы и, в целом, перераспределение водных масс по акватории шельфа, а, следовательно, в значительной мере формируют природные условия развития гипоксийно-аноксических явлений.

Первое упоминание о наличии внутриводного слоя аноксии и сероводородного заражения в водах СЗШ было сделано Толмазиным [1]. При выполнении съемки приустьевых вод Дуная [2], отмечался единственный случай внутриводного гипоксического случая внутриводного гипоксического случая. В 1996 г. нами отмечено длительное существование в нижней части сезонного пикноклина и непосредственно под ним значительно более жестких гипоксийно-аноксических условий, чем в водах придонного слоя. В дальнейшем (1998-2000 гг.) этот факт был подтвержден результатами массовых наблюдений УкрНЦЭМ [3,4].

Так, в теплое полугодие 1999 г. в на 70 станций (с существованием нижнего квазиоднородного слоя вод), выполненных стандартными методами дискретного отбора проб, на 43 из них (62%) присутствовал промежуточный внутри- или подпикноклиновый минимум содержания кислорода.

Рассмотрим результаты наблюдений на разрезах №1 и №2 (см. рис. 1), полученных в тот же период 2000 г. с применением вышеописанного датчика кислорода.

Характерной особенностью вертикального распределения кислорода на разрезе №1 является наличие хорошо выраженного слоя кислородного минимума, расположенного под слоем сезонного пикноклина на станциях с глубинами места более 20 метров (рис.2 а). На станциях в Одесской котловине (№№ 1 и 2) отмечено предгипоксическое состояние. На двух станциях придунайского региона (№№ 7 и 8), в двух-трех метровом слое вод, расположенном непосредственно под распресненными поверхностными водами дунайского происхождения, наблюдался промежуточный слой полного отсутствия кислорода. На станции №8 (с двойным скачком плотности) под нижней ветвью пикноклина, обусловленной вторым и более глубоким, чем соленостный, скачком температуры, располагался еще

один минимум кислорода с уровнем предгипоксического состояния. Подпикноклиновая гипоксия отмечалась и на северо-восточной оконечности пересеканного разрезом поднятия (станция №3). Из-за низко расположенного пикноклина, этот слой вод уже не промежуточный, а придонный.

Разрез №2, выполненный в начале сентября (см. рис.1) характеризовал период наиболее активного развития гипоксийно-аноксических процессов в более глубоких районах западной половины СЗШ. Гипоксия на разрезе присутствовала в подпикноклиновом слое на всем протяжении разреза (рис.2 б).

Экстремумы минимального содержания кислорода на всех семи станциях отмечались в нижней части пикноклина или непосредственно под пикноклином. На станциях №№ 1,3 и 8 в указанном слое кислород полностью отсутствовал, а на станции №3 имело место сероводородное заражение (1.7 мг/л).

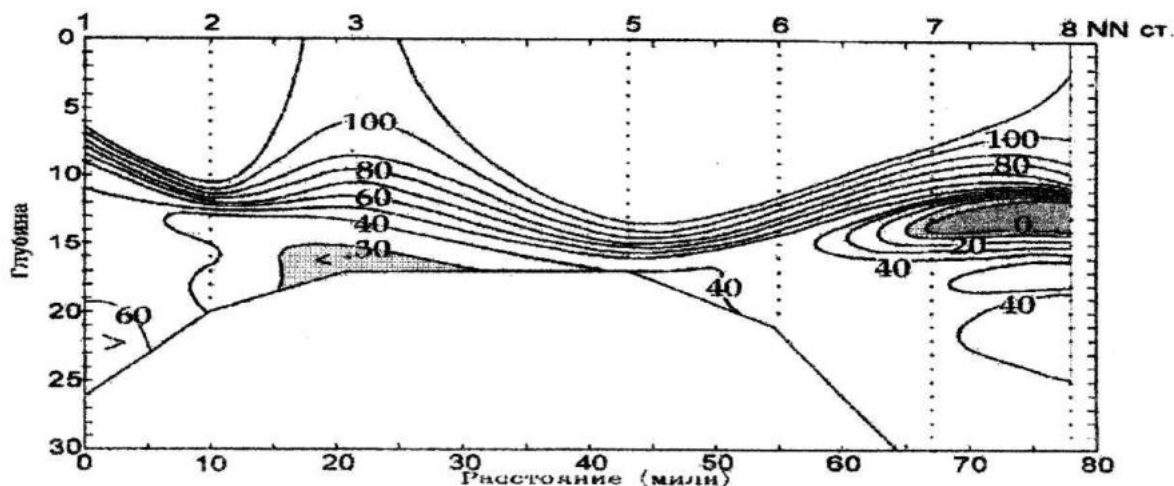
На станциях №№ 4 и 5 насыщение кислорода в подпикноклиновом слое было менее 5%. На станциях №№ 1,4 и 5, где нижняя граница пикноклина опустились до расстояния 6-9 м от дна, подпикноклиновые минимумы кислорода являются одновременно и придонными. На станции № 6, расположенной к востоку от склона Днестровского поднятия, судя по глубокому на разрезе прогибу пикноклина, размытости пикноклина, оксиклина и тонкоструктурных особенностей вертикального распределения кислорода в нижнем подпикноклиновом слое, можно предположить влияние локального антициклонического вихреобразования.

На станциях №№ 1-5 и 8 максимальные вертикальные градиенты в оксиклине достигают 40-60% насыщения на метр и располагаются, как правило, в верхней части пикноклина, что может свидетельствовать о большом скоплении в пикноклине легко окисляющегося органического вещества и, одновременно, о слабом проникновении в пикноклин кислорода из верхнего аэрированного слоя.

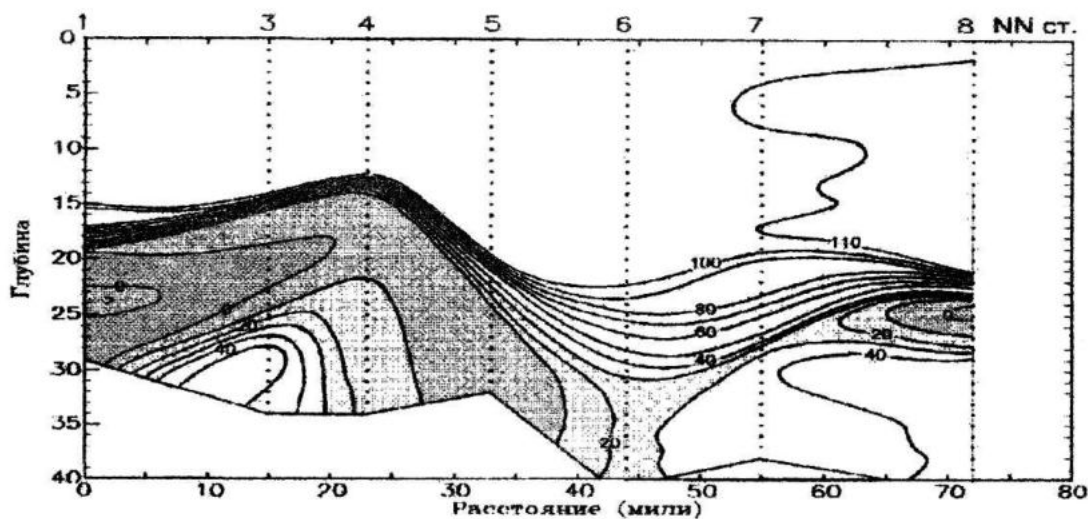
За 2.5-месячный период между выполнением рассматриваемых разрезов подпикноклиновый слой гипоксии в северной части разреза (одесская котловина и ее выходное гирло) расширился в глубину до 8-10 метров, а в южной части

разреза имел примерно те же характеристики, что и на разрезе №1. Южная часть разреза №2 располагалась на западной периферии крупномасштабной циклонической системы СЗШ, наиболее стационарной в глубинных слоях. Циркуляционное обновление глубинных вод постоянно подтачивает снизу промежуточный кислородный минимум и не дает ему распространяться на глубины. Западнее, в районе от о. Змеиный до устья Дуная (южная часть разреза №1), глу-

бинная динамика существенно ослаблена из-за расположенного к северу юго-восточного гребня Днестровского поднятия, поэтому здесь распространение подпикноклиновой гипоксии происходит также, как и в Одесской котловине. В начале августа в придонных водах района о. Змеиный начался период гипоксии, а еще через месяц наступил кратковременный период полного отсутствия кислорода.



А



Б

Рис.2- Распределение растворенного в воде кислорода на вертикальных разрезях: А) №1 (10-11 июня 2000 г.) и Б) №2 (2-3 сентября 2000 г.).

Возникновение промежуточно-глубинного слоя обескислороженных вод зависит от нескольких наиболее важных факторов. Во-первых, от эвтрофированности и характера распределения трансформированных вод речного стока; во вторых, от биомассы, таксономии и, соответственно, плотности осаждающе-

гося фитопланктона; в третьих, от термического состояния вод поверхностного слоя; в-четвертых, от летних ветроволновых условий; и, наконец, - от плотности глубинных вод, сформированных в предшествующий зимний сезон.

Характер распределения трансформированных вод речного стока по

акватории северо-западного шельфа в значительной мере определяется ветровыми потоками в приводной атмосфере. Ветры западных румбов приводят к расширению зоны влияния вод речного стока в восточные районы шельфа, восточные – вызывают аккумуляцию и перенос речных вод вдоль западного побережья СЗЧМ. Анализ ветровых потоков северных областей СЗЧМ за последние семь лет показал, что, как и ранее, основной особенностью режима является преобладание ветров с западной и северо-западной составляющими. Особенно выражено это проявляется в зимние и весенние периоды года.

В 2000 году, длительная работа ветров западной четверти в период с января по июнь, привела к ситуации, когда мелководная черноморская водная масса распространилась далеко на восток, охватывая практически всю акваторию СЗЧМ севернее 45° с.ш. Вместе с речными водами распространяются и содержащиеся в них биогенные вещества, способствующие интенсивному развитию фитопланктона. Последующее отмирание и минерализация фитопланктона приводят, как известно, к развитию гипоксии.

Опускание вышедшего из биологического цикла планктона в пикноклине и в плотных водах глубинного слоя происходит с некоторым уменьшением вертикальной скорости. Определенные виды мертвого фитопланктона, имеют большую скорость опускания и эта часть органического вещества (ОВ) относительно быстро уходит в придонные слои, способствуя развитию придонных гипоксических процессов. Фитопланктон, осаждающийся медленнее, концентрируется в пикноклине и под ним. При очень низких скоростях осадения может происходить существенное окисление ОВ в слое нижней части пикноклина. Далее фитопланктон осаждается уже в значительной мере минерализованным. По истечении определенного времени в нижней части пикноклина и непосредственно под ним создается тонкий слой полного отсутствия кислорода и последующего сероводородного заражения. Проходя этот слой, детрит вновь попадает в кислородную среду и продолжает окисляться. Соответственно заглубляется и нижняя граница слоя

кислородного минимума.

В целом, в течение летнего периода толщина промежуточного слоя кислородного минимума расширяется. Но этот процесс не однозначен. Вертикальная мощность слоя может эпизодически, как расширяться, так и сужаться, в зависимости от изменений ветровых и волновых условий на поверхности моря и термического состояния верхнего слоя вод. В штилевых условиях на поверхности моря опускание пикноклина и, соответственно, верхней границы слоя кислородного минимума, происходит медленно, в основном за счет температурной и солевой диффузии и ослабленного турбулентного перемешивания. В этих условиях может происходить расширение гипоксического слоя. Усиление ветрово-волнового перемешивания приводит к более интенсивному заглублению пикноклина и поступлению кислорода в верхнюю часть ранее обескислороженного слоя. Т.е. происходит не опускание вод как таковых, а постепенное изменение всего комплекса свойств вертикальной структуры воды.

По мере заглубления пикноклина неблагоприятный газовый режим в вертикальной структуре вод распространяется ко дну, создавая придонные заморы. В процессе дальнейшего опускания пикноклин исчезает вообще, водная толща становится однородной и кислород вновь поступает в придонные слои. Время протекания процесса полного «осаждения» пикноклина зависит от глубины места. Поэтому в придонном слое отмечается своеобразная пространственно - временная волна изменения термохалинных и газовых свойств вод, распространяющаяся от прибрежных районов в открытые глубокие районы шельфа. В районах с глубинами более 40 метров гипоксический слой может так и не достичь дна, оставаясь до начала своего полного уничтожения в результате осенне-зимней конвекции, промежуточным слоем.

Значительный урон донной фауне и флоре прибрежной зоны приносят эпизодические повторения гипоксических условий. Происходит это в периоды действия продолжительных или сильных сгонных ветров. Поверхностный азрированный слой вод сгоняется в открытые районы шельфовой зоны, а на их

место поступают воды из нижней части пикноклина. Эти воды располагаются непосредственно под слоем ветрового трения и представляют собой основную массу компенсационного потока. Рецидивные проявления неблагоприятного газового режима в прибрежных водах проявляются почти ежегодно до 1-3 раз в год. Так, например, в начале июня 2000 года отмечалось местное развитие предгипоксического состояния прибрежных вод, а в середине и конце июня произошло два случая резкого ухудшения газового состояния вод, вызванное внедрением подпикноклиновых вод с мощным сероводородным заражением.

Выводы. Летне-осенние наблюдения последних лет позволяют предположить, что основным механизмом формирования гипоксично-аноксичных условий в глубинных слоях вод СЗШ является поэтапный процесс развития внутри и подпикноклинового промежуточного слоя кислородного минимума, его расширение в глубинную часть и одновременное опускание с пикноклином ко дну. При развитии сгонных явлений, воды вышележащего слоя могут быть источником рецидивной гипоксии в прибрежных районах шельфа. При этом важную роль в развитии гипоксично-аноксичных условий играют природные физические процессы в атмосфере и морской среде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толмазин Д.М. Гидролого-гидрохимическая структура вод в районах гипоксии и заморозов северо-западной части Черного моря// Биология моря, 1977. – Вып.43. – С.12-16.
2. Кондратьев С.И., Внуков Ю.Л. Структура вертикального распределения кислорода в водах приустьевых взморья Дуная в осенний период 1997 года// Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ, 1999. – С.125-137.
3. Украинский В.В., Попов Ю.И., Орлова И.Г., Дерезюк Н.И., Балатюк С.В., Танасюк Е.Г. Изменчивость кислородного режима и гидрологической структуры вод северо-западного шельфа Черного моря в летне-осенний период 1988 года// Метеорология, климатология и гидрология 2001.-№43.- С. 211-222.
4. Науково експедиційна діяльність Українського наукового центру екології моря у 2000 році та оцінка сучасного стану Чорного та Азовського морів (Огляд). №6. Вид. ТЭС, Одеса, 2001. -29 с.