



УДК 574. 587 (262.5)

**В. Е. Заика**, докт. биол. наук., проф., чл.-корр. НАН Украины, **И. П. Бондарев**, канд. биол. наук, ст. н. с.

Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского Национальной академии наук Украины, Севастополь, Украина

## ДОННАЯ ГИПОКСИЯ НА ШЕЛЬФЕ И АНОКСИЯ ГЛУБОКОВОДНОЙ БЕНТАЛИ В ЧЁРНОМ МОРЕ

Анализ сведений последних десятилетий о донной гипоксии на Чёрном море, полученных химическими и биологическими методами, показывает, что пятна периодической сезонной гипоксии регистрируются не только в прибрежных и приустьевых зонах, но и на глубинах около 100 м. Это означает, что пространственный разрыв между проявлениями сезонной гипоксии и верхней границей постоянной аноксии глубинных вод постепенно уменьшается.

**Ключевые слова:** Чёрное море, сезонная гипоксия, постоянная аноксия.

Пелагические воды Чёрного моря ниже 150 – 200 м (на глубинах, соответствующих условной плотности воды 16.18 усл. ед.) постоянно эуксинные, т.е. аноксичны и заражены сероводородом. Бенталь ниже указанных глубин тоже показывает все признаки аноксии, включая отсутствие макробентоса. Помимо этого, временная или периодическая гипоксия бентали регистрируется на меньших глубинах шельфа, в разных районах Чёрного моря. Сообщения о таких находках к концу прошлого века стали учащаться. Многие исследователи связывают гипоксию бентали на малых глубинах со стоком рек. Последние выносят в море, по мере развития промышленного и сельскохозяйственного производства, всё большее количество биогенов и органики. Иначе говоря, речь идет об антропогенной эвтрофикации [4, 11]. Не меньшее значение имеет влияние гидро-метеорологических изменений последних десятилетий, имеющих периодический характер [13].

Эвтрофикация повлияла не только на прибрежные участки шельфа, но привела к росту продукции сероводорода в аноксической зоне, в частности, у её верхней границы [9], а

также к увеличению общих запасов сероводорода на протяжении нескольких десятилетий [8].

В результате указанных процессов локальные участки гипоксии, возникавшие в своё время в прибрежных, приустьевых участках северо-западного шельфа, как показал наш анализ, теперь регистрируются в различных районах бентали Чёрного моря, почти смыкаясь с верхней границей глубоководной зоны постоянной аноксии. Настоящая работа посвящена обсуждению соответствующих данных.

Условия возникновения гипоксии бентали в результате антропогенной эвтрофикации Чёрного моря. Гипоксические явления обычны на северо-западном шельфе. Особенно сильно они проявляются при повышенной водности рек: поверхностный слой распресняется, что увеличивает контраст солёности («скачок») между поверхностью и дном.

Одновременно солёность у дна, которая зависит от условий водообмена с открытой частью моря, может даже незначительно повышаться, что приводит к заметному усилению сезонного пикноклина и повышению вероятности гипоксико-аноксических явлений.

Значительное климатическое увеличение водности рек и распреснение поверхностного слоя моря в шельфовой зоне наблюдалось в период 1950 – 1982 гг. [12].

Возрастание водности рек, в сочетании с ростом сельскохозяйственной активности стран бассейна Дуная и черноморских стран, увеличило поступление в море биогенных веществ. Повышенное содержание кислорода близ поверхности (связанное с бурным фотосинтезом фитопланктона), отмечалось в 1963 – 1965, 1973 – 1975 и 1977 – 1982 гг., что совпадало с общим потеплением климата с 1960-х годов [12]. Это вызвало антропогенную эвтрофикацию морской среды, признаки которой для Чёрного моря многократно описаны [4]. Сочетание перечисленных факторов привело, начиная с 1960-х гг., к увеличению содержания кислорода в поверхностном слое (до 10 – 15 мл/л). Одновременно в придонном слое содержание кислорода снизилось (до 3 – 5 мл/л) [12].

Дефицит кислорода в придонной воде района Одессы и Днестровского лимана отмечали ещё в 1920-е и в 1950-е гг. [14], а в 1960 – 1965 гг. дефицит кислорода, вплоть до его полного исчезновения, регистрировался в Днепробугском лимане [12]. В 1965 – 1980 гг. в районах влияния стока рек зоны с гипоксией занимают более обширные площади и длятся дольше [15]. Годовая динамика дефицита кислорода отличается по районам (даже в пределах северо-западного шельфа). Кислородная депрессия связана с развитием сезонного скачка температуры и длится, в целом, с мая по ноябрь. В августе гипоксия распространяется на обширные площади.

Степень гипоксии определяет формы реакции разных звеньев экосистемы бентали. На материалах по Чёрному морю детально рассмотрены стадии изменений основных биотических переменных в сообществах макробентоса по градиенту органического обогащения грунта. Когда в бентали содержание  $S_{орг}$  достигает 35 – 45 мг/г, концентрация кислорода в придонном слое не превышает 1.0 – 1.5 мг/л, а редокс-потенциал снижается до -100 - 120 мВ.

Морський екологічний журнал, № 2, Т. IX. 2010

При дальнейшем повышении концентрации  $S_{орг}$  начинается деградация макробентоса [11]. В наиболее острых случаях происходит массовая гибель донных макрофитов, рыб и макрозообентоса [5, 15]. Наблюдения из подводных аппаратов показали, что замор поражает донные поселения мозаично: пятна погибших мидий нередко окружены выжившими моллюсками. Кроме того, местами на грунте встречаются темные пятна, вероятно, связанные с сероводородным загрязнением осадка [5]. Скорее всего, это связано с рельефом донной поверхности, и, прежде всего, страдает фауна природных понижений дна. В локальных депрессиях скапливаются мелкие фракции осадка.

Как известно, в мелководных зонах сероводород продуцируется бактериями в донных отложениях. При этом глинистые илы в поверхностных горизонтах (0 – 5 см) Чёрного моря отличаются высокой интенсивностью сульфатредукции (60 – 427 мг S/кг.сут), тогда как более крупнозернистые осадки шельфа показывают гораздо меньшие величины скорости сульфатредукции (0.2 – 3.0 мг S/кг сут) [9].

Сильные проявления гипоксии, вызывающие заморы, регистрировались до самого конца прошлого века (1997 – 1998): «мёртвая зона» (без моллюсков и других представителей макробентоса) была обнаружена на обширной акватории моря, прилегающей к устью Дуная. В районе, прилегающем к Днестровскому лиману, были также найдены небольшие «мёртвые пятна». У западного побережья Крыма (в северной части Каламитского залива) на глубине 64 м был отмечен сероводород [10].

Сближение пятен периодической гипоксии с границей постоянной аноксии глубинных вод. В Чёрном море трофический статус, прежде всего, стал периодически меняться, становиться ближе к эвтрофному в закрытых бухтах с затрудненным водообменом. С 1950 – 1960-х гг. в Чёрное море стали поступать дополнительные биогены с речным стоком. В 1974 – 1975 гг. биогенный сток Дуная вырос на 1 – 2 порядка. Началось интенсивное развитие

фитопланктона, отмирание которого привело к увеличению содержания органического вещества в осадках [4]. При этом подавляющая часть вертикального потока кислорода из верхних слоев ко дну расходуется на окисление органического вещества [2].

Сероводородное заражение бентали на мелководном шельфе связано с бактериальными процессами, идущими в осадках, при разложении растущих запасов органического вещества. Происходят выбросы сероводорода из осадков в придонный слой. В течение последнего десятилетия возросла скорость бактериальной сульфатредукции в осадках [9].

Но существующего потока кислорода, с учетом вертикальной стратификации водной толщи, не хватает для полного окисления растущих запасов органики как в бентали шельфа, так и на больших глубинах, где окисляется около 65 % продукции сероводорода [2]. Выявлена тенденция роста запаса сероводорода в Чёрном море, наиболее сильно проявившаяся в последние десятилетия. За последние 30 лет общий запас сероводорода возрос на 20 % [8].

При этом содержание сероводорода в слое 100 – 200 м, то есть вблизи верхней границы постоянно зараженной зоны, увеличивалось, начиная с 1976 г. К 1990 г. оно выросло вдвое, по сравнению с 1920-ми годами [8]. Естественно, это проявляется во всё более частой регистрации сероводорода выше его обычной границы. Считают, что в южной части северо-западного шельфа, с глубинами более 40 м, зона природного дефицита кислорода возникает в связи с подтоком обеднённых кислородом вод глубоководных районов, и что в годы повышенной водности рек две описанных области гипоксии могут смыкаться [12]. Эта гипотеза перекликается с некоторыми фактами.

Так, в 1980-е годы Туапсе на глубинах 100 м и более в дночерпательных пробах часто ощущался запах сероводорода [6]. Позже пятна ила с запахом сероводорода, не имеющие макробентоса, указывались для глубин 80 и даже 35 м [7]. Зарегистрировано заметное обеднение макробентоса на глубинах 50 – 200 м [3, 7].

60

У южного берега Крыма в ноябре 1998 г. была обнаружена обширная заморная зона. На глубинах 18 – 116 м придонная вода была заражена сероводородом. Створки моллюска *Modiolula phaseolina* (Philippi) были целыми, так что животные погибли не более двух лет тому назад. Считают, что этот замор вызван подъёмом глубинных вод [10].

При исследованиях с подводных обитаемых аппаратов [1] положение верхней границы сероводорода иногда регистрируется на меньших глубинах, чем при стандартных гидрологических обследованиях. Нередко это объясняется боязнью повредить зондирующие приборы, используемые в толще воды, при контакте с дном. Поэтому тонкий придонный слой остаётся необследованным и языки заражённой воды, которые по пониженным участкам достигают центральной части шельфа, остаются не отмеченными.

Обычные методы исследования показали, что верхняя граница сероводорода в пелагиали имеет существенную пространственную изменчивость – синоптическую, сезонную, межгодовую [2]. В то же время, видимо, существуют кратковременные флуктуации верхней границы сероводорода, при которых заражённая вода «забрасывается» на меньшие глубины и задерживается в понижениях дна. При наблюдении из подводного аппарата признаки сероводородного заражения хорошо заметны по появлению на поверхности донного осадка пятен с окраской, изменённой на оранжевую и чёрную на глубинах 100 – 110 м и даже менее.

Впрочем, из того, что изложено об образовании гипоксийно-аноксийных пятен на малых глубинах и даже в бухтах при высоком уровне органического загрязнения [11], ясно, что затекание «волн» постоянно эуксинной воды – лишь один из возможных вариантов появления острой гипоксии в локальных понижениях рельефа на шельфе Чёрного моря. Генеральная причина сближения пятен сероводородной воды с верхней границей постоянной сероводородной зоны – запасы органического вещества, накопленные в период сильной эвтрофи-

кации, в сочетании резкой вертикальной стратификацией вод Чёрного моря.

1. Бураков В. И., Семенов Д. В. Изучение донных ландшафтов шельфа Чёрного моря с помощью обитаемых подводных аппаратов. – Севастополь: СРСЭФ и ПА, 1989. – 36 с.
2. Еремеев В. Н., Коновалов С. К. К вопросу о формировании бюджета и закономерностях распределения кислорода и сероводорода в водах Чёрного моря // Морск. экол. журн. – 2006. – 5, №3. – С. 5 – 30.
3. Заика В. Е. Изменение количества видов макробентоса в Чёрном море на глубинах 50 – 200 м // Докл. АН УССР. – 1990. – Сер. Б, №11. – С. 68 – 71.
4. Заика В. Е. О трофическом статусе пелагических экосистем в разных регионах Чёрного моря // Морск. экол. журн. – 2003. – 2, №1 – С. 5 – 11.
5. Заика В. Е., Валовая Н. А., Повчун А. С., Ревков Н. К. Митилиды Чёрного моря. – К.: Наук. думка, 1990. – 208 с.
6. Заика В. Е., Киселева М. И., Михайлова Т. В. и др. Многолетние изменения зообентоса Чёрного моря. – К.: Наук. думка, 1992. – 248 с.
7. Заика В. Е., Сергеева Н. Г. Макрозообентос нижних горизонтов черноморского шельфа (глубже 40 – 50 м) по данным последних съёмок XX века // Экология моря. – 2001. – Вып.57. – С. 25 – 30.
8. Кравец В. Н. Многолетняя изменчивость и оценка баланса сероводорода в Чёрном море // Наук. праці УкрНДГМІ. – 2002. – Вип. 250. – С. 354 – 363.
9. Леин А. Ю., Иванов М. В. Продукция сероводорода в осадках шельфа и баланс сероводорода в

**Благодарности.** Данная работа выполнена при поддержке проекта HERMES GOCE-CT-2005-511234. Авторы признательны Е. И. Бабич за техническую помощь.

- Чёрном море // Микробиология. – 1990. – 59, № 5. – С. 921 – 928.
10. Макаров Ю. Н., Костылев Э. Ф. Моллюски в эвтрофированных районах украинского шельфа Чёрного моря (по результатам наблюдений 1997 – 1998 гг.) // Вестн. Житомирск. Ун-та. – 2002. – №10 – С. 120 – 122.
  11. Петров А. Н. Реакция прибрежных макробентосных сообществ Чёрного моря на органическое обогащение донных отложений // Экология моря. – 2000. – Вып. 51. – С. 45 – 51.
  12. Селин П. Ю., Михайлов Н. Н., Волков Н. В. Изменчивость гидрохимического режима вод северо-западного шельфа Чёрного моря / Сапожников В.В. Экология прибрежной зоны Чёрного моря. – М.: ВНИРО, 1991. – С. 59 – 100.
  13. Украинский В. В., Попов Ю. И. Климатические и гидрофизические условия развития гипоксии вод на северо-западном шельфе Чёрного моря // Морск. гидрофиз. журн. – 2009. – №3. – С. 19 – 29.
  14. Фащук Д. Я. Сероводородная зона северо-западного шельфа Чёрного моря: природа, причины возникновения, механизмы динамики // Водные ресурсы. – 1995. – 22, №5. – С. 568 – 584.
  15. Zaitsev Yu., Mamaev V. Marine biological diversity in the Black Sea. N.Y., UN Publ. Black Sea Environmental Series. – 1997. – 3.– 208 p.

Поступила 07 октября 2009 г.

После доработки 01 февраля 2010 г.

**Донна гіпоксія на шельфі й аноксія глибоководної бенталі у Чорному морі.** В. Є. Заїка, І. П. Бондарів. Аналіз відомостей останніх десятиліть про донну гіпоксію на Чорному морі, отриманих хімічними й біологічними методами, показує, що плями періодичної сезонної гіпоксії реєструються не тільки в прибережних та передгірлових зонах, але з'являються й на глибинах близько ста метрів. Це означає, що поступово зменшується просторовий розрив між проявами сезонної гіпоксії та верхньою межею постійної аноксії глибинних вод.

**Ключові слова:** Чорне море, сезонна гіпоксія, постійна аноксія.

**The bottom hypoxia on the shelf and anoxia of the Black Sea deep water benthos.** V. E. Zaika, S. P. Bondarev. The analysis of the last decades information about bottom hypoxia in the Black Sea, obtained by the chemical and biological methods shows, that spots of periodical season hypoxia are registered not only in the coastal and near-estuary zones, but they appear at the depths of about one hundred meters. It means that spatial gap between occurrences of season hypoxia and the upper boundary of the deep waters constant anoxia gradually decreases.

**Key words:** Black Sea, season hypoxia, permanent anoxia.