

УДК 556(075.8)

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМА ВНУТРЕННИХ МОРЕЙ

Н. А. Берлинский, д-р геогр. наук

Одесский государственный экологический университет
ул. Львовская, 15, Одесса, 65016. Украина, nberlinsky@ukr.net

В работе рассматриваются закономерности формирования и динамики кислородного режима внутренних морей в пелагиали и абиссали, прежде всего для Черного моря и Каспия. Выделены три основных фактора формирования особенностей гидрологической структуры и процессов, ответственных за интенсивность газообмена в пелагической зоне. Активно развитые процессы конвекции охватывают всю толщу вод Каспия, где в отличие от Черного моря, происходит интенсивный обмен между верхними и глубинными слоями.

Ключевые слова: Черное, Каспийское море, гидрологическая структура, пелагиаль, кислородный режим.

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе рассматриваются некоторые закономерности формирования и динамики кислородного режима внутренних морей, прежде всего Черного моря и Каспия под влиянием природных и антропогенных факторов.

Генезис дефицита кислорода в морских экосистемах относится к общим проблемам океанологии, а с учетом многофакторности воздействия на условия морской среды, в том числе, таких как природная изменчивость, современное изменение климата, антропогенное влияние, требует научной интерпретации значимости отдельных составляющих и их взаимодействия для получения результирующего эффекта, что относится к нерешенной части. По этой причине цель работы заключается в изучении изменчивости основных гидрологических факторов, способствующих формированию содержания растворенного кислорода в морской воде на примере Черного и Каспийского морей, где проблема гипоксии явно выражена и весьма динамична в современный период.

Под термином внутренние моря, обычно понимают моря, глубоко вдающиеся в сушу и сообщаемые с океаном или прилегающим морем одним или несколькими проливами. К классическим примерам внутренних морей Евразии можно отнести Средиземное, Черное, Азовское и Каспийское. Общность и различия свойств этих морей на протяжении тысячелетий сформировали те условия, которые существуют в настоящее время. В последние десятилетия к ним прибавился фактор антропогенного влияния, который, как правило, негативно отражается на морской среде. Кроме того, следует учиты-

вать и фактор глобальных климатических изменений. Количественно влияние последнего фактора оценить достаточно сложно и здесь уместно использовать вероятностные оценки развития того или иного сценария. В океаносфере проявления климатических изменений обычно связывают с повышением уровня моря, но проявляться они могут и в интенсификации скоростей течений, в изменении генерального переноса водных масс, активизации штормовой деятельности и др.

В целом, к общим закономерностям внутренних морей, помимо их географического расположения в результате геологических процессов предшествующих эпох, относится единство солевого состава: NaCl – около 78%, MgCl₂ – 9%, MgSO₄ – 6,5%, CaSO₄ – 3,5% и KCl – 2%, гидрокарбонаты – 1%.

К различиям относятся объемы вод, глубины и степень водообмена. Так, Средиземное море содержит объем воды 3839 тыс. км³ при максимальной глубине – 5121 м. В Черном море объем воды в море составляет 555 тыс. км, наибольшая глубина – 2210 м. Объем вод в Каспии – 79 тыс. км, максимальная глубина – 1025 м [1]. Азовское море – самое мелкое море в мире: объем вод составляет 290 км³, глубина не превышает 13,5 метров.

Одной из особенностей Черного моря является отсутствие растворенного в воде кислорода ниже 200 метровой глубины. В этом смысле интересно сравнение Черного моря с Каспием, где глубины также достаточно велики, однако интенсивность вертикального обмена различна. Кроме того, следует различать причины формирования дефицита кислорода в морях. Они бывают природные и антропогенные. В работе

представлен анализ причинно-следственных закономерностей развития гипоксии на глубоководье, в пелагиали и абиссали на примерах Каспия и Черного моря, где доминирующими являются природные процессы. Антропогенный генезис придонной гипоксии характерен для шельфа и мелкого моря.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа представляет собой обзор литературных источников по проблеме, который позволяет дать оценку современного состояния газообмена пелагиали и абиссали морских бассейнов. В работе использован системный подход, в основе которого лежит рассмотрение объекта как системы – совокупности взаимодействующих объектов. Данный метод позволил установить закономерности совокупных взаимодействующих объектов. В обобщенном комплексном определении пелагиали и абиссали должны быть отражены местоположение, особенности природных условий и формирующих их процессов. Использован синергетический подход, т.е. междисциплинарное научное направление, изучающее связи между элементами структуры. Комплексное определение морской экосистемы, с позиций одной какой-либо дисциплины как сложный географический комплекс дать невозможно, поэтому исходя из принципов данного подхода, было учтено свойство динамической системы, геофизических, геохимических процессов, прямой техногенной нагрузки на аквальные ландшафты. Для расчета количественных характеристик в устьевых областях рек в работе использованы данные прямых измерений [2] полученные автором при проведении многочисленных экспедиционных исследований.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для сравнения с внутренними морями Евразии уместно рассмотреть гидрологические условия Средиземного моря, которые достаточно хорошо изложены в мировой научной литературе. Средиземное море соединено с Атлантикой широким (от 14 до 44 км) Гибралтарским проливом. В Гибралтарском проливе на разной глубине течения направлены в противоположные стороны. Поверхностное течение направлено из Атлантики в Средиземное море, а глубинное течение – в Атлантический океан. Соленость поступающих Атлантических вод около 36 ‰, а выносимых их Средиземного моря в Атлантику – около 38 ‰.

В Черном море ситуация противоположная :

поверхностное течение выносит черноморские воды, с соленостью менее 20‰ в Средиземное море, а воды с повышенной соленостью (рис. 1) поступают из Средиземного моря в Черное.

Выходя из пролива с Нижнебосфорским течением, соленые воды распространяются к северо-западу на шельфе в виде квазистационарного языка вод с соленостью более 20 ‰ в слое 40-100 м. Достигая края шельфа, соленые плотные воды стекают по склону, заполняя глубинные слои черноморской котловины и образуя горизонтальные интрузии в слое основного пикноклина (~ 100-300 м) [3]. Формирование устойчивой плотностной вертикальной стратификации относится к факторам, ограничивающим вертикальный газообмен. К другому фактору относится процесс зимней вертикальной циркуляции, которая в основном выражена в северо-западной части моря и формирует границу холодного промежуточного слоя (ХПС).

Третий фактор отмечен в [4] как наиболее известный в мировой климатологии режимный сдвиг 1976-1978 гг. В Черном море сдвиг проявился в последующем понижении (до середины 1990-х гг.) зимней температуры и солености поверхностного слоя и ХПС, а также в повышении летней поверхностной температуры воды, что привело к усилению статической устойчивости основного бароклинного слоя на 14 ‰ и повышенной консервации в нем холодных промежуточных вод.

Воздействие речного стока относится к общим факторам, формирующим гидрологию Черного, Каспийского и Азовского морей. В целом гидрологическая структура вод морей создается путем взаимодействия процессов горизонтальной и вертикальной турбулентности и циркуляции вод, вызываемых различными факторами – полем ветра, потоками тепла и массы через поверхность моря, полем плотности, влиянием конфигурации берегов. Гидрологические условия в разных частях моря существенно зависят также от водообмена между ними.

Следует отметить, что проблема развития придонной гипоксии на мелководном шельфе Черного моря либо в Азовском море, как результат антропогенного эвтрофирования, широко известна и механизм процесса представлен во многих работах, например, в [2, 5-10]. Однако сравнение глубоководных участков Черного и Каспийского морей и динамики дефицита кислорода в современных условиях практически не проводились и также представляют определенный интерес.

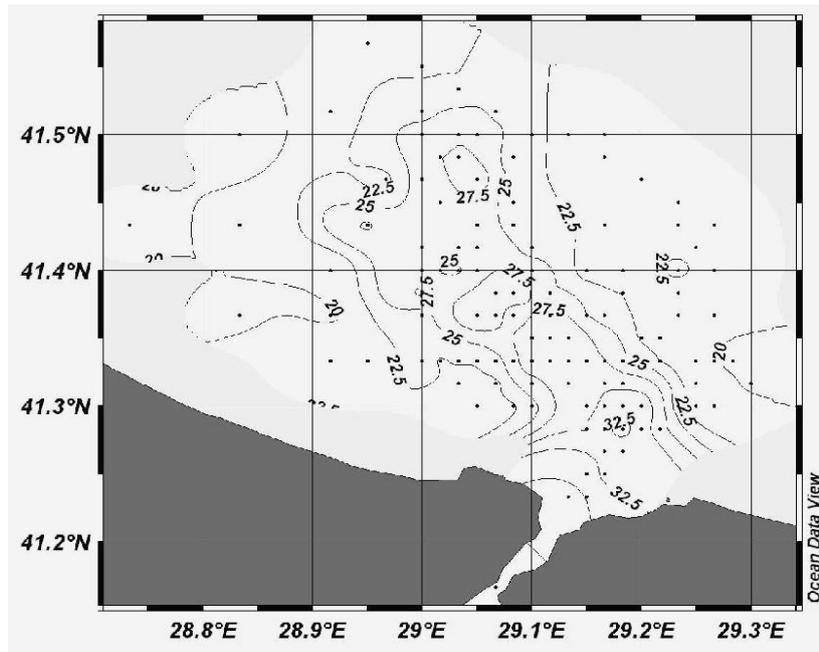


Рис. 1 – Распределение солености (‰) воды придонного слоя на прибосфорском шельфе в весенний сезон, по [3]

Каспийское море полностью изолировано от Мирового океана, т.е. строго говоря, не соответствует определению моря. Однако, общепринятой классификации по данному вопросу не существует, при этом, в научной среде считается, что термин море для Каспия в большей степени справедлив, чем озеро. Для этого есть много причин. Прежде всего, учитывается фактор океанического происхождения Каспия. Существующая в прошлом связь между водами солонатоводного Каспийского моря с Черным подтверждается и общностью фауны обоих бассейнов. И, главное, солевой состав вод Каспия практически идентичен водам Мирового океана и практическая соленость определяется по хлору (морская вода – хлоридного класса натриевой группы, речная вода – гидрокарбонатного класса и кальциевой группы). Можно разделить солевую систему Каспия на четыре внутренне однородных типа вод: приустьевые, опресненные, морские и култушные воды.

Для приустьевых вод с минерализацией до 3–4 г/кг характерна интенсивная осадка карбонатов и непостоянство межзионных соотношений. Опресненные воды Каспия отличаются ростом доли морских ионов и большой пространственной изменчивостью ионных соотношений, связанных со сложным распределением вод разной солености в северной части Каспийского моря, а также с некоторыми региональными факторами. Переход к морскому типу происхо-

дит при солености 11–12 ‰ и обусловлен явными изменениями в солевом составе вод. Собственно морские воды занимают основной объем впадины Каспийского моря (более 98 %) [11].

В Каспийском море режимный сдвиг 1976–1978 гг. сопровождался изменением типа термохалинной стратификации вод: от субтропического с абсолютным летним максимумом солености в поверхностном слое и вертикальной гомохалинностью в остальные сезоны к субполярному с устойчивой соленостной стратификацией, что привело к двукратному увеличению статической устойчивости вод ниже 100 м, почти полному прекращению вентиляции глубинных вод Каспия (склонового каскадинга) и чрезвычайному уменьшению в них концентрации растворенного кислорода. Тогда как ранее отмечалось, что в замкнутом Каспийском море конвективное перемешивание играет первостепенную роль в формировании гидрологической структуры вод, вентиляции придонных слоев. Благодаря активно развитым процессам конвекции, охватывающим всю толщу вод моря, происходит интенсивный обмен между верхними и глубинными слоями [1, 4].

Особенность вертикальной гидрологической структуры вод Каспийского моря такова, то в нем, в отличие от Черного моря, не образуется холодного промежуточного слоя на нижней границе зимней циркуляции. В тех районах Каспия, где циркуляция распространяется до дна, проис-

ходит выравнивание температуры и плотности по вертикали. Там же, где она до дна не доходит, температура охваченного ею слоя остается выше, чем нижележащих слоев, что также исключает возможность образования холодного промежуточного слоя. По данным за 1956-1975 гг., толщина слоя, охваченного зимней конвекцией, составляла 150-200 м в Среднем Каспии, 100-150 м на Апшеронском пороге и 80-150 м в Южном Каспии (рис. 2). Наряду с зимней вертикальной циркуляцией важную роль в формировании и вентиляции глубинных и придонных слоев воды играет плотностной сток вод из северных районов моря. Холодные воды с высокой плотностью формируются в обширном мелководном районе вблизи кромки льда в Северном Каспии и на северном склоне среднекаспийской впадины. Сильное выхолаживание, а также осолонение при льдообразовании создают условия для образования здесь вод с такой плотностью, которая позволяет им стекать по склонам дна и вдоль своих изопикнических поверхностей в глубинные слои среднекаспийской впадины.

Зимняя вертикальная циркуляция развита по всей акватории Каспия, но ввиду уменьшения величины охлаждения в направлении с севера на юг глубина ее распространения также уменьшается в этом направлении. В верхнем слое воды, охваченном зимней вертикальной циркуляцией, наблюдается однородное распределение температуры, солености, плотности воды, высокое содержание кислорода. Нижняя граница перемешанного слоя четко выделяется по повышенным градиентам этих характеристик. Таким образом, зная вертикальное распределение гидрологических и гидрохимических параметров в конце периода охлаждения, можно довольно точно определить глубину распространения зимней вертикальной циркуляции в разных частях моря (рис. 2).

Формирование и вентиляция глубинных вод Южного Каспия происходят главным образом благодаря поступлению среднекаспийских вод через Апшеронский порог и опусканию их вдоль склона дна в глубинные слои южнокаспийской впадины. Кроме того, в Южном Каспии также существует возможность плотностного стока вод с восточного шельфа – из Туркменского залива и других районов, но зимнее охлаждение здесь меньше, чем в средней части моря.

Процесс плотностного стока холодных вод в придонные слои среднекаспийской впадины сопровождается повышением в них содержания кислорода до 3,5-4,0 мл/л в слое от 400 м до дна. В то же время на промежуточных глубинах ко-

личество кислорода более низкое (2,5-3,0 мл/л) [1].

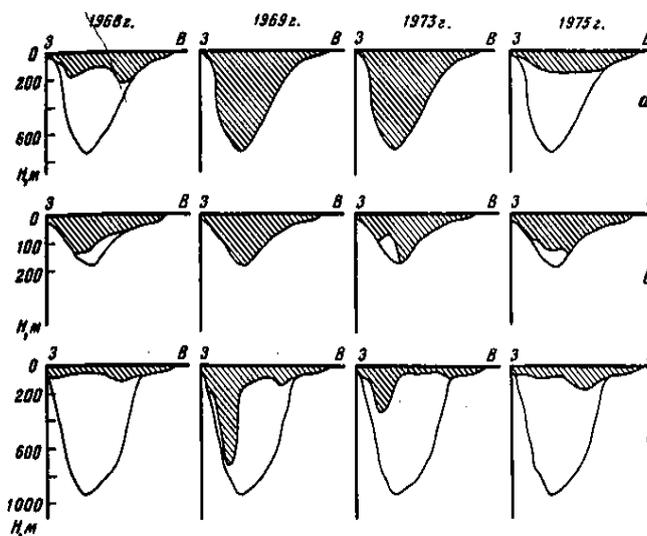


Рис. 2 – Глубина распространения зимней вертикальной циркуляции (штриховка) на разрезах Дивичи-Кендерли (а), Жилой-Куули (б) и Куринский Камень-Огурчинский (в) в феврале 1968, 1969, 1973, 1977 гг., по [12].

В работе [12] анализируются многолетние колебания содержания растворенного кислорода в глубинных слоях Каспийского моря. В ходе работы Каспийской экспедиции 1914-1915 гг. ниже 400-500 метров были зафиксированы концентрации кислорода, не превышающие 2 мл/л. У дна кислород не был обнаружен вовсе. Спустя 20 лет, во время исследований С. В. Бруевича, когда, как и сейчас, наблюдался высокий уровень моря, концентрации кислорода в глубинных слоях Южного Каспия были очень малы и составляли в среднем всего 0,5 мл/л. Более того, в придонном слое Южного Каспия был обнаружен сероводород в концентрациях 0,1-0,3 мл/л. Резкое понижение уровня моря в 30-е годы существенно изменило гидрохимический режим моря. Произошло значительное обогащение придонных слоев за счет более интенсивной зимней вертикальной циркуляции в условиях осолонения поверхностного слоя, поскольку ведущая роль в формировании гидрологической структуры моря принадлежит именно процессам конвективного перемешивания [1]. При понижении уровня моря дефицит кислорода в придонных слоях впадин Среднего и Южного Каспия сильно уменьшился. К концу 50-х – началу 60-х насыщение кислородом глубинных вод Среднего Каспия на горизонтах 400 и 600 м возросло на 11 и 16 % соответственно, по сравнению с 1930-1940 гг. Отмечалось усиление осенне-зимней конвекции и возрастание придонных концентра-

ций до 3,0-3,5 мл/л в Среднем Каспии и 2,0 мл/л в Южном. В 1977 году была достигнута минимальная отметка уровня моря, после чего уровень начал подниматься. В глубинных слоях наблюдался процесс повышения солености и повышения статической устойчивости каспийских вод. Тем не менее, содержание кислорода оставалось высоким вплоть до 1983 года, когда концентрации в глубоководных котловинах Среднего и Южного Каспия составили соответственно 2,4 и 3,6 мл/л.

Как отмечается в [1], последовательное уменьшение содержания кислорода у дна с 1983 года по настоящее время происходит в соответствии с повышением уровня моря. Исследования процессов, определяющих аэрацию глубинных вод и нарастание гипоксии, показали, что высокий уровень является лишь необходимым, но недостаточным условием возникновения сероводорода. Гидролого-гидрохимические исследования, выполненные в августе-сентябре 2002 г. в Среднем и Южном Каспии показали нарастание гипоксии у дна в котловине Южного Каспия по сравнению с предшествующим годом. В Южно-каспийской котловине в 2001 году придонные значения кислорода равнялись 1,4 мл/л на глубине 900 метров, в то время как придонные значения растворенного кислорода в Среднем Каспии на глубине 700 м не превышали 0,7 мл/л.

Очевидно, что в Южном Каспии зимняя вертикальная циркуляция не достигла дна. Для полного исчерпания кислорода и появления сероводорода в придонных водах Среднего Каспия необходимо несколько теплых зим подряд, когда конвекция не будет достигать дна. В Южном Каспии условием образования сероводорода является, очевидно, несколько относительно прохладных летних периодов, когда не формируются высокосолёные поверхностные воды. Таким образом, для полного исчерпания кислорода и появления сероводорода требуются аномальные условия, вероятность наступления которых невелика. Отсутствие мощного пикноклина в Каспии обеспечивает достаточную аэрацию глубинных вод, и для появления даже небольших количеств сероводорода требуется сочетание аномальных условий, ограничивающих зимнюю вертикальную циркуляцию [12]. В этом основное отличие периодического формирования сероводорода в глубинных слоях Каспия до перманентного – в Черном море.

В Черном море ХПС расположен в пределах изотерм 8°. По вертикали ХПС ограничен слоями со значительной гидростатической устойчивостью, затрудняющими обмен теплом и массой

по вертикали, что способствует консервативности всех характеристик слоя. Формирование ХПС обусловлено адвективным происхождением. В центральных районах ядро ХПС расположено на горизонте 50 м, в прибрежных – 75 м. В северо-западной части оно занимает тонкий придонный слой. Осенью, конвективное перемешивание ликвидирует холодный придонный слой. Адвективное проникновение относительно распресненных вод северо-западной части (с соленостью в подповерхностных слоях менее 18,5‰) в центральные и южные районы моря прослеживается во все периоды года. Одновременно, со стороны Босфора происходит приток более теплых и соленых вод. При этом весной в западной половине моря холодные промежуточные воды распространяются благодаря изопикнической адвекции, а соленые глубинные воды занимают наиболее близкое к поверхности положение в результате зимнего усиления циклонической циркуляции вод. Это сопровождается подъемом нижележащих слоев в центре западного стационарного круговорота. В августе крупномасштабная адвекция холодных вод становится менее интенсивной. В феврале прослеживается адвекция холодных вод их северо-западной части в открытое море. Южнее Дуная происходит стекание холодных вод вдоль материкового склона [2, 13].

Аналогичный процесс формирования ХПС может происходить в районе Керченского шельфа. Как отмечено в [13], таким образом, основным районом формирования холодных вод является северо-западная часть моря, включая материковый склон. В феврале - апреле под действием Основного черноморского течения холодные воды перемещаются вдоль Керченского пролива, где встречаются дополнительный источник холода. Концентрируясь у юго-восточного побережья, холодные воды оказываются изолированными от районов с активной динамикой. Наличие мощных градиентов статической устойчивости на глубинах от 50 до 120 м с максимумом до $E = 4 \cdot 10^4$ в феврале и значениях около $E = 1 \cdot 10^4$ в слоях, расположенных выше и ниже ХПС, позволяет утверждать о мощном природном экранировании вертикального перемешивания.

В Азовском море, в условиях мелководья изменчивость вертикального газообмена выражена кратковременно и относится к сезонным и мезомасштабным процессам и, в большей мере, идентична развитию придонной гипоксии в первую половину теплого времени года в северо-западной части Черного моря [2].

4. ВЫВОДЫ

В Черном море формирование устойчивой плотностной вертикальной стратификации происходит за счет интрузии соленых плотных вод Нижнебосфорского течения, а зимняя вертикальная циркуляция выражена только в северо-западной части моря, что в целом лимитирует вертикальный газообмен на глубоководье. Режимный сдвиг гидрологических характеристик 1976-1978 гг. привел к усилению статической устойчивости слоев, что в большей мере ограничило вертикальный обмен.

В замкнутом Каспийском море конвективное перемешивание играет первостепенную роль в формировании гидрологической структуры вод и вентиляции придонных слоев. Благодаря активно развитым процессам конвекции, охватывающим всю толщу вод моря, происходит интенсивный обмен между верхними и глубинными слоями. В отличие от Черного моря, здесь не образуется холодный промежуточный слой на нижней границе зимней циркуляции. В Каспийском море режимный сдвиг 1976-1978 гг. привел к двукратному увеличению статической устойчивости, почти полному прекращению вентиляции глубинных вод Каспия (склонового каскадинга) и чрезвычайному уменьшению в них концентрации растворенного кислорода. На современном этапе в холодные зимы в северном Каспии сильное выхолаживание, а также осолонение при льдообразовании, создают условия для формирования здесь вод с такой плотностью, которая позволяет им стекать по склонам дна вдоль изопикнических поверхностей, аэрируя море.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каспийское море. Гидрология и гидрохимия / под ред. С. С. Байдина, А. Н. Косарева. Москва : Наука, 1986. 261 с.
2. Берлинский Н. А. Динамика техногенного воздействия на природные комплексы устьевой области Дуная : монография. Одесса : Астропринт, 2012. 252 с.
3. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 2. Черное море / Ильин Ю. П. и др. Севастополь, 2012. 412 с.
4. Тужилкин В. С. Сезонная и многолетняя изменчивость термохалинной структуры вод Черного и Каспийского морей и процессы ее формирования : автореф. дис. д-ра геогр. наук / МГУ. Москва, 2008. 48 с.
5. Берлинский Н. А. Механизм формирования придонной гипоксии в шельфовых экосистемах. *Водные ресурсы*. 1989. №4. С. 112-121.
6. Берлинский Н. А., Дыханов Ю. М. К проблеме формирования придонной гипоксии в северо-западной части Черного моря. *Экология моря*. 1991. Вып. 38. С. 11-15.
7. Берлинский Н. А., Косарев Н. А., Богатова Ю. И., Гаркавая Г. П. Влияние Дуная на экологические условия северо-западной части Черного моря. *Вестник МГУ*. 2004. №5. С. 17-21.
8. Белевич Р. Р., Орлова И. Г. Особенности межгодовой изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик вод на северо-западном шельфе Черного моря в последние десятилетия (60-90-е годы). *Морской гидрофизический журнал*. 1996. № 2. С. 62-73.
9. Берлинский Н. А., Тужилкин В. С., Косарев А. Н., Налбандов Ю. Р. Изменчивость гидрофизических полей и придонной гипоксии. *Северо-западная часть Черного моря: биология и экология* / ред. Ю. П. Зайцев, Б. Г. Александров, Г. Г. Миничева. Киев : Наукова думка, 2006. Раздел I.
10. Berlinsky, N., Bogatova, Yu., Garkavaya, G. (2006). Estuary of the Danube. In: Wangersky, P.J. (Ed.). *The Handbook of Environmental Chemistry*. Berlin-Heidelberg : Springer-Verlag, vol.5, pp. 233-264.
11. Скороход А. И. Особенности солевого состава вод Каспийского моря : автореф. дис. канд. геогр. наук. / МГУ. Москва, 1996. 35 с.
12. Белов А. А. Исследование изменений гидрохимической структуры Каспийского моря за последние 70 лет : автореф. дис. канд. геогр. наук / МГУ. Москва, 2004. 31 с.
13. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / Блатов В. С., Булгаков Н. П. и др. Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. 240 с.

REFERENCES

1. Baydin, S.S., Kosarev, A.N. (Eds). (1986). *Kaspiyskoe more. Gidrologiya i gidrokhimiya* [The Caspian Sea. Hydrology and hydrochemistry]. Moscow : Nauka. (in Russ.)
2. Berlinskiy, N.A. (2012). *Dinamika tekhnogenogo vozdeystviya na prirodnye komplekсы ust'evoy oblasti Dunaya*. [Dynamics of technogenic impact on natural complexes of the mouth area of the Danube]. Odessa. Astroprint. (in Russ.)
3. Il'in, Yu.P. et al. (2012). *Gidrometeorologicheskie usloviya morey Ukrainy T. 2. Chernoe more* [Hydrometeorological conditions of the seas of Ukraine. Vol. 2. Black Sea]. Sevastopol. (in Russ.)
4. Tuzhilkin, V.S. (2008). *Sezonnaya i mnogoletnyaya izmenchivost' termokhalinnoi struktury vod Chernogo i Kaspiyskogo morey i processy ee formirovaniya* [Seasonal and long-term variability of the thermohaline structure of the waters of the Black and Caspian seas and the processes of its formation]. Abstract of Dr. Geogr. Sc. dissertation, Moscow State Un-ty, Moscow. (in Russ.)
5. Berlinskiy, N.A. (1989). [Mechanism of formation of benthic hypoxia in shelf ecosystems]. *Vodnye resursy* [Water resources], 4, 112-121. (in Russ.)
6. Berlinskiy, N.A., Dykhanov, Yu.M. (1991). [To the problem of formation of bottom hypoxia in the northwestern part of the Black Sea]. *Ekologiya morya* [Sea Ecology], 38, 11-15. (in Russ.)
7. Berlinskiy, N.A., Kosarev, N.A., Bogatova, Yu.I., Garkavaya, G.P. (2004). [The influence of the Danube on the ecological conditions of the northwestern part of the Black Sea]. *Vestnik MGU* [Bulletin MSU], 5, 17-21 (in Russ.)
8. Belevich, R.R., Orlova, I.G. (1996). [Features of the interannual variability of hydrological and hydrochemical

- characteristics of waters on the north-western shelf of the Black Sea in recent decades (60-90s)]. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal* [Marine Hydrophysical journal], 02, 62-73. (in Russ.)
9. Berlinsky, N.A., Tuzhilkin, V.S., Kosarev, A.N., Nalbandov, Yu.R. (2006). [Variability of hydrophysical fields and benthic hypoxia]. In: Zaytsev, Yu.P., Aleksandrov, B.G., Minicheva, G.G. (Eds). *Severo-zapadnaya chast' Chernogo morya : biologiya i ekologiya* [North-western part of the Black Sea : biology and ecology]. Kiev : Naukova dumka, ch. I (in Russ.)
 10. Berlinsky, N., Bogatova, Yu., Garkavaya, G. (2006). Estuary of the Danube. In: Wangersky, P.J. (Ed.). *The Handbook of Environmental Chemistry*. Berlin-Heidelberg : Springer-Verlag, vol.5, pp. 233-264.
 11. Skorohod, A.I. (1996). *Osobennosti solevogo sostava vod Kaspiyskogo morya* [Features of the salt composition of the waters of the Caspian Sea]. Abstract of Cand. Geogr. Sc. dissertation, Moscow State Un-ty, Moscow. (in Russ.)
 12. Belov, A.A. (2004). *Issledovanie izmeneniy gidrohimicheskoy struktury Kaspiyskogo morya za poslednie 70 let* [Research of changes in the hydrochemical structure of the Caspian Sea over the past 70 years]. Abstract of Cand. Geogr. Sc. dissertation, Moscow State Un-ty, Moscow. (in Russ.)
 13. Blatov, V.S., Bulgakov, N.P., Ivanov, V.A., Kosarev, A.N., Tuzhilkin, V.S. (1984). *Izmenchivost' gidrofizicheskikh poley Chernogo morya* [Variability of the hydrophysical fields of the Black Sea]. Leningrad : Gidrometeoizdat.

HYDROLOGICAL FACTORS OF FORMATION OF OXYGEN REGIME OF INLAND SEAS

N. Berlinsky, Dr. Sci. (Geography)

Odessa State Environmental University,
15, Lvivska St., 65016 Odessa, Ukraine, nberlinsky@ukr.net

Introduction. The regularities of the formation and dynamics of the oxygen regime in inland seas - the Black Sea and Caspian, under the influence of natural and anthropogenic factors are estimated.

Purpose. One of the features of the Black Sea is the absence of dissolved oxygen in the water below 200 meters depth. A comparison is made between the hydrological conditions of the Black Sea and the Caspian, where the depths are also quite large, but the intensity of vertical exchange is different. In addition, it is necessary to distinguish the reasons for the formation of oxygen deficient in the seas. They can be natural and human-made origin as well. The paper presents an analysis of the cause-and-effect patterns of the development of pelagial hypoxia as the examples of the Caspian and the Black Sea.

Methods. The work is the review of the problem literature that allows an assessment of the current state of gas exchange of pelagic and abyssal marine basins.

Results. Three main formation factors of the features of the hydrological structure and processes responsible for the intensity of gas exchange in the pelagic zone are identified. So, in the Black Sea, saline waters come with the Lower Bosphorus Current and flow down the slope, filling the deep layers of the Black Sea basin, forming a stable vertical stratification density, that limiting vertical gas exchange. The second factor is contributing to oxygen saturation of the lower layers during the process of winter vertical circulation that is mainly expressed in the northwestern part.

The third factor is the regime shift of 1976-1978 in the Black Sea as a decrease of the winter temperature and salinity in the surface layer that led to increasing of static stability. According to actively developed convection processes, covering the entire body of the Caspian Sea, in contrast to the Black Sea, there is an intensive exchange between the upper and the deep layers and the intensity of convection depends on the temperature regime of the year. In the Caspian Sea, the regime shift of 1976-1978 led to a twofold increase in the static stability of water below 100 m, the almost complete cessation of the ventilation of the deep waters of the (the process the slope cascading) and the extreme decrease in the concentrations of dissolved oxygen.

Conclusion. In the Black Sea, the formation of a stable of the density vertical stratification is due to the intrusion of saline dense waters of the Lower Bosphorus Current, and the winter vertical circulation is expressed only in the northwestern part of the sea, which generally limits vertical gas exchange with the deep water. In the Caspian Sea, convective mixing plays a main role in the formation of the hydrological structure of water and the ventilation of the bottom layers. In cold winters in the northern Caspian, strong cooling, as well as salinity during ice formation, creates the conditions for the formation of waters with a density that allows them to flow down the slopes of

the bottom along isopycnic surfaces and aerating the deep layers of the sea.

Key words: Black and Caspian Sea, hydrological structure, pelagic, oxygen regime.

ГІДРОЛОГІЧНІ ФАКТОРИ ФОРМУВАННЯ КИСНЕВОГО РЕЖИМУ ВНУТРІШНІХ МОРІВ

М. А. Берлінський, д-р геогр. наук

*Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, nberlinsky@ukr.net*

В роботі розглядаються закономірності формування і динаміки кисневого режиму внутрішніх морів, перш за все Чорного моря і Каспію в пелагіалі і абісалі. Однією з особливостей Чорного моря є відсутність розчиненого у воді кисню нижче 200 метрової глибини. Виконано порівняння гідрологічних умов Чорного моря з Каспієм, де глибини також досить великі, однак інтенсивність вертикального обміну різна. Крім того, слід розрізняти причини формування дефіциту кисню в морях. Вони бувають природні і антропогенні. У роботі виконаний здійснено аналіз причинно-наслідкових закономірностей розвитку гіпоксії пелагіалі на прикладах Каспію і Чорного моря.

Методично робота є оглядом літературних джерел з проблеми, які дозволяють дати оцінку сучасного стану газообміну пелагіалі і абісалі морських басейнів.

Виділено три основних чинника формування особливостей гідрологічної структури і процесів, відповідальних за інтенсивність газообміну в пелагічній зоні. Перший – надходження солоних вод з Нижньобосфорською течією, стікання їх по схилу, заповнення глибинних шарів чорноморської улоговини, формування стійкої вертикальної стратифікації, яка обмежує вертикальний газообмін. До другого фактору, що сприяє насиченню киснем нижніх шарів, відноситься процес зимової вертикальної циркуляції, яка в основному виражена в північно-західній частині Чорного моря. Третій фактор – це режимне зміщення 1976-1978 рр., виражене в Чорному морі у змінах зимової температури і солоності поверхневого шару, що призвело до посилення статичної стійкості. Завдяки активно розвиненим процесам конвекції, яка охоплює всю товщу вод Каспію, на відміну від Чорного моря відбувається інтенсивний обмін між поверхневими і глибинними шарами. При цьому інтенсивність конвекції залежить від температурного режиму року. У Каспійському морі режимне зміщення 1976-1978 рр. призвело до двократного збільшення статичної стійкості вод нижче 100 м, майже повного припинення вентиляції глибинних вод (схилового каскадінга) і зменшення в них концентрації розчиненого кисню.

Основні висновки полягають в тому, що у Чорному морі формування стійкої вертикальної стратифікації відбувається за рахунок інтрузії солоних щільних вод Нижньобосфорської течії, а зимова вертикальна циркуляція виражена тільки в північно-західній частині моря, що в цілому лімітує вертикальний газообмін на глибині. У замкнутому Каспійському морі конвективне перемішування грає першорядну роль в формуванні гідрологічної структури вод і вентиляції придонних шарів.

У холодні зими в північному Каспії сильне вихолодження, а також осолонення при льодоутворенні, створюють умови для формування вод з такою щільністю, яка дозволяє їм стікати по схилах дна уздовж ізопікнічних поверхонь, аеріруючи глибинні шари моря.

Ключові слова: Чорне, Каспійське море, гідрологічна структура, пелагіаль, кисневий режим.

Подання до редакції: 21. 11. 2017

Надходження остаточної версії: 15. 06. 2018

Публікація статті: 29. 06. 2018