

Ю. С. ТУЧКОВЕНКО, С. А. ДОЦЕНКО,
В. А. НИКАНОРОВ, П. Т. САВИН

**РОЛЬ ВЕТРОВОГО ПРИБРЕЖНОГО АПВЕЛЛИНГА
В ВОЗНИКНОВЕНИИ ГИПОКСИИ В ОДЕССКОМ РЕГИОНЕ
СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ**

На основе данных двенадцатилетнего (1988 - 1999 гг.) гидрохимического и гидрологического мониторинга обнаружена связь явления ветрового прибрежного апвеллинга с развитием придонной гипоксии в прибрежной зоне Одесского региона северо-западной части Черного моря.

С начала 70-х годов в северо-западной части Черного моря (СЗЧМ) летом (июнь–сентябрь) систематически отмечаются гипоксийно-аноксийные явления, приводящие к возникновению заморов в придонном слое и гибели организмов бентоса. Рассмотрению причин возникновения и развития этого явления посвящено достаточно много работ, например [1, 3, 6, 7, 10, 11]. Главной причиной возникновения гипоксии общепризнанно считается эвтрофикация акватории СЗЧМ, обусловленная значительным ростом поступления в морскую среду биогенных и органических веществ в результате хозяйственной деятельности человека. Основными климатическими факторами, которые способствуют возникновению гипоксии, являются образование сезонного пикноклина и ослабление ветровой деятельности в летний период года.

В настоящей работе обсуждается вклад в возникновение гипоксии инициируемых ветром сгонных эффектов и апвеллинга придонных вод в прибрежной зоне моря. Впервые на роль этого фактора в развитии гипоксии в СЗЧМ указал еще в 1977 г. Д. М. Толмазин [8]. Предложенная этим исследователем концепция заключается в том, что в результате сгонов происходит подвижка вод придонного слоя с уже развитым дефицитом кислорода в богатую жизнью прибрежную зону, что инициирует массовую гибель организмов бентоса, потребление на биохимическое окисление их остатков последних запасов кислорода и, как следствие, переход гипоксии в аноксию. Таким образом, согласно этой гипотезе, роль сгонных явлений вторична. Они лишь усугубляют гипоксию, уже развившуюся в придонном слое глубоких районов шельфа СЗЧМ, до аноксии в прибрежных мелководных районах.

В дальнейшем исследователи придерживались этой концепции либо просто упоминали роль сгонно-нагонных эффектов в развитии гипоксии в СЗЧМ без описания механизма этого воздействия.

Авторы настоящей статьи на основе анализа гидролого-гидрохимического мониторинга Одесского региона СЗЧМ, выполнявшегося в 1988 – 1999 гг., пришли к выводу, что связь сгонных явлений и придонной гипоксии в летний период года более значима, чем это принято считать. Возможно, ветровые сгоны не углубляют, а инициируют развитие гипоксийных и аноксийных явлений в придонном слое указанного района.

Данные мониторинга свидетельствуют, что гипоксийные явления в придонном слое Одесского региона, как правило, имеют место в августе и сентябре. В частности, дефицит кислорода был зафиксирован во время съемок в августе 1988, 1990, 1994, 1998 гг. и в сентябре 1999 г. Никакие признаки гипоксии не прослеживались в августе 1992, 1993, 1995 гг. и в сентябре 1997 г. Этот факт свидетельствует, что эвтрофирование вод и развитие сезонного пикноклина не являются достаточными условиями для возникновения гипоксии в исследуемом районе.

Сравнительный анализ пространственного распределения содержания кислорода и температуры воды показал, что в четырех из перечисленных выше пяти случаев, когда по данным мониторинга был отмечен дефицит кислорода, очагам гипоксии в придонном слое в большинстве случаев соответствовали очаги минимальной температуры воды в поверхностном слое (рис. 1–2 а, б). Причем области минимальных значений температуры поверхностных вод и придонного содержания кислорода всегда прилегают к

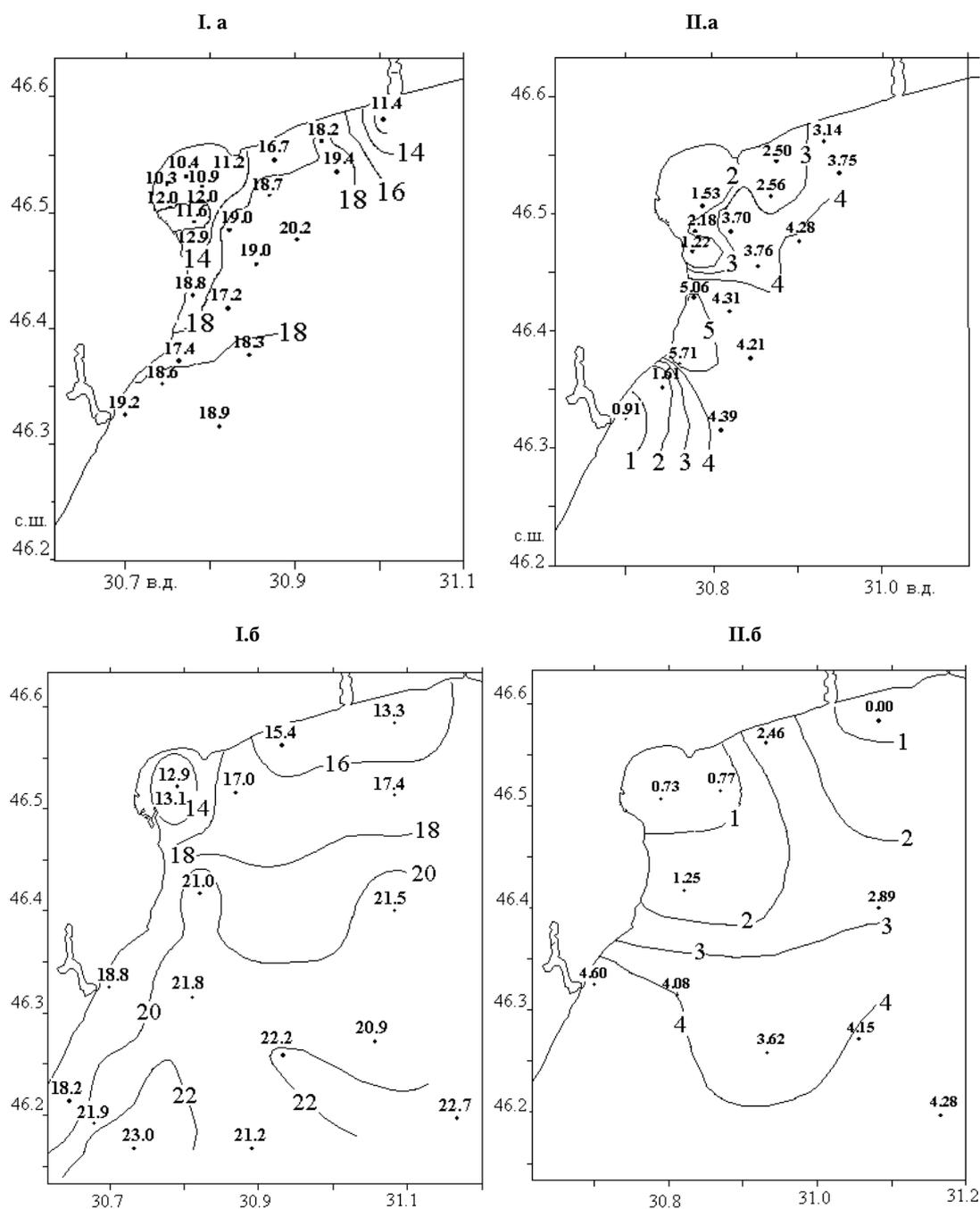


Рисунок 1. Пространственное распределение температуры воды ($^{\circ}\text{C}$) в поверхностном слое (I) и концентрация растворенного кислорода (мг/л) в придонном слое (II) в августе 1988 (а) и 1990 (б) годов

Figure 1. Spatial distribution of water temperature ($^{\circ}\text{C}$) in a superficial layer (I) and concentration of the dissolved oxygen (mg/l) in a benthic layer (II) in August 1988 (a) and 1990 (b)

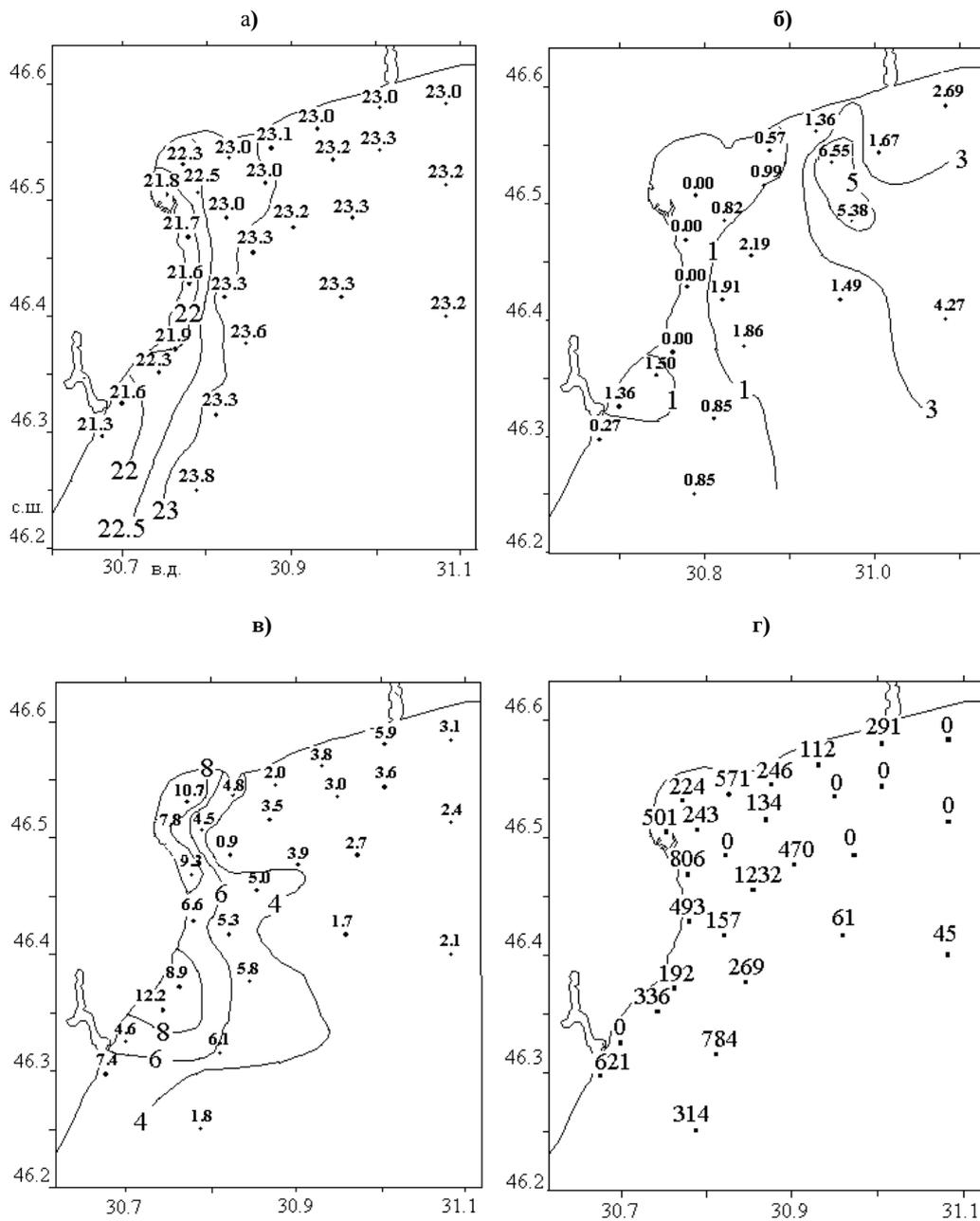


Рисунок 2. Пространственное распределение: а) температуры воды ($^{\circ}\text{C}$), в) концентрации хлорофилла a (mg/m^3), г) чистой продукции фитопланктона ($\text{mgC}/\text{m}^3\text{сут}$) в поверхностном слое и концентрации растворенного кислорода (mg/l) в придонном слое (б) в августе 1994 г.

Figure 2. Spatial distribution of a) temperature of water ($^{\circ}\text{C}$), c) concentration of the chlorophyll a (mg/m^3), d) phytoplankton net production ($\text{mgC}/\text{m}^3\text{day}$) in a superficial layer and concentration of the dissolved oxygen (mg/l) in a benthic layer (b) in August 1994

береговой зоне и имеют характер локальных очагов, которые вытянуты относительно узкой полосой вдоль западного либо северного побережья района.

Причина образования расположенных вдоль берега областей пониженной температуры воды в летний период года может быть только одна – стонные явления и прибрежный апвеллинг придонных вод. Подтверждением этого является соответствие областям пониженной температуры поверхностных вод повышенных значений солености, формируемых в результате подтока более соленых вод из придонного слоя, а также независимые данные наблюдений за температурой воды, уровнем моря, направлением и силой ветра, выполненные в соответствующие моменты времени Геофизической обсерваторией Одесского государственного экологического университета. Согласно этим данным, в период проведения съемок, зафиксировавших гипоксию, на прибрежной станции отмечались все признаки стога поверхностных вод: понижение температуры воды и отметки уровня моря при доминировании слабых северных и северо-западных ветров. Заметим, что стоны поверхностных вод в Одесском регионе СЗЧМ наблюдаются именно при этих направлениях ветра.

Таким образом, прослеживается явная связь гипоксии со стонными явлениями и прибрежным апвеллингом. В пользу гипотезы о том, что именно стонные явления инициируют возникновение гипоксии говорят следующие факты: зоны развития гипоксии в придонном слое имеют локальный характер и расположены вдоль прибрежной полосы, в то время как в более глубоких частях исследуемой области никаких признаков гипоксии не наблюдается. Это свидетельствует о том, что гипоксия в придонном слое образуется непосредственно в зоне апвеллинга, а не привносится извне в результате адвекции обедненных кислородом придонных вод из более глубоких областей. Хотя последний механизм образования гипоксийных зон в исследуемом районе также имеет место, о чем свидетельствуют данные съемки в сентябре 1999 г., когда стонные явления не наблюдались, но в то же время была зафиксирована область дефицита содержания кислорода в глубокой мористой части исследуемого района.

Следует отметить, что в поле температуры поверхностных вод слабые следы стонных явлений наблюдались и во время съемок, когда не была зафиксирована гипоксия в придонном слое (например, в августе 1992 и 1995 гг.). Однако эти очаги пониженной температуры имеют сугубо локальный характер и слабо выражены (разница значений температуры не превышает $1,5 - 2,0^{\circ}\text{C}$). Следовательно, не каждая стонная ситуация приводит к возникновению гипоксии, либо гипоксия развивается лишь на определенной фазе стонных явлений и зависит от их предыстории.

В момент стога в прибрежной зоне моря шириной около 5 км происходит выклинивание термоклина к поверхности моря. При этом в поверхностный фотический слой поступают холодные, относительно прозрачные, обогащенные минеральными формами азота и фосфора глубинные воды. Следствием этого процесса является резкое возрастание первичной продукции фитопланктона и его биомассы в зоне температурного фронта. Кроме того, во время действия стонных ветров сильно загрязненные биогенными элементами и органическим веществом прибрежные воды пляжной и портовой зоны Одессы смещаются в более глубокие районы шельфового склона [2], где имеется сезонный пикноклин и, следовательно, существуют все условия для развития гипоксии под слоем пикноклина. По мере ослабления стонного эффекта образовавшаяся биомасса водорослей под действием возвратных поверхностных течений будет смещаться в сторону берега (рис. 2 в, г). После окончания стога и восстановления сезонного пикноклина происходит массовая гибель фитопланктона и снижение его биомассы до характерных для мористых частей СЗЧМ значений. Мертвое органическое вещество опускается в придонный слой прибрежной полосы, где и происходит его биохимическое окисление.

Согласно многолетним данным ГМС Одесса-порт, повторяемость стонных ветров северного и северо-западного направлений в период с июля по сентябрь составляет в сумме 34 – 40 % [5], т. е. стоны поверхностных вод происходят в Одесском регионе СЗЧМ систематически и довольно часто. Учитывая, что в августе речной сток минимален, можно предположить, что летом вклад стонных явлений в обогащение вод фотического слоя биогенными элементами может быть сравним с речным стоком [4].

В результате систематических сгонов и прибрежного апвеллинга в прибрежной зоне моря происходит интенсивная аккумуляция органического вещества в донных отложениях, что в конечном итоге приводит к возникновению и развитию гипоксии и аноксии в придонном слое. Следовательно, прибрежная 5-километровая зона Одесского региона СЗЧМ может рассматриваться в качестве такого же очага первоначального развития гипоксии, как и приустьевые области СЗЧМ. На то, что первоначальные области придонной гипоксии в СЗЧМ фиксируются именно в прибрежных участках акватории, указывали и другие авторы [1, 8, 12].

Согласно [12], промежуточный сероводородный слой образуется в прибрежной полосе в зоне примыкания к свалу глубин пикноклина. При нагонных ветрах этот слой смещается от подводного склона в сторону моря в результате подтока более богатых кислородом вод и мигрирует под пикноклином в виде линзы. Понятно, что при смене нагонных ветров на сгонные ранее образовавшаяся в промежуточном слое линза гипоксических либо аноксических вод может мигрировать обратно в сторону берега и выклиниваться поперек свала глубин к поверхности в прибрежной зоне. Такой характер миграции линзы под пикноклином частично объясняет совпадение областей пониженной температуры в поверхностном слое и гипоксии в придонном слое на тех прибрежных станциях, глубина которых соответствует глубине пикноклина. Кроме того, эта схема хорошо согласуется с информацией [9] о том, что на начальных стадиях развития гипоксии в СЗЧМ минимум в вертикальном распределении кислорода наблюдается непосредственно в нижней части пикноклина, а не у дна, как считалось ранее [2].

Первичный анализ изменчивости ветровых условий показал, что четырем упомянутым выше съемкам, когда области прибрежного апвеллинга и гипоксии совпадали, в отличие от остальных случаев, соответствовали довольно длительные (5 – 10 сут) периоды доминирования сгонных ветров. Причем наиболее развитая и обширная зона гипоксии соответствует заключительной фазе сгона (август 1994 г., рис. 2). Следовательно, можно предположить, что в период продолжительного сгона происходит развитие либо углубление гипоксии в придонном слое, вызванное дополнительным поступлением мертвого органического вещества из прибрежной зоны, а также гибелью организмов прибрежной зоны в результате шока при резкой смене условий обитания (температуры воды, pH и т.д.).

В заключение заметим, что климатическое поле распределения температуры воды в поверхностном слое СЗЧМ в летний период характеризуется пониженными значениями температуры вдоль западного и северного побережья этого района, что является результатом систематического развития сгонных эффектов в этих областях. Следовательно, сгонные явления могут играть гораздо более важную, чем это принято считать, роль в возникновении и развитии летней придонной гипоксии не только в Одесском регионе, но и во всей северо-западной части Черного моря.

Таким образом, изучение сгонно-нагонных явлений в СЗЧМ и их влияния на гидрологический и гидрохимический режим акватории является актуальной задачей не только для обеспечения безопасности мореплавания и хозяйственной деятельности человека в прибрежной зоне, но и для сохранения биологических ресурсов моря, прогнозирования качества вод и функционирования экосистемы этого района Черного моря.

Авторы выражают искреннюю благодарность А. И. Скрипник и Е. В. Кирсановой за любезно предоставленную информацию о распределении хлорофилла *a* и продукции фитопланктона в августе 1994 г., а также В. Н. Большакову за полезные замечания при обсуждении статьи.

1. Берлинский Н. А. Механизм формирования придонной гипоксии в шельфовых экосистемах // Водные ресурсы. – 1989. – № 4. – С. 112 – 121.
2. Виноградова Л. А., Василева В. Н. Многолетняя динамика и моделирование состояния экосистемы прибрежных вод северо-западной части Черного моря. – С.-Пб.: Гидрометеиздат, УкрНЦЭМ, 1992. – 107 с.
3. Владимирцев Ю. А. О гидрологических условиях образования дефицита кислорода в северо-западной части Черного моря // Водные ресурсы. – 1983. – № 2. – С. 95 – 100.

4. *Гаркавая Г. П., Богатова Ю. И., Берлинский Н. А., Гончаров А. Ю.* Районирование Украинского сектора северо-западной части Черного моря (по гидрофизическим и гидрохимическим характеристикам) / Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ, ОФ ИнБЮМ НАН Украины, 2000. – С. 9 – 24.
5. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Том 4. Черное море. – Л: Гидрометеоиздат, 1986. – 99 с.
6. *Орлова И. Г., Белевич Р. Р., Попов Ю. И.* и др. Динамика гипоксических процессов в придонных водах северо-западного шельфа Черного моря // *Океанология.* – 1999. – **39**, № 4. – С. 548 – 554.
7. *Селин П. Ю.* Гидрохимические особенности гипоксично-аноксичных зон на северо-западном шельфе Черного моря. – Деп. ВИНТИ № 298–В88, ГОИН, Москва, 1988. – 34 с.
8. *Толмазин Д. М.* Гидролого-гидрохимическая структура вод в районах гипоксии и замороз северо-западной части Черного моря // *Биология моря.* – 1977. – № 43. – С. 12
9. *Украинский В. В., Попов Ю. И., Орлова И. Г.* и др. Изменчивость кислородного режима и гидрологической структуры вод северо-западного шельфа Черного моря в летне-осенний период 1998 года // *Метеорологія, кліматологія та гідрологія.* – 2001. – Вып. 43. – С. 211 – 221.
10. *Фацук Д. Я., Самышев Э. З., Себах Л. К., Шляхов В. А.* Формы антропогенного воздействия на экосистему Черного моря и ее состояние в современных условиях // *Экология моря.* – 1991. – Вып. 38. – С. 19 – 27.
11. *Фесюнов О. Е., Назаренко М. Ф.* Геоморфологические и экологические особенности гипоксии северо-западного шельфа Черного моря // *Экология моря.* – 1991. – Вып. 37. – С. 20 – 26.
12. *Savin P. T., Dozenko S. A.* Formation of hydrosulfuric layer under stratification layer // *The Black Sea ecological problems.* – Odessa: SCSEIO, 2000. – P. 254 – 257.

ОФ Института биологии южных морей НАН Украины,
г. Одесса

Получено 06.11.2002

Y. S. TUCHKOVENKO, S. A. DOCENKO, P. T. SAVIN, V. N. NIKANOROV

**ROLE OF WIND-DRIVEN COASTAL UPWELLING IN ORIGINATING OF HYPOXIA
IN THE ODESSA REGION OF THE NORTHWESTERN BLACK SEA**

Summary

On the basis of the data of hydrochemical and hydrological monitoring carried out within 12 years (1988 - 1999), the connection of a wind-driven coastal upwelling with development of the benthic hypoxia in the near-shore area of the Odessa region of the northwestern Black Sea is revealed.