

УДК 551.465

© Р.В. Боровская<sup>1</sup>, П.Д. Ломакин<sup>2</sup>, Б.Н. Панов<sup>1</sup>,  
Е.О. Спиридонова<sup>1</sup>, 2009

<sup>1</sup>Южный НИИ морского рыбного хозяйства и океанографии, Керчь

<sup>2</sup>Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь

## ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЗНАКОВ ПРИДОННОЙ ГИПОКСИИ В АЗОВСКОМ МОРЕ И КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ НА БАЗЕ КОНТАКТНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

*На базе данных спутникового мониторинга и серии подспутниковых контактных океанографических экспериментов выявлены на поверхности Азовского моря и Керченского пролива характерные признаки зон придонной гипоксии. По спутниковым картам температуры морской поверхности продемонстрирована возможность их фиксации, контроля и предвидения времени и мест массовой гибели рыбы. Рассмотрена межгодовая изменчивость интенсивности придонной гипоксии. Высказано предположение о возможности развития автоколебательного процесса усиления гипоксии в придонном слое за счет взаимодействия воды и донных осадков.*

**Введение.** В 70-е годы прошлого столетия существенно возросла частота проявления гипоксии в Азовском море. Это негативное явление стало наблюдаться и в Керченском проливе [5], для которого проблема гипоксии в современной океанографической литературе практически не освещена. Что же касается Азовского моря, то здесь вопросам гипоксии и связанной с ней массовой гибели рыбы посвящен ряд работ [1, 2, 4, 8, 10].

Цель настоящей статьи – на базе спутниковой информации показать возможности выявления признаков придонной гипоксии на поверхности Азовского моря и Керченского пролива и оперативного обнаружения, контроля и предвидения динамики заморных участков; на базе спутниковой информации и контактных наблюдений рассмотреть закономерности межгодовой изменчивости интенсивности заморов и массовой гибели рыбы.

**Материал и методика.** В качестве исходных данных использован массив ежедневной спутниковой информации о состоянии температурного поля поверхности Азовского моря и Керченского пролива для летних месяцев года. Массив сформирован по материалам мониторинга, который ведется в ЮгНИРО с 1988 г. по настоящее время со спутников серии NOAA в инфракрасном диапазоне. Данные принимаются станцией приема и обработки спутниковой информации SU-8 (фирма «Figuro»). Анализировались как сами температурные поля, с целью идентификации и определения положения участков акватории, пораженных гипоксией, так и рассчитанный по ним для каждого конкретного года численный показатель (P %), характеризующий повторяемость рассматриваемого негативного явления.

В качестве подспутниковых данных привлечены материалы контактных, специально организованных экспедиционных океанографических исследований гипоксии в Азовском море ЮгНИРО за период с 1992 по 1997 гг.

Изучение закономерностей возникновения придонной гипоксии проводилось ежегодно на базе двух-трех океанографических съемок, выполнявшихся с июня по август. В специально организованной съемке наряду с измерениями обычного комплекса гидрофизических параметров среды в верхнем метровом и придонном слоях воды обязательно выполнялось определение растворенного в воде кислорода как основного показателя гипоксии. Также к анализу были привлечены сведения о количестве погибшей рыбы, обнаруженной во время заморозов, которые были собраны Н.Т. Бровченко.

**Обсуждение результатов.** Анализ полученных контактных данных по кислородному режиму исследуемой акватории позволил выявить следующие закономерности, касающиеся явления гипоксии и заморозов. Явление гипоксии в Азовском море наблюдается в летние месяцы года и периодически охватывает обширные участки, включая прибрежные и открытые воды, что, как правило, приводит к массовой гибели рыбы. Иногда явление гипоксии не сопровождается гибелью рыб. Время возможного кислородного истощения придонного слоя вод оценивается, примерно, в одни сутки, что хорошо согласуется с полученными ранее данными [4]. Из-за частой смены штилевой и ветреной погод, гипоксия в Азовском море так же быстро исчезает, как и формируется. Длительность вспышек заморозов, как правило, не превышает нескольких суток. Этим можно объяснить тот факт, что многочисленные случаи снижения запаса кислорода в придонных слоях вод на локальных участках моря не фиксировались в экспедиционных контактных исследованиях. Как будет показано ниже, данное явление может быть надежно определено, контролируемо и предвидено на промежуток времени в несколько суток на базе спутниковых наблюдений.

По материалам выполненных нами съемок была выявлена качественная связь цветения фитопланктона с температурой поверхностных вод и придонной гипоксией. В зонах активного цветения, из-за повышения мутности, отмечается более интенсивный прогрев поверхностных вод. На пораженных гипоксией участках в верхнем слое формируется локальный максимум кислорода, а значение температуры на поверхности моря на 1-2°C превосходит окружающий фон.

Типично для данной ситуации распределение характеристик водной среды проиллюстрировано на рис. 1. Видно, что 31 июля 1997 г. на спутниковом снимке в юго-западной части Азовского моря на поверхности зафиксирован локальный максимум температуры 27,2 °С. По материалам океанографической съемки, выполненной 31 июля-1 августа 1997 г., в этом районе выявлена зона цветения фитопланктона. В поле растворенного кислорода она проявлялась в виде локального максимума концентрации на поверхности 6,4 мл/л и минимум 1,8 мл/л у дна. На рассматриваемом участке моря наблюдалась массовая гибель бычка, хамсы и камбалы.

Это свойство позволяет по спутниковым снимкам отслеживать зоны заморозов, отождествляя их местоположение с положением локальных максимумов в поле температуры поверхности моря. В качестве примера на рис. 2 показаны пораженные гипоксией участки Азовского моря, которые были определены по спутниковым данным летом 1998 и 1999 гг. Это район Сива-

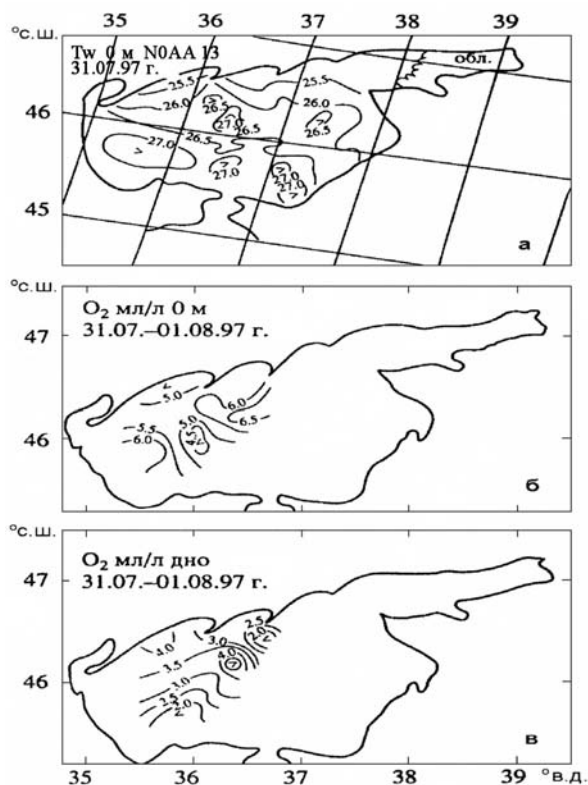


Рис. 1. Температура (°C) на поверхности моря по спутниковым данным (а); содержание растворенного кислорода (мл/л) в верхнем (б) и придонном (в) слоях по судовым данным в июле 1997 г. во время замора

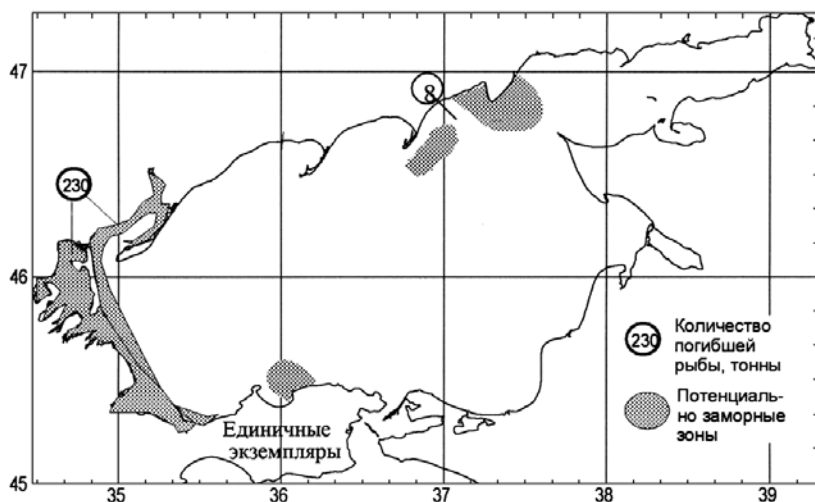


Рис. 2. Пораженные гипоксией участки, выявленные в прибрежной зоне Азовского моря по спутниковым данным в июле 1998 г. (западная часть); в июле 2001 г. (северные и южные области моря) и количество погибшей рыбы

ша и Арабатской стрелки и прибрежные участки на севере и юге моря. На основе оперативной спутниковой информации ЮгНИРО был дан прогноз о возможной массовой гибели рыбы на обнаруженных участках. Согласно данным Азово-Черноморской рыбной инспекции, прогноз оправдался.

На основе статистических сведений установлено, что локальные максимумы температуры на спутниковых снимках не всегда сопровождалась заморными явлениями и гибелью рыбы. В 30 % случаев наблюдалось расхождение в несколько десятков миль между прогнозным и реальным положением пораженных гипоксией участков или отсутствие признаков гипоксии и гибели рыб. Поэтому области локального максимума температуры, наблюдаемые на спутниковых снимках на поверхности моря, мы назвали потенциально заморными зонами.

К сожалению, в настоящее время не существует статистически обеспеченных эмпирических выборок, на которых можно количественно оценить тесноту описанных выше практически значимых связей. Пока они определены лишь на качественном уровне. Вместе с тем, благодаря данным спутникового мониторинга и сведений о гибели рыбы в прибрежной зоне Азовского моря за время с 1988 по 2001 г., нам удалось выявить наличие достаточно тесной связи между показателем теплового фона моря и количеством гибнущей в результате гипоксии рыбы.

Данная связь рассмотрена в межгодовом масштабе. При этом межгодовая изменчивость повторяемости придонной гипоксии выражалась показателем  $P$  % – отношением количества снимков, на которых прослеживались локальные максимумы температуры (потенциально заморные зоны) в прибрежных районах моря к общему числу открытых от облачности снимков в летние месяцы. Показатель  $P$  % сопоставлялся с количеством ( $\Pi$  в тоннах) отмеченной у берега погибшей рыбы (рис. 3).

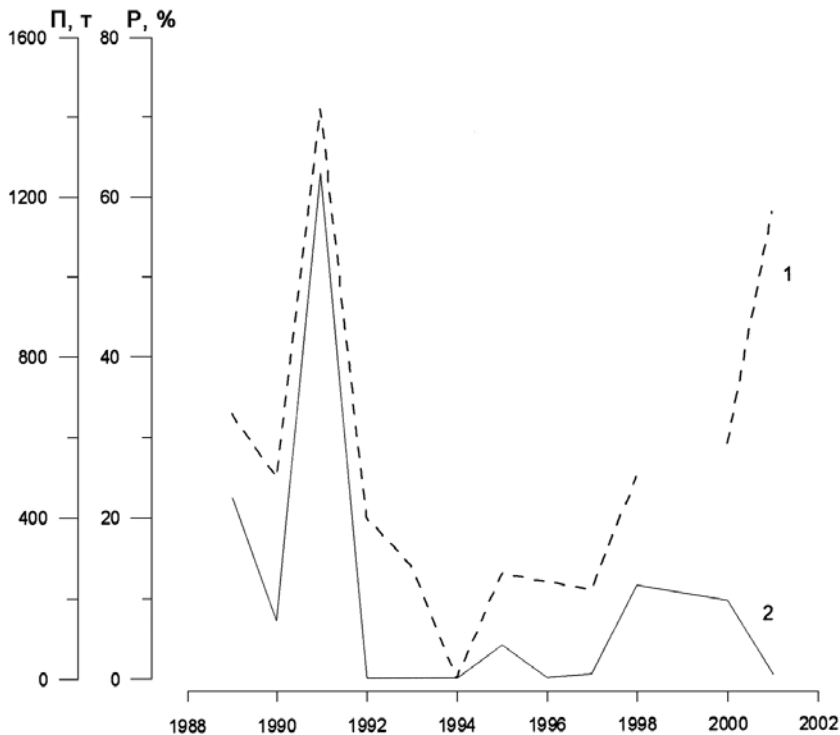


Рис. 3. Межгодовые вариации интенсивности развития потенциально заморных зон (показатель  $P$ , %, данные спутникового мониторинга) в прибрежных районах Азовского моря (1) и количества погибшей здесь рыбы ( $\Pi$ , т) за июнь-август (2)

На рис. 3 видно практически полное соответствие экстремумов на обоих графиках. Временной ход представленных показателей позволяет также предположить наличие в интервале времени с 1988 по 1998 г. квазидвухлетней цикличности. В нечетные годы интенсивность заморов возрастала и снижалась в четные. Отметим, что квазидвухлетний цикл типичен для межгодового хода целого ряда гидрофизических величин Азово-Черноморского бассейна [6, 9]. Один из вариантов интерпретации этой периодичности предложен в [6].

После 1998 г. в изменениях анализируемых показателей проявились разнонаправленные тенденции (рис. 3). При увеличении частоты появления потенциально заморных зон отмечено снижение количества отмеченной в прибрежной части моря погибшей рыбы. Это может быть объяснено тем, что в это время на фоне высоких значений температуры воды по всему Азовскому морю массовые заморы рыбы наблюдались, преимущественно, в глубоководной его части и в меньшей степени – в прибрежных водах.

Межгодовые изменения интенсивности развития гипоксии связаны не только с текущими погодными условиями. Летом после мягкой зимы гипоксия и заморы гораздо более часты и распространяются на более обширные участки моря по сравнению с летом после умеренных и суровых зим. Данный эффект объясняют интенсивностью осенне-зимней аккумуляции органического вещества в донных отложениях, которая максимальна в годы с мягкими зимами [2, 4].

Материалы спутникового мониторинга и рассчитанный по ним показатель  $P\%$  для летних месяцев и всего Азовского моря для каждого года и данные классификации зим, заимствованные из [3], позволили на количественном уровне показать обсуждаемую зависимость между степенью суровости зим и интенсивностью заморов в Азовском море.

На графике (рис. 4) каждый экстремум ломаной линии показывает интенсивность развития гипоксии в Азовском море и степень суровости зимы за текущий год.

В годы с умеренными ( $У$ ) зимами гипоксия в Азовском море наименее выражена (показатель  $P\%$  минимален и изменяется в интервале 0–38 %). В годы с мягкими ( $М$ ) зимами гипоксия и заморы гораздо более часты и развиты,  $P\%$  максимален (54–96 %). Так, летний сезон 1994 г. после умеренной зимы с позиции рассматриваемых явлений для Азовского моря был самым благоприятным ( $P\% = 0$ ). В этот год гипоксия и заморы рыбы не наблюдались. Тогда как после крайне мягкой зимы в лето 2007 г. практически все Азовское море, в том числе прибрежные участки, оказалось пораженным гипоксией ( $P\% = 96$ ). Это сопровождалось мощными заморами рыбы. Отметим, что суровых зим в исследуемом районе в течение последних примерно 2 десятилетий не было вовсе.

Следует также отметить, что скапливающаяся в донных осадках органика, окисляясь, увеличивает дефицит кислорода в придонном слое. В случае приближения концентраций кислорода к нулевым значениям начинается массовая гибель придонных рыб и донных организмов, затем интенсивное оседание на дно взвешенной органики, разложение и насыщение вод биогенами [10], а донных осадков – сероводородом. Таким образом,

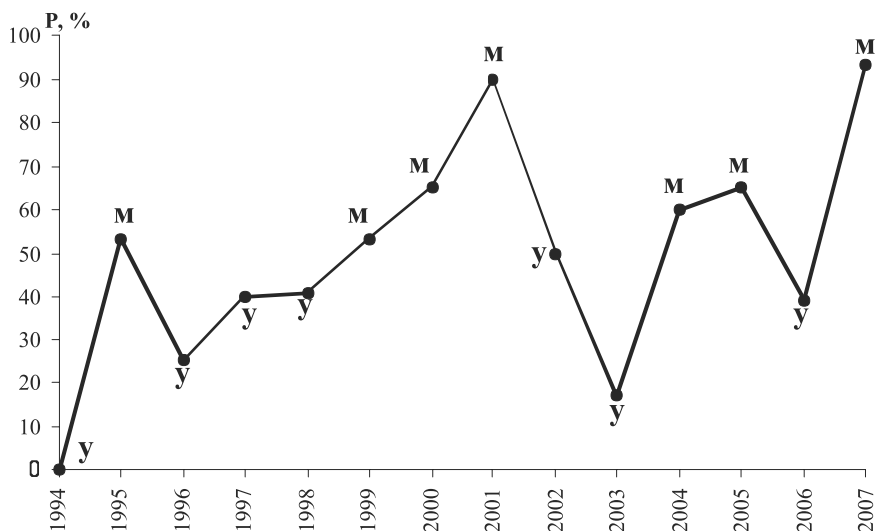


Рис. 4. Межгодовой ход показателя развития потенциально заморных зон в летние месяцы (показатель P, %, данные спутникового мониторинга) в Азовском море в зависимости от степени суровости зим: «У» – умеренная зима, «М» – мягкая зима

при сравнительно высоких температурах воды может быть высказано предположение о возможности развития автоколебательного процесса усиления гипоксии в придонном слое за счет взаимодействия воды и донных осадков.

Эта мысль о неоднозначности причин развития гипоксии была высказана еще в начале периода интенсивных изменений азовской экосистемы [1, 7, 8].

В Керченском проливе вследствие его мелководности, развитой системы течений и вертикального обмена, кислородный режим менее благоприятен для развития гипоксии и заморов по сравнению с Азовским морем. Однако, усиливающийся антропогенный пресс, а также межгодовые природные вариации гидрометеорологических условий способствовали в течение последнего десятилетия снижению водообмена через пролив [10, 11], что, в свою очередь, привело к увеличению вероятности формирования зон гипоксии. На количественном уровне этот вопрос рассмотрен в [5].

Мощный замор как результат развития гипоксии в Керченском проливе отмечен 10–12 августа 2004 г. Признаки этого редкого для пролива явления были зафиксированы на спутниковых картах температуры поверхности моря 9 и 10 августа. Гипоксией оказалась пораженной обширная акватория от азовского предпроливья до южной части пролива. Зарегистрировано значительное количество погибшей рыбы донного комплекса – бычки, пиленгас, барабуля.

Случаи массовой гибели рыбы и мидии, наблюдающиеся в проливе, как правило, не связывают с дефицитом кислорода. По мнению В.А. Брянцева [5], а также специалистов ЮгНИРО (г. Керчь) и АзНИИРХ (г. Ростов-на-Дону), причина этих явлений, в основном, обусловлена влиянием свалок изъятых при дноуглубительных работах грунта. На участках дна, подверженных влиянию свалок, придонный слой заражен сероводородом.

Наблюдается массовая гибель рыбы и мидии, поражение донных биоценозов. К настоящему времени утеряны обширные площади для нагула и нереста рыб.

**Заключение.** На базе данных спутникового мониторинга температуры морской поверхности и серии подспутниковых контактных океанографических экспериментов на поверхности Азовского моря и Керченского пролива выявлены характерные признаки проявления придонной гипоксии. Оценена возможность оперативного обнаружения, контроля и предвидения динамики заморных участков на базе спутниковой информации. Обнаружены некоторые закономерности межгодовой изменчивости интенсивности заморов и массовой гибели рыбы.

Показано, что явление гипоксии в Азовском море наблюдается в летние месяцы года и периодически охватывает обширные его участки, включая прибрежные и открытые воды.

Участки, пораженные придонной гипоксией, фиксируются на спутниковых снимках как локальные максимумы в поле температуры морской поверхности.

Гипоксия в Азовском море сопровождается массовой гибелью рыбы, количество которой определяется площадью пораженных участков. Наиболее интенсивные заморы наблюдаются, когда гипоксия распространяется в прибрежную зону. Во время заморов массово гибнет рыба донного комплекса – бычки, камбала, пиленгас, барабуля.

Высказано предположение о возможности развития автоколебательного процесса усиления гипоксии в придонном слое за счет взаимодействия воды и донных осадков.

Для Азовского моря в межгодовом ходе интенсивности гипоксии и количества погибшей вследствие этого явления рыбы обнаружен двухлетний цикл. Также показано, что в лето после мягкой зимы заморы гораздо более интенсивны и часты. Они распространяются на большие площади по сравнению с летом после умеренной зимы.

В Керченском проливе массовая гибель рыбы и мидии, как правило, не связана с гипоксией. Причина этих явлений в основном обусловлена влиянием свалок изъятых при дноуглубительных работах грунта. В районах, примыкающим к свалкам, придонный слой заражен сероводородом. Наблюдается массовая гибель рыбы и мидии, поражение донных биоценозов.

Полученный результат демонстрирует возможность спутникового мониторинга температуры поверхности Азовского моря в приложении к прогностическим задачам, касающимся обнаружения и слежения за развитием зон придонной гипоксии, а также за сопровождающей это явление массовой гибелью рыбы.

1. Александрова З. В., Семенов А. Д., Ромова М. Г., Баскакова Т. Е. Режим кислорода и содержание биогенных веществ Азовского моря в многолетнем аспекте // Сборник научных трудов 1996-1997 гг.: Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна. – Ростов-на-Дону, 1998. – С. 34-42.
2. Боровская Р. В., Панов Б. Н., Спиридонова Е. О., Лексикова Л. А. Связь придонной гипоксии и заморов рыбы в прибрежной части Азовского моря // Системы

- контроля окружающей среды. Вып. 5. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. – С. 320–328.
3. Боровская Р. В., Ломакин П. Д., Панов Б. Н., Спиридонова Е. О. Современное состояние ледовых условий в Азовском море и Керченском проливе на базе спутниковой информации / Препринт. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. – 42 с.
  4. Бронфман А. М., Хлебников Е. П. Азовское море. Основы реконструкции. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 270 с.
  5. Бранцев В. А. Возможные экологические последствия сооружения Тузлинской дамбы (Керченский пролив) // Морской экологический журнал. – 2005. – 4, №1. – С. 47-50.
  6. Дворянинов Г. С., Голобородько С. В. Междугодовая изменчивость в атмосфере и океане, как колебательный процесс в системе с обратной связью // Морской гидрофизический журнал. – 1994. – № 2. – С. 46-59.
  7. Карпевич А.Ф. Влияние изменяющегося стока рек и режима Азовского моря на его промысловую и кормовую фауну // Труды АзНИИРХ.-1960.-Т 1.-Вып. 1.- С. 3-113.
  8. Ластивка Г. С., Губина Г. С., Сафронова Л. М. Динамика состава доминирующих видов фитопланктона Азовского моря // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азовского бассейна. – Ростов-на-Дону: Полиграф, 1996. – С. 150-158.
  9. Отчет по проекту «Изучение гидрометеорологических, гидрохимических, гидрофизических полей, а также поля радиоактивности Черного и Азовского морей для разработки специализированных пособий и банков данных». – Севастополь: МГИ НАН Украины, 1994. – Заказчик НАМИТ. – ГОССТАНДАРТ № 12/1. – 94 с.
  10. Панов Б. Н., Боровская Р. В., Спиридонова Е. О. Гидрометеорологические предпосылки гипоксии в Азовском море и возможности её прогнозирования // Океанология. – 2000. – Т. 40, № 5. – С. 701-707.
  11. Панов Б. Н., Спиридонова Е. О. Особенности гидрометеорологических условий Керченского региона и их длиннопериодная изменчивость // Система контроля окружающей среды. Вып. 7. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. – С. 193–198.

*На базі даних супутникового моніторингу та серії підспутникових контактних океанографічних експериментів виявлені на поверхні Азовського моря й Керченської протоки характерні ознаки зон придонної гіпоксії. По супутникових картах температури морської поверхні продемонстрована можливість їх фіксації, контролю та передбачення часу і місць масової загибелі риби. Розглянута міжрічна мінливість інтенсивності придонної гіпоксії. Висловлено припущення про можливість розвитку автоколебального процесу посилення гіпоксії в придонній верстві за рахунок взаємодії води та донних опадів.*

*On the basis of satellite monitoring data and a series of contact oceanographic experiments the features of bottom hypoxia zones on the surface of the Azov Sea and Kerch Strait were detected. The capability of their fixation and control as well as forecasting of time and places of mass krill kills on investigated water areas with the sea surface temperature satellite cards was demonstrated. The possibility of the self-oscillation process development of hypoxia increase in the near bottom layer on account of interaction of water and bottom sediments was suggested.*