

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 гипоксично-аноксичные 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 общепризнано 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 аноksии 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 гипоксичных и аноксичных явлений в придонном слое указанного района.

Данные мониторинга свидетельствуют, что гипоксичные 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

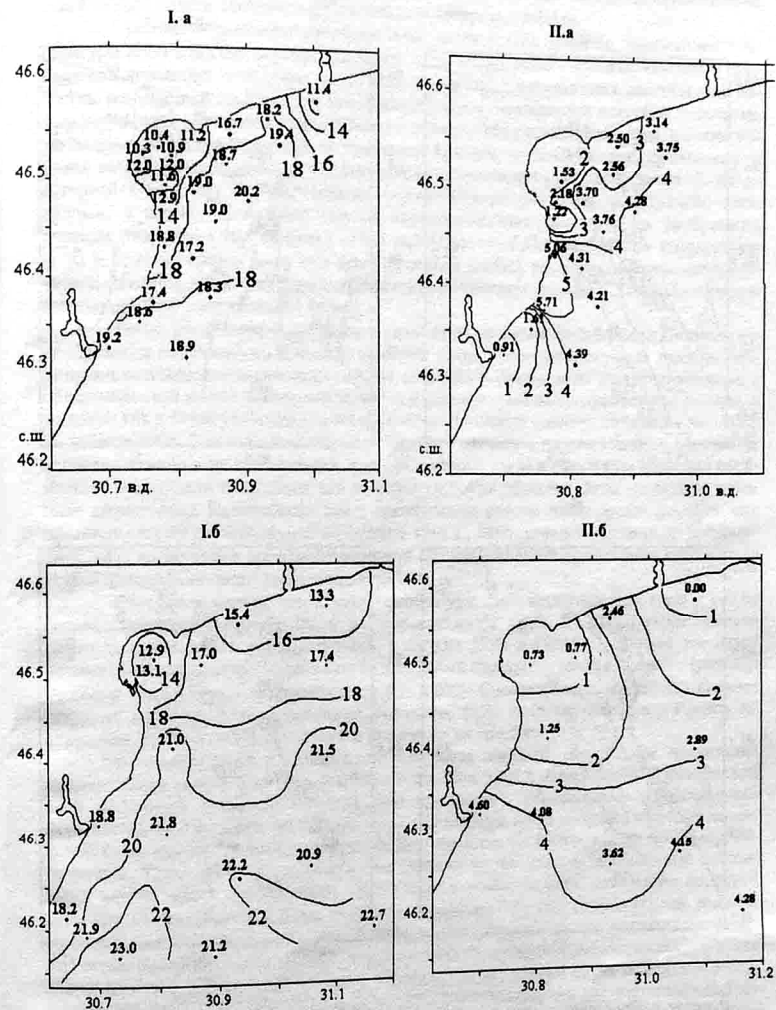


Рисунок 1. Пространственное распределение температуры воды (°C) в поверхностном слое (I) и концентрации растворенного кислорода (мг/л) в придонном слое (II) в августе 1988 (а) и 1990 (б) годов
Figure 1. Spatial distribution of water temperature (°C) in a superficial layer (I) and concentration of the dissolved oxygen (mg/l) in a benthic layer (II) in August 1988 (a) and 1990 (b) years

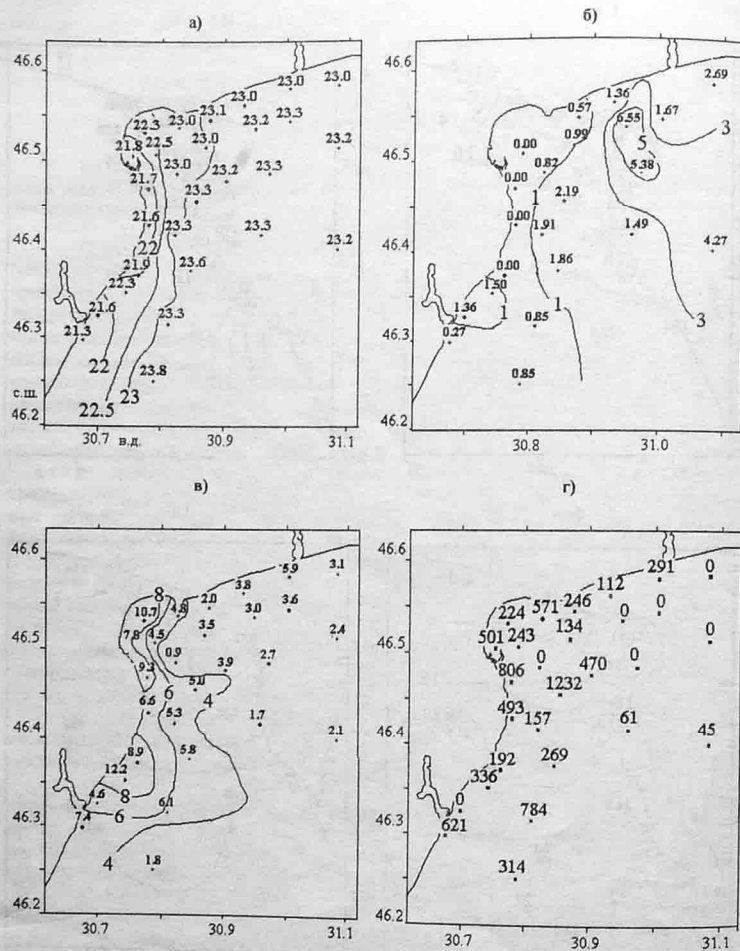


Рисунок 2. Пространственное распределение: а) температуры воды ($^{\circ}\text{C}$), в) концентрации хлорофилла a (mg/m^3), г) чистой продукции фитопланктона ($\text{mgC}/\text{m}^3\text{сут}$) в поверхностном слое и концентрации растворенного кислорода (mg/l) в придонном слое (б) в августе 1994 г.

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 – сгонные явления и прилегающим пониженной температуры поверхностных вод повышенных значений солёности, формируемых в результате подтока более солёных 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 съёмки, зафиксировавших гипоксию, на прибрежной станции отмечались все признаки сгона поверхностных вод: понижение температуры воды и отметки уровня моря при доминировании слабых северных и северо-западных ветров. Заметим, что сгоны поверхностных вод в Одесском регионе СЗЧМ наблюдаются именно при этих направлениях ветра.

Таким образом, прослеживается явная связь гипоксии со сгонными явлениями и прибрежным апвеллингом. В пользу гипотезы о том, что именно сгонные 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 обеднённых кислородом придонных вод из более глубоких областей. Хотя последний механизм образования гипоксийных зон в исследуемом районе также имеет место, о чём свидетельствуют данные съёмки в сентябре 1999 г., когда сгонные явления не наблюдались, но в то же время была зафиксирована область дефицита содержания кислорода в глубокой морской части исследуемого района.

Следует отметить, что в поле температуры поверхностных вод слабые следы сгонных явлений наблюдались и во время съёмки, 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 сгонная ситуация приводит к возникновению гипоксии, либо гипоксия развивается лишь на определенной фазе сгонных явлений и зависит от их предыстории.

В момент сгона 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 сгонных ветров сильно загрязнённые 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 сгонного эффекта образованная биомасса водорослей под действием возвратных поверхностных течений будет смещаться в сторону берега (рис. 2 в, г). После окончания сгона 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 сгонных ветров северного и северо-западного направлений в период с июля по сентябрь составляет в сумме 34 – 40 % [5], т. е. сгоны поверхностных вод происходят в Одесском регионе СЗЧМ систематически и довольно часто. Учитывая, что в августе речной сток минимален, можно предположить, что летом вклад сгонных 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 ИнБИОМ НАН Украины, 2000. – С. 9–24.
5. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Том 4. Черное море. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 99 с.
6. Орлова И. Г., Белевич Р. П., 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 заморгов 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 // Метеорология, климатология 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.