

**ГИПОКСИЯ И АНОКСИЯ В ДОННЫХ ОСАДКАХ КРЫМСКОГО  
ПОБЕРЕЖЬЯ**  
*HYPOXIA AND ANOXIA IN BOTTOM SEDIMENTS OF THE CRIMEAN  
PENINSULA*

*В работе рассмотрены случаи гипоксии в морских системах с различными источниками органического углерода. Определено, что в б. Омега явление гипоксии носит эпизодический характер, в осадках Севастопольской бухты и района мыса Тарханкут гипоксия является постоянной характеристикой системы.*

*In this paper was observed hypoxic marine systems with different organic carbon fluxes. It was defined that hypoxia in the Omega bay is episodic and hypoxia in the Sevastopol Bay and area of the Tarkhankut Cape are permanent states of the systems.*

В последние десятилетия во всем мире возросло число природных водных систем, в которых возникает дефицит кислорода [1, с. 926], это вызвано влиянием различных факторов, в частности деятельностью человека и ростом промышленности. При этом дефицит кислорода достигает таких масштабов, что в большинстве прибрежных водных системах (эстуариях, заливах, бухтах) развивается гипоксия (концентрации растворенного кислорода  $\leq 2$  мг/л) и аноксия (полное отсутствие кислорода) [2, с. 1276; 3, с. 50]. Возникновение и развитие этих явлений оказывают негативное влияние, т.к. они сопровождаются нарушением функционирования и деградацией структуры экосистем, ухудшением качества прибрежных вод и снижением их рекреационного и биопродукционного потенциала, что, в свою очередь, влияет на социально-экономические характеристики развития региона [4, с. 927 – 928].

Снижение содержания кислорода связано с различными физическими и химическими процессами. Так, гипоксия может быть вызвана глобальным потеплением, которое приводит к тому, что уменьшает растворимость кислорода в поверхностных водах и способствует установлению устойчивой стратификации водной толщи, что ограничивает вертикальную циркуляцию и поток кислорода из поверхностного слоя в более глубокие слои вод [2, с. 1273]. В большей степени развитие гипоксии обусловлено эвтрофикацией, которая возникает в результате поступления возрастающего количества биогенных элементов (в первую очередь

неорганических форм азота и фосфора) в водную толщу, что приводит к дополнительной первичной продукции и увеличивающейся экспортной продукции в водную толщу, увеличению потока органического вещества в донные осадки. Это способствует активному потреблению кислорода. В зависимости от степени воздействия физических и химико-биологических факторов изменяются продолжительность и площадь зон, подверженных дефициту кислорода.

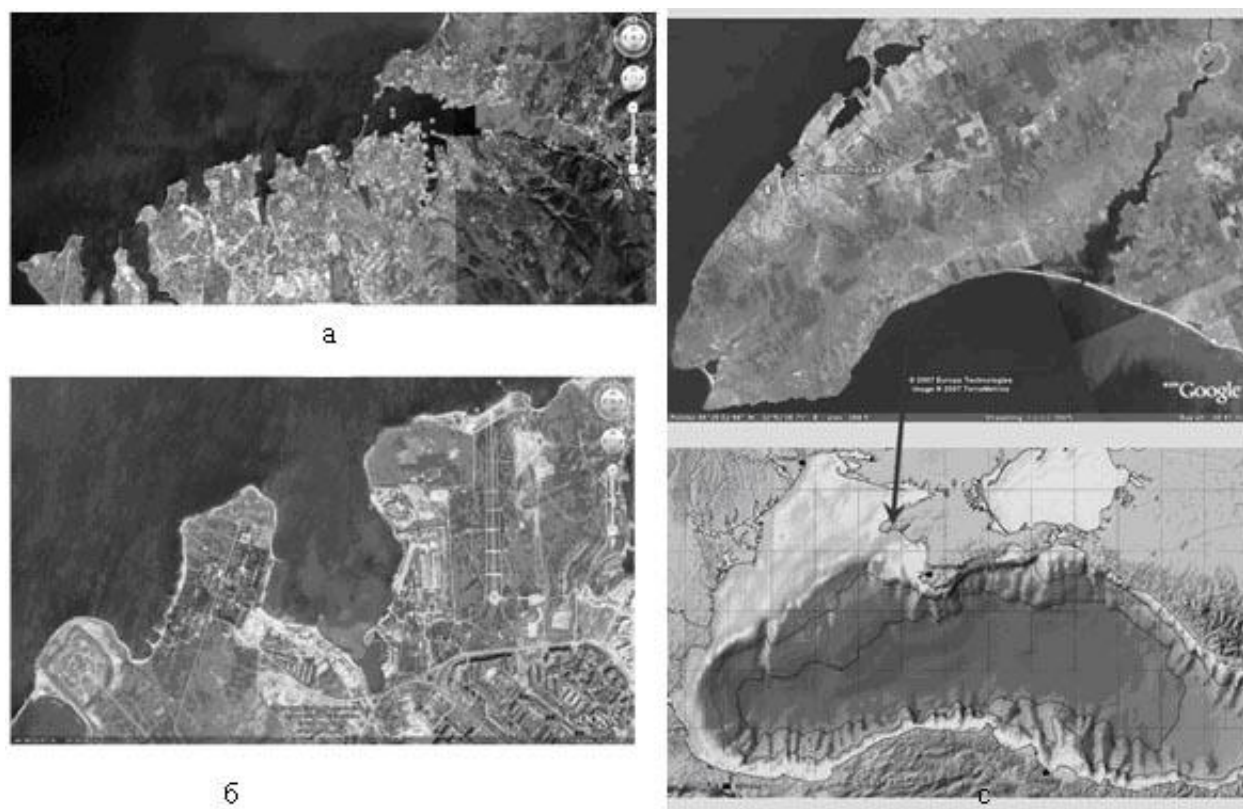
Гипоксия наиболее часто наблюдается в системах и условиях, в которых скорость потребления кислорода превышает его поступление [1, с. 276]. Чаще всего уменьшение концентрации кислорода наблюдается в прибрежных акваториях с высоким уровнем содержания органического вещества и малыми величинами потоков кислорода. Это относится к донным осадкам в первую очередь, поскольку физические процессы поступления кислорода намного слабее, а химико-биологические процессы потребления кислорода в донных осадках существенно интенсивнее, по сравнению с водной средой.

Для таких систем уменьшение содержания кислорода <25% насыщения является достаточно часто наблюдаемым явлением, однако основным окислителем остается кислород. При дальнейшем уменьшении концентрации кислорода <1% насыщения, окисление органического вещества происходит преимущественно за счет процессов с участием окисленных форм азота (нитраты, нитриты), железа, марганца, а после полного исчерпания запаса кислорода начинается процесс сульфатредукции [2, с. 1274 – 1275].

Анаэробное окисление органического вещества приводит к образованию восстановленных соединений, таких как аммоний, Fe (II), Mn (II) и H<sub>2</sub>S. Это приводит к тому, что в осадках формируются бескислородные зоны с восстановленными условиями, где появляется сероводород, который затем может переходить из осадков в водную толщу. В этом случае анаэробные условия формируются не только в донных осадках, но и в водной толще [2, с. 1275].

В прибрежных акваториях, в отличие от открытых районов океана, изменения концентрации кислорода может происходить достаточно быстро и приводить к драматическим изменениям в протекающих биогеохимических процессах. Важной задачей является оценка вклада естественных и антропогенных воздействий, способствующих уменьшению кислорода. Для этого необходимо, прежде всего, исследование динамики содержания кислорода в придонном слое воды и глубины проникновения кислорода в донные осадки. Решение этой задачи позволит предотвратить негативные изменения, связанные с ухудшением экологического состояния водных систем. Целью данной работы было определение содержания и глубины проникновения кислорода, глубины появления и концентрации сероводорода в придонном слое воды и донных

отложениях прибрежных районов с различными источниками органического углерода.

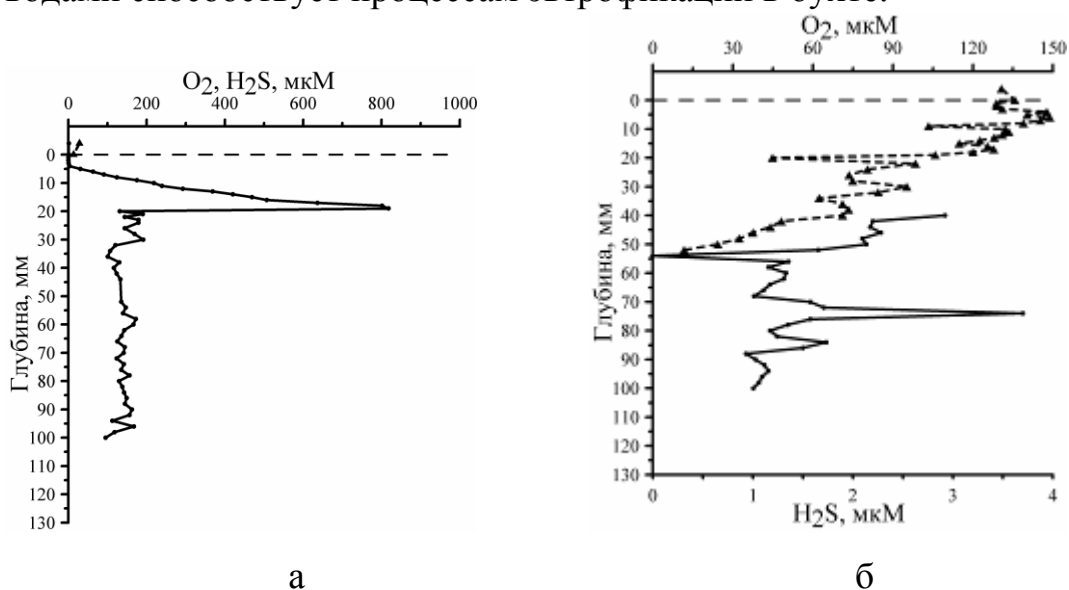


**Рис. 1. Карта расположения:** а – Севастопольская бухта; б – бухта Омега; с – район мыса Тарханкут.

В качестве объекта исследования были выбраны Севастопольская бухта, б. Омега и район мыса Тарханкут (Рис. 1). Пробы осадков отбирались в июле, сентябре, октябре, ноябре 2009 года в рамках международного проекта ЕС 7<sup>th</sup>FP "In situ monitoring of oxygen depletion in hypoxic ecosystems of coastal and open seas, and land-locked water bodies" (HYPOX, #226213) [5]. После отбора они сразу же доставлялись в береговую лабораторию, где выполнялся их анализ. Пробы были отобраны таким образом, что они не подвергались внешним воздействиям и структура осадков, окислительно-восстановительные условия в них были максимально приближены к естественным. Анализ колонок осадков проводился полярографически, с использованием стеклянного Au-Hg микроэлектрода. Пределы обнаружения  $O_2$  – 5 мкМ/л,  $H_2S$  – 0,5 мкМ/л [6, с. 52 – 66].

Бухта Омега является акваторией полузамкнутого типа (Рис. 1 б). Несмотря на то, что она расположена внутри города, на ее берегу нет промышленных объектов. Здесь расположены места отдыха, парки и развлекательные центры. Можно было бы ожидать, что в бухте должны наблюдаться естественные условия, но это не так. Ограниченный водообмен с открытыми районами моря, устойчивая вертикальная

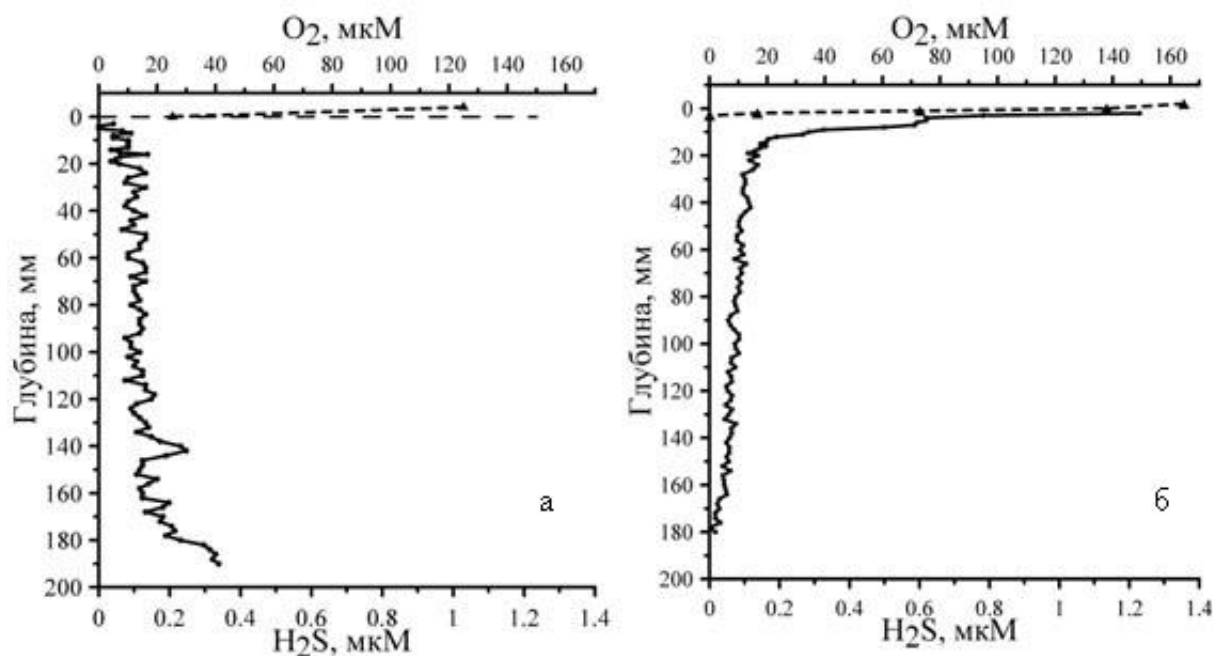
стратификация вод, сброс бытовых и ливневых сточных вод привели к возникновению аноксии в донных осадках. Пробы, отобранные в б. Омега в июле 2009 г., характеризовались наличием незначительных концентраций кислорода в придонном слое воды и на поверхности осадков. При этом сероводород был обнаружен уже в придонном слое воды. С глубиной его содержание увеличивалось (рис. 2 а), достигая максимальных величин 818,1 мкМ на глубине 19 мм, а затем уменьшалось с глубиной, но оставалось на уровне около 140 мкМ вплоть до максимальной глубины профилирования. Однако пробы, отобранные в бухте Омега в сентябре 2009 г., существенно отличались от предыдущих по содержанию и вертикальному распределению кислорода и сероводорода (рис. 2 б). Такое изменение было ожидаемым, поскольку при переходе к осеннему сезону увеличивается интенсивность вентиляции вод бухты, а значит, увеличивается и поток кислорода в донные осадки. Тем не менее, слои донных осадков, начиная с глубины 40 мм, по-прежнему остаются анаэробными, хотя концентрация сульфидов значительно уменьшается. В отличие от бухты Омега, воды Севастопольской бухты испытывают значительное техногенное воздействие, вызванное интенсивным промышленным использованием бухты, результатом чего является ее сильное загрязнение [7, стр. 52]. Кроме того, поступление биогенных элементов с речным стоком р. Черная и городскими сточными водами способствует процессам эвтрофикации в бухте.



**Рис.2.** Распределение кислорода и сероводорода в донных осадках б. Омега (треугольники и прерывистая линия – концентрация кислорода, мкМ, кружки и сплошная линия – сероводорода, мкМ); а – осадки, отобранные в июле 2009 г., б – осадки, отобранные в сентябре 2009 г.

Постройка заградительного мола привела к дополнительному ограничению водообмена между открытой частью моря и водами бухты [8, стр. 86]. Это способствовало накоплению органического углерода в донных осадках бухты (более 4%) [7, с. 55] и их заиливанию. Все это

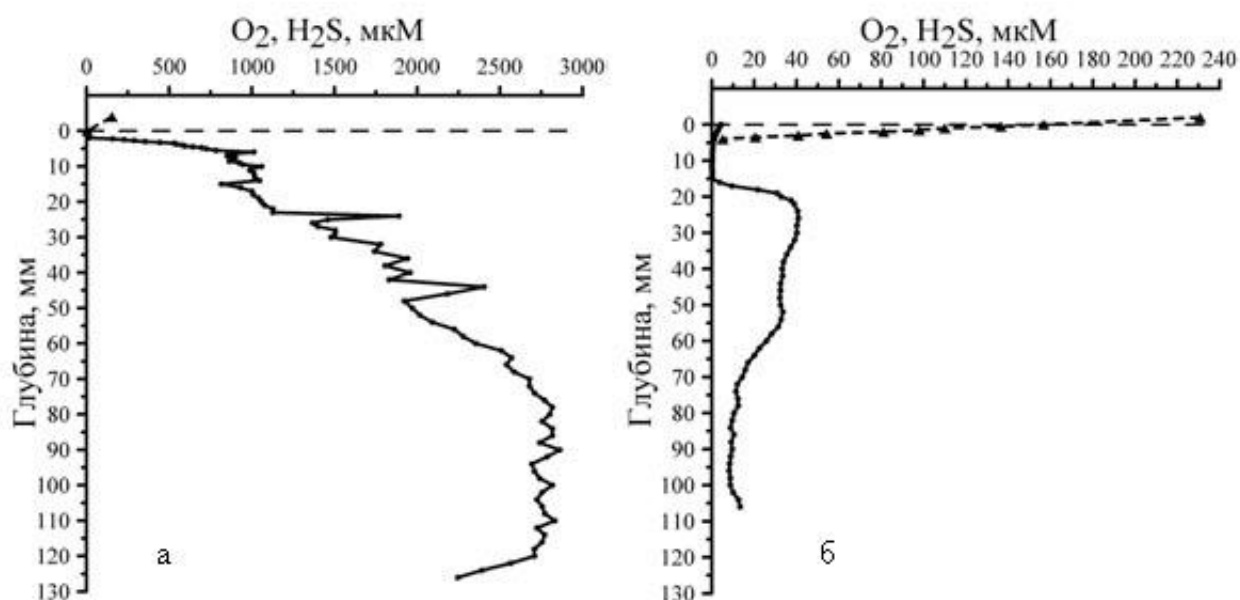
вызывает активное потребление кислорода в осадках и в придонном слое воды, результатом чего являются анаэробные условия в осадках бухты, а иногда и в придонном слое воды [9, стр. 51]. В результате выполненных исследований было показано, что кислород проникает в осадки бухты не более чем на 2 мм. Сероводород появляется уже в верхнем 10 мм слое осадков (рис. 3), а иногда даже на поверхности осадков, тем самым создавая предпосылки для появления сероводорода в придонном слое воды, что негативно сказывается на состоянии экосистемы бухты. При этом пробы, отобранные в июле, сентябре и октябре 2009 г. незначительно отличались друг от друга по распределению и содержанию кислорода и сероводорода. Т.о. можно сказать, что гипоксия в донных осадках Севастопольской бухты не имеет сезонного характера и является постоянной характеристикой системы.



**Рис. 3.** Распределение кислорода и сероводорода в донных осадках Севастопольской бухты (треугольники и прерывистая линия – концентрация кислорода, мкМ, кружки и сплошная линия – сероводорода, мкМ); а – осадки, отобранные в июле 2009 г., б – осадки, отобранные в октябре 2009 г.

Район мыса Тарханкут находится в открытой части моря (рис. 1 в), где отсутствуют источники антропогенного и техногенного воздействия. Особенной характеристикой данного района является присутствие геологического разлома, к которому приурочены газовыделения метана, так называемые метановые сипы. Интенсивные процессы окисления метана аэробными и анаэробными метанокисляющими бактериями приводят к возникновению микробных матов (биомасса колонии бактерий). Слабая диффузия кислорода из воды в бактериальные маты

приводит к возникновению анаэробных условий в их толще и высоким концентрациям сероводорода (сульфидов). В пробах, отобранных в сентябре 2009 г., кислород наблюдался над поверхностью мата (10 см от поверхности), а в непосредственной близости (2 мм от поверхности мата) он исчезал, и появлялся сероводород, концентрация которого с глубиной значительно увеличивалась (рис. 4 а). В ноябре 2009 г. распределение кислорода и сероводорода изменилось: на поверхности мата присутствовал кислород, хотя его содержание с глубиной уменьшалось, и на 4 мм он исчезал, концентрация сероводорода значительно уменьшилась (более чем на 2 порядка), хотя он присутствовал вдоль всего профиля, начиная с поверхности осадка (рис. 4 б). Сравнивая полученные профили, можно сказать, что анаэробные условия в бактериальных матах сохраняются, однако сами маты в период штормов могут разрушаться.



**Рис. 4. распределение кислорода и сероводорода в донных осадках района м. Тарханкут** (треугольники и прерывистая линия – концентрация кислорода, мкМ, кружки и сплошная линия – сероводорода, мкМ); а – осадки, отобранные в сентябре 2009 г., б – осадки, отобранные в ноябре 2009 г.

Полученные данные свидетельствуют о том, что гипоксия и анаэробные условия могут возникать как в районах, испытывающих антропогенную (б. Омега) и техногенную (Севастопольская бухта) нагрузки, так и в районах, в которых интенсивное поступление органического углерода является результатом естественных процессов (район мыса Тарханкут).

1. Robert J. Diaz. Overview of Hypoxia around the World // Journal of Environmental Quality. – 2001. – 3, № 26. – P. 275 – 281.
2. Middelburg J. J., Levin L. A. Coastal hypoxia and sediment

biogeochemistry // Biogeosciences. – 2009. – 6. – P. 1273–1293. 3. Robert D. Hetland, Steven F. DiMarco. How does the character of oxygen demand control the structure of hypoxia on the Texas–Louisiana continental shelf? // Journal of Marine Systems. – 2008. – 70. – P.49–62. 4. Robert J. Diaz, Rutger Rosenberg. Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems // Science. – 2008. – 321. – P. 926 – 929. 5. <http://www.hypox.net/> 6. Brendel P.J., Luther, III G.W. Development of a gold amalgam voltammetric microelectrode for determination of dissolved Fe, Mn, O<sub>2</sub>, and S (-II) in porewaters of marine and freshwaters sediments // Envir. Sci. Technol. – 1995. – 29, №3. – P. 751 – 761. 7. Орехова Н.А., Коновалов С.К. Полярография донных осадков Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. – 2009. – № 2. – С. 52 – 66. 8. Романов А.С., Орехова Н.А., Игнатъева О.Г. и др. Влияние физико-химических характеристик донных осадков на распределение микроэлементов на примере бухт Севастополя (Черное море) // Экология моря. – 2007. – Вып. 74. – С. 85-90. 9. Орехова Н. А., Коновалов С.К. Кислород и сероводород в донных осадках Севастопольской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. научн. тр. /НАН Украины, МГИ, ИГН, ОФ ИнБЮМ. Редкол.: Иванов В.А. (гл. ред.) и др. – Севастополь, 2009. – Вып. 18. – С. 48 – 56.