

УДК 551.465

ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЗАПАДНОМ БАССЕЙНЕ АРАЛЬСКОГО МОРЯ В СЕНТЯБРЕ 2006 г.

© 2008 г. П. О. Завьялов¹, Е. Е. Андрулионис¹, Е. Г. Арашкевич¹, А. Б. Грабовский¹, С. Н. Дикарев¹, Т. В. Кудышкин², А. К. Курбаниязов³, А. А. Ни⁴, Ф. В. Сапожников¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширинова РАН, Москва, Россия

²Среднеазиатский гидрометеорологический институт, Ташкент, Узбекистан

³Нукусский государственный педагогический институт, Нукус, Узбекистан

⁴Институт геологии и геофизики АН РУз, Ташкент, Узбекистан

e-mail: peter@ocean.ru

Поступила в редакцию 09.07.2007 г., после доработки 15.08.2007 г.

Натурные исследования на Аральском море в сентябре 2006 г. были выполнены в ходе очередной, седьмой по счету экспедиции ИО РАН в рамках программы комплексного изучения и мониторинга состояния гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических систем Арала в условиях антропогенного кризиса, реализуемой совместно с рядом научных организаций Узбекистана и Казахстана начиная с 2002 г. Результаты предыдущих экспедиций приведены ранее в ряде публикаций (например, [3–6, 12, 13]).

Полевые работы на этот раз ограничивались по пространственному охвату западным, относительно глубоким бассейном моря (рис. 1). Максимальная глубина бассейна составляет сегодня около 40 м. В ходе предыдущих экспедиций в этом районе были обнаружены высокая плотностная и халинная стратификация ранее (вплоть до начала 1990-х гг.) всегда хорошо перемешанного западного Арала и сопряженные с этим гипоксия и сероводородное заражение в нижней части водной толщи. Вопросы о механизмах формирования и изменчивости термохалинной структуры западной впадины, а также о влиянии соответствующих абиотических факторов на состояние биологических сообществ Аральского моря являются одними из центральных в исследованиях современного Арала. Ранее нами высказывалось и обосновывалось предположение о том, что плотностная стратификация западного бассейна имеет преимущественно адвективное происхождение и должна быть связана с затоками в придонную часть западной впадины воды из более мелководного и осолоненного восточного бассейна через соединяющий две части Большого Арала пролив на севере. Таким образом, гидрофизическое состояние западной впадины Арала является индикатором, в известном смысле характеризующим режим моря в целом. Задачей очередной экспедиции являлось изучение продолжающихся изменений гидрофизических и гидробиологических систем западного бассейна Аральского моря.

Измерения выполнялись с борта надувных лодок Орион-20 и Орион-25 с подвесными моторами Ветерок-12 и Вихрь-23 с помощью ручной лебедки.

СТД-зондирования профилографом SBE 19plus были проведены на 18-ти станциях. Из них 6 станций были выполнены на многолетнем поперечном разрезе через западный бассейн от района метеостанции Актумсук на восток, 8 станций – на меридиональном разрезе вдоль продольной оси западного бассейна, примерно по изобате 40 м, и дополнительно 4 последовательных станции 24, 27, 29 и 30 сентября в точке станции А2

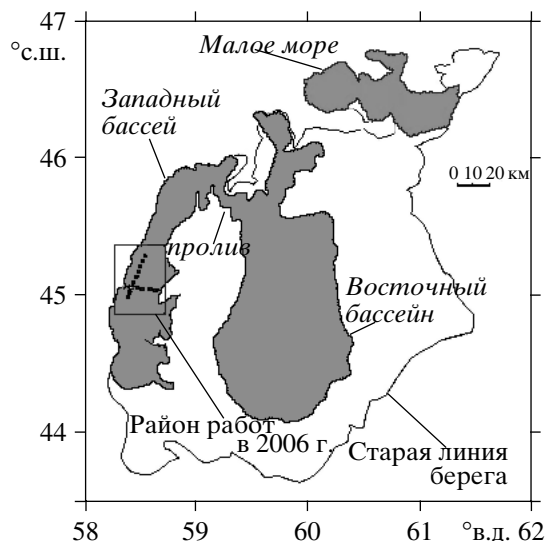


Рис. 1. Современное Аральское море и расположение станций, выполненных в экспедиции. На врезке белым цветом выделена т. А2 (45°05.89' с.ш., 58°23.41' в.д.), где устанавливалась заякоренная станция.

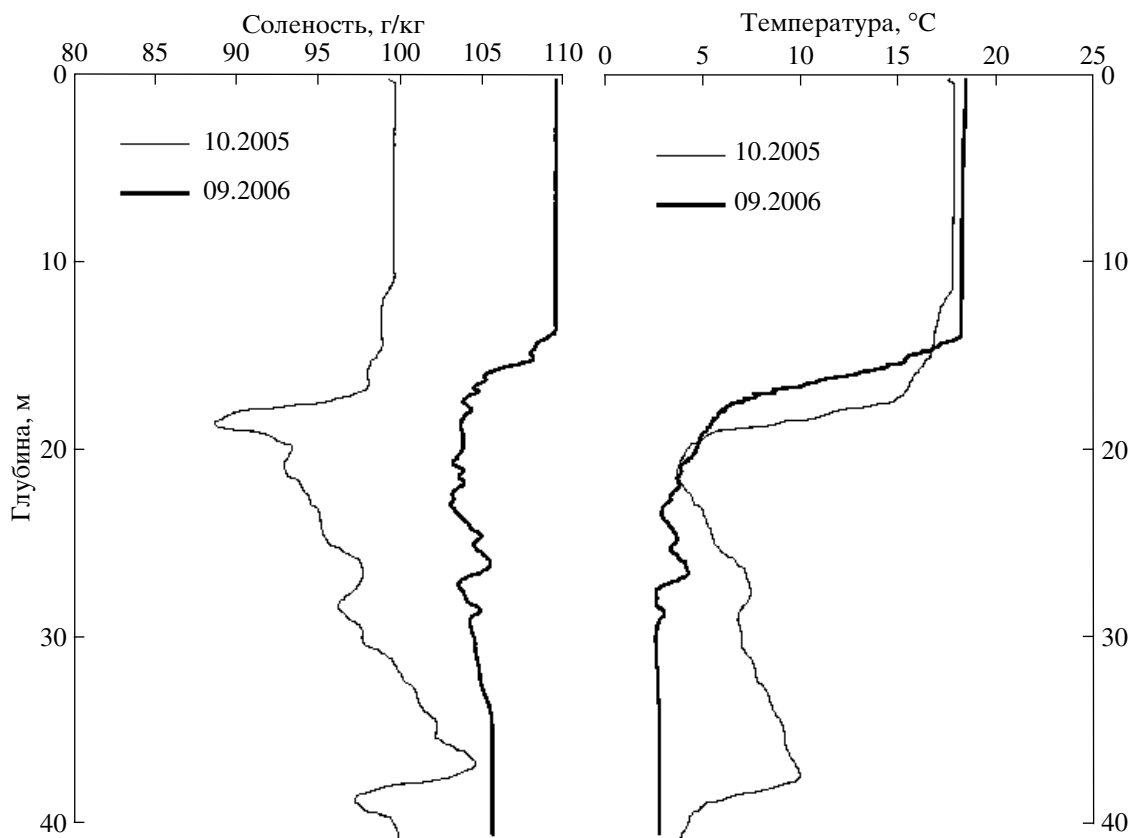


Рис. 2. Характерные профили температуры и солёности в октябре 2005 г (тонкие кривые) и сентябре 2006 г. (жирные кривые).

(45°05.89' с.ш., 58°23.41' в.д), соответствующей максимальной глубине моря. Значения истинной солёности по данным СТД при отличном от океанского ионно-солевом составе были получены посредством специальной корректировочной процедуры [4, 10]. Пробы воды отбирались с горизонтов 0, 10, 20, 30 и 40 м 5-литровым батометром Молчанова. В точке А2 была установлена и работала около 72 час (с 27 по 30 сентября) заякоренная станция с датчиком давления (уровня) на глубине 9 м и акустическим измерителем скорости течения Aquadopp NorTek на глубине 39 м.

Ловы зоопланктона производились модифицированной сетью Нансена с диаметром входного отверстия 18 см и ячеей фильтрующего конуса 180 мкм. Планктон был собран на шести станциях в западной части моря на разрезе от Актумсука до о. Возрождения. Для изучения вертикального распределения артемий были выполнены ступенчатые ловы с глубин, соответствующих глубине залегания основных гидрофизическим градиентов.

Термохалинная структура. Прямое геодезическое определение уровня поверхности моря дало результат 29 м 60 см над уровнем Мирового океана (на 24 сентября 2006 г. в районе метеостанции Актумсук), что указывает на существенное – бо-

лее 60 см – падение уровня Арала за предшествующий год. Ранее, в период с 2002 по 2005 гг., уровень моря колебался лишь незначительно.

Солёность в верхнем квазиоднородном слое западного бассейна достигла максимального значения за весь период наблюдений и составила 109 г/кг, что означает увеличение на 10 г/кг за 7 мес с момента предыдущего измерения в нашей экспедиции в марте 2006 г., на 11 г/кг за год с момента экспедиции в октябре 2005 г. и на 27 г/кг с начала наших наблюдений в ноябре 2002 г.

Вертикальные распределения термохалинных параметров в последние дни сентября 2006 г. показаны на рис. 2 и 3. В верхней части эти распределения качественно, а для профиля температуры и количественно, практически совпадают с наблюдавшимися ровно годом ранее, в первых числах октября 2005 г. В обоих случаях верхний квазиоднородный слой (ВКС) имеет толщину около 15 м при температуре около 17°C (рис. 2). Это дает основание предположить, что к настоящему времени для Аральского моря установился некий “регулярный” годовой цикл температуры, что может быть связано с уменьшением по мере сужения пролива между западным и восточным бассейнами от- носительной роли неперiodических, определяв-

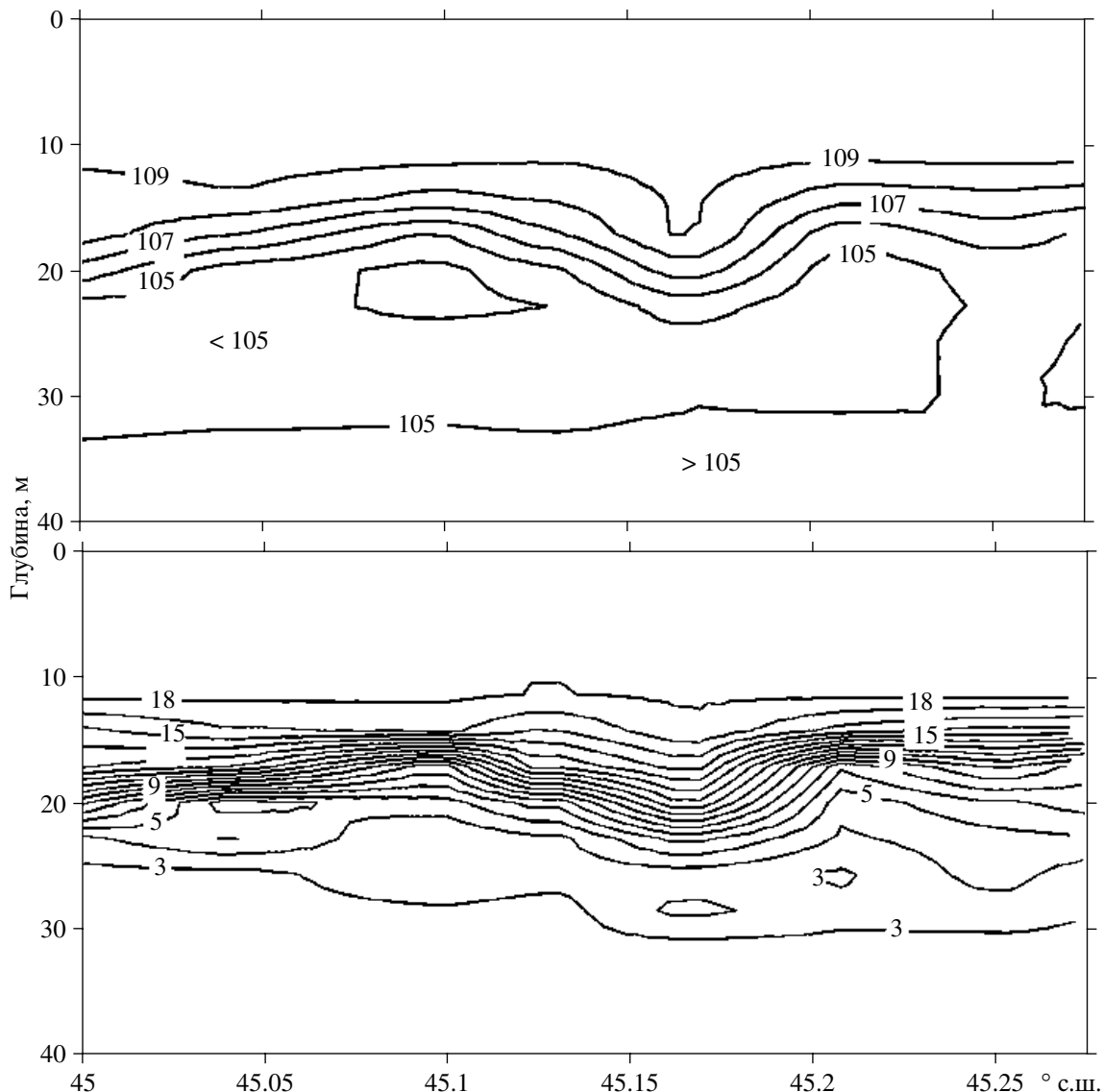


Рис. 3. Распределения температуры (внизу) и солёности (вверху) на продольном разрезе в западном бассейне.

шихся прежде всего ветром, событий адвекции вод восточного бассейна, по сравнению с ролью годового хода инсоляции. В период с 2002 по 2005 гг., характеризовавшийся более интенсивной межбассейновой адвекцией, такого “регулярного” годового хода термической структуры не отмечалось.

В нижней части вертикальных профилей, однако, видны существенные отличия от ситуации, наблюдавшейся годом ранее. Осенью 2005 г. непосредственно под ВКС находился относительно пресный и холодный промежуточный слой, а ниже его температура и солёность возрастали, образуя второй и главный максимум в придонном слое [3]. В сентябре 2006 г. промежуточный минимум солёности под ВКС (104 г/кг по сравнению с 109 г/кг в ВКС) также наблюдался и находился на этой же глубине около 17 м, однако под ним

рост солёности с глубиной был незначительным и придонный максимум солёности (около 106 г/кг) был выражен гораздо слабее, чем осенью 2005 г. При этом величина инверсии температуры в промежуточном и придонном слоях, осенью 2005 г. превышавшая 6°C, составила в сентябре 2006 г. всего около 1°C. На глубинах от 35 м до дна в 2006 г. наблюдался хорошо выраженный придонный перемешанный слой, что должно указывать на присутствие сильного течения. Последнее обстоятельство подтверждается и прямыми измерениями (см. далее).

На глубинах ниже 17–20 м отмечено присутствие сероводорода. По результатам анализа отобранных проб, выполненного в Среднеазиатском гидрометеорологическом институте, максимальная величина его содержания в придонном слое

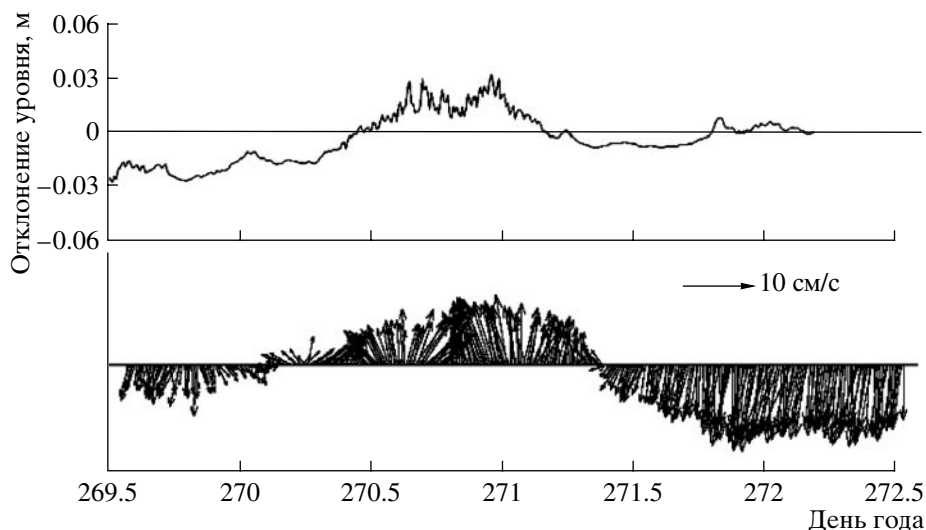


Рис. 4. Измерения уровня моря (вверху) и придонной скорости течения (внизу) на заякоренной станции в т. А2. Ориентация вектора вдоль оси ординат соответствует направлению скорости течения на север.

составила 30 мг/л, что в 2.5 раза меньше “рекордных” значений 2003 г., однако в 6 раз больше концентрации, характерной для 2005 г.

В целом, многократные наблюдения термохалинной структуры западной впадины Аральского моря в период с 2002 по 2006 гг. подтверждают следующую концептуальную схему. Прогрессирующее осолонение западного бассейна происходило и происходит за счет двух конкурирующих механизмов: локального (или конвективного), связанного с летним испарением в приповерхностном слое самого западного бассейна, и адвективного, связанного с поступлением в придонную часть впадины более соленых и плотных вод восточного бассейна через соединяющий бассейны пролив. В летне-осенних условиях первый механизм проявляется в виде максимума солености в ВКС, а второй – в виде придонного максимума солености. Первый механизм стремится, по существу, к разрушению вертикальной стратификации бассейна при осенне-зимней конвекции, второй же, наоборот, способствует росту стратификации и связанным с этим явлениям (в частности, аноксии и сероводородному заражению). Относительные значимости двух механизмов должны определяться интенсивностью летнего испарения с одной стороны и интенсивностью водообмена через пролив с другой. Последняя же уменьшается по мере падения уровня моря и сужения пролива. В 2002–2004 гг., когда ширина пролива была более 3 км, адвективный механизм являлся, по-видимому, доминирующим, и потому вертикальные распределения солености характеризовались единственным и очень ярко выраженным придонным максимумом. В 2005 г. в вертикальных профилях впервые появились два сопоставимых максимума, но придонный максимум все еще оставался глав-

ным. В 2006 г., когда на фоне возобновившегося падения уровня моря ширина пролива, согласно имеющимся спутниковым данным, уменьшилась до 1–1.5 км, приповерхностный максимум солености впервые становится главным, а придонный максимум выражен слабо.

Скорость течения и волновые процессы. Векторная диаграмма для временной серии скорости течения, полученной акустическим измерителем Aquadopp в точке А2 с координатами 45°05.89' с.ш., 58°23.41' в.д. в придонном слое на глубине 39 м в период с 27 по 30 сентября 2006 г. (20-минутные осреднения) приведена на рис. 4. В этой же временной шкале на рисунке показаны данные заякоренного измерителя давления, находившегося на глубине 9 м, т.е. в пределах ВКС. Поскольку никакой изменчивости термохалинного состояния за время проведения эксперимента в пределах ВКС не отмечалось (рис. 5), вся зафиксированная прибором изменчивость давления должна быть связана с колебаниями уровня моря. Поэтому ось ординат на верхнем графике на рис. 4 отградуирована в единицах высоты уровня. Графики на рис. 4 представляют почти синфазные колебания с периодом около 48 час и размахом около 20 см/с для скорости и около 6 см для уровня. При этом в течение всего периода наблюдений движение воды у дна являлось, по существу, одномерным и направленным вдоль оси котловины. Отметим, что во все время этих измерений ветер оставался слабым (0–1 м/с).

Характер обнаруженной изменчивости скорости и уровня заставляют прежде всего предположить наличие сейшевого колебания. Сейши неоднократно наблюдались в Аральском море в его условно-естественном состоянии, до начала выс-

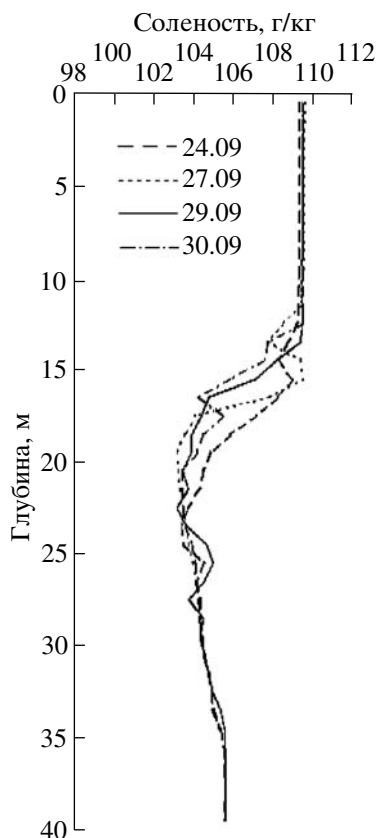


Рис. 5. Последовательные измерения температуры и солёности в т. А2 в период с 24 по 30.09.2006 г.

хания – тогда период основной сейши в западной части моря составлял около 23 час при амплитуде изменений уровня 10–20 см [1, 8]. Однако отмеченные в наших наблюдениях колебания с периодом около двух суток, очевидно, не могут соответствовать поверхностной сейше. Действительно, период основной сейши в приближении мелкой воды определяется формулой

$$T = 2L(gH)^{-1/2},$$

где L – характерный горизонтальный масштаб бассейна, H – глубина, g – ускорение свободного падения. При характерной длине западного бассейна Арала около 200 км и средней глубине его около 12 м, эта формула дает период всего около 11 час. Многоузловые поверхностные сейши характеризовались бы, соответственно, еще меньшими кратными периодами. С другой стороны, наблюдавшаяся картина может быть проявлением многоузловой внутренней сейши на границе раздела ВКС и нижележащего более плотного слоя. Период таких внутренних сейшей определяется формулой [8]:

$$T = 2L[gH_1H_2(\rho_2 - \rho_1)/(H_1\rho_2 + H_2\rho_1)]^{-1/2},$$

где H_1 и H_2 , ρ_1 и ρ_2 – соответственно толщины и плотности двух слоев (остальные обозначения

прежние). В нашем случае в качестве масштаба L нужно брать длину той части западного бассейна, в которой общая глубина превышает глубину ВКС и наблюдается “двухслойность”, то есть около 80 км. Толщины H_1 и H_2 относятся к ВКС (~14 м) и нижележащему слою (0–22 м, в среднем 11 м), а разность плотностей ($\rho_2 - \rho_1$) оценивается в 1 кг/м^3 . Тогда период основной (одноузловой) внутренней сейши должен составлять приблизительно 8 сут, а период четырехузловой – как раз около 2 сут.

На присутствие многоузловой внутренней сейши на верхней границе пикноклина может указывать и характер вертикального распределения температуры вдоль оси западной котловины (рис. 3). Видно, что вертикальные смещения изохалин и изотерм имеют тут волновой характер с размахом до 4–5 м и длиной около 20 км. Последовательные профили солёности в точке А2, измеренные в разные дни во время проведения эксперимента, были показаны на рис. 5. На графиках обращает на себя внимание интенсивная волновая активность в пикноклине. Как можно видеть, это приводит к разбросу значений солёности на одной и той же глубине на 3–4 г/кг. Заметим, что наблюдавшиеся колебания могут объясняться именно внутренней сейшей, а не “обычной” внутренней волной, поскольку при данном градиенте плотности и соответствующем ему значении частоты плавучести с одной стороны и инерционном периоде для этой широты (около 17 час) с другой, внутренние волны в пикноклине должны иметь период от всего нескольких минут до нескольких часов, то есть гораздо меньший наблюдаемого на рис. 4.

Таким образом, выполненные наблюдения дают основание предположить, что в силу особенностей плотностной стратификации и специфической геометрии замкнутого бассейна внутренние сейши играют значительную роль в динамике западного Арала.

Зоопланктон. *Artemia parthenogenetica* – типичный представитель биоты гипергалинных водоемов – была впервые обнаружена в Большом Аральском море в 1998 г. [2, 9], а уже в 2002 г. этот вид абсолютно доминировал в зоопланктонном сообществе, составляя 99% общей биомассы [11]. Начиная с 2002 г., мониторинг планктонного сообщества проводился во всех Аральских экспедициях Института океанологии [3–6]. В 2006 г. были собраны новые данные по численности и структуре популяции *Artemia*, ее репродуктивному потенциалу, а также по определению запасов плавающих и осевших на дно покоящихся яиц (цист).

В период исследования численность популяции *Artemia parthenogenetica* составляла до 1260 экз/м^3 . В популяции доминировали младшие возрастные группы – науплиусы и метанауплиусы, составля-

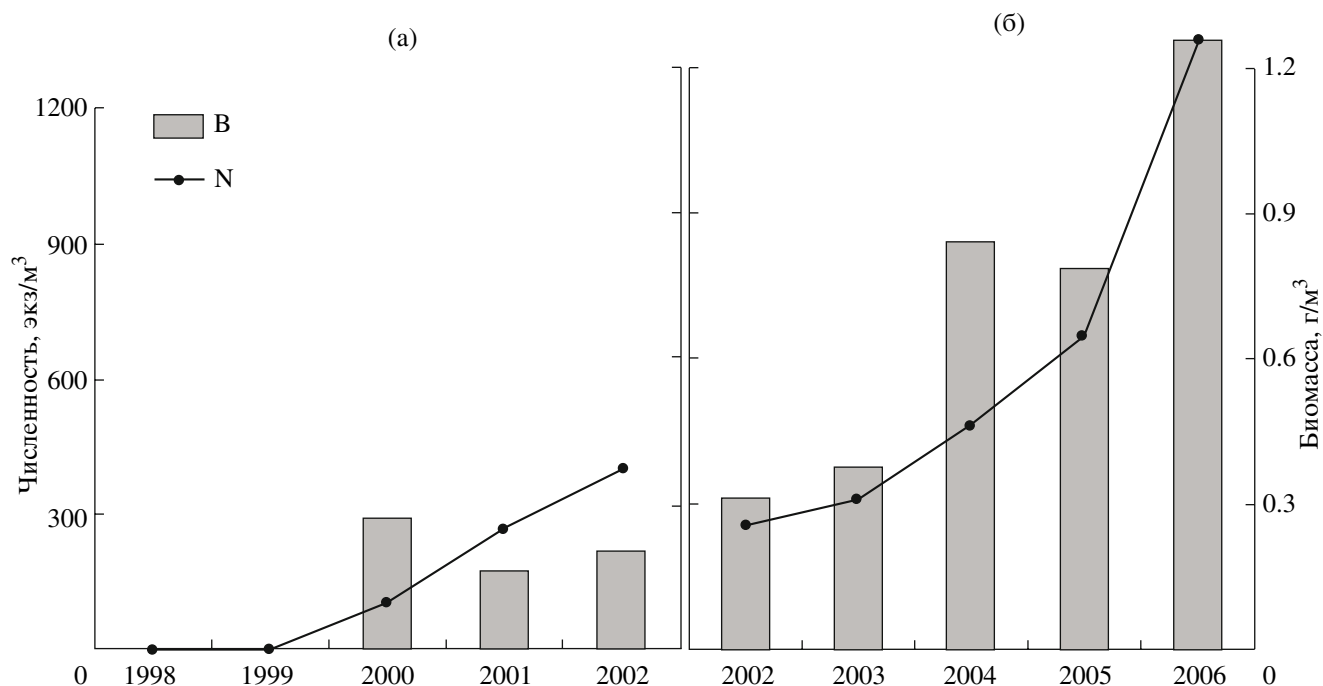


Рис. 6. Межгодовые изменения численности (N) и биомассы (B) *Artemia* в Большом Аральском море: (а) 1998–2002 гг. – по [11], (б) 2002–2006 гг. – собственные данные.

ющие до 50% общей численности. Доля самок не превышала 15–20%. Возрастная структура была сходной на всех исследованных станциях, хотя на самых мелководных участках процент самок в популяции был заметно ниже. Возможно, это связано с наличием отрицательного фототаксиса (т.е. двигательной реакции подвижных микроорганизмов в ответ на изменения освещенности) у взрослых особей.

В глубоководных частях западного бассейна распределение *Artemia* было ограничено верхним 25-метровым слоем, при этом основная часть популяции (>70%) обитала в слое 10–25 м. На глубинах ниже 25 м был зарегистрирован дефицит кислорода, что служило естественной границей распределения артемий.

В октябре 2006 г. 65% самок имели выводковые мешки или овидукты, наполненные яйцами. Размер кладки равнялся в среднем 34 ± 14 яиц на самку, иногда достигая 70 яиц на самку. Практически все самки продуцировали покоящиеся яйца (цисты). Наблюдалась положительная корреляция между размером кладки и длиной самок ($r^2 = 0.39$). Средний диаметр цист, продуцируемых *Artemia* в Аральском море, составляет 262 ± 13 мкм. Благодаря положительной плавучести они плавают на поверхности воды, скапливаясь вдоль границы течений и образуя большие красноватые полосы. В 2006 г. концентрация цист в таких скоплениях достигала $(2-3) \times 10^8$ цист на м². Несмотря на их положительную плавучесть, неожиданно много цист

было найдено в донных осадках. Так, в верхнем 1-сантиметровом слое дна Большого Арала их плотность достигала миллиона цист на м².

Подводя итог пятилетних наблюдений за развитием популяции *Artemia parthenogenetica* в Аральском море, мы можем констатировать постоянный рост численности и биомассы этого вида (рис. 6). В 2000–2002 гг. численность *Artemia* увеличилась в четыре раза [7]. В течение 2002–2006 гг. плотность популяции постоянно росла, в единицах численности – от 250 до 1260 экз/м³, и в единицах биомассы – от 0.3 до 1.3 г/м³.

Работа выполняется при поддержке Программы фундаментальных исследований ОНЗ РАН “Развитие технологий мониторинга и экосистемного моделирования природных ресурсов в условиях аридного климата”, а также РФФИ (проекты № 05-05-64686, № 06-05-74547, № 06-05-64544).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арсеньева Н.М., Давыдов Л.К., Дубровина Л.Н., Конкина Н.Г. Сейши на озерах СССР. Л.: Изд. ЛГУ, 1963. 184 с.
2. Жолдасова И.М., Павловская Л.П., Елбайева М.К. и др. Кардинальные изменения в составе биоты Аральского моря // Узбек. биол. журн. 1999. № 5. С. 68–70
3. Завьялов П.О., Арашкевич А.Г., Грабовский А.Б. и др. Квази-синоптические экспедиционные исследования в западном и восточном бассейнах Араль-

- ского моря (октябрь 2005 г.) // *Океанология*. 2006. Т. 46. № 5. С. 750–754.
4. *Завьялов П.О., Арашкевич А.Г., Дикарев С.Н. и др.* Мониторинг состояния физических, химических и биологических систем Аральского моря в условиях экологического кризиса // *Современные проблемы аридных и семиаридных экосистем юга России* / Отв. ред. Матишев Г.Г. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2006. С. 528–562.
 5. *Завьялов П.О., Гинзбург А.И., Сапожников Ф.В. и др.* Комплексные исследования в западной части Аральского моря в октябре 2003 г. // *Океанология*. 2004. Т. 44. № 4. С. 667–670.
 6. *Завьялов П.О., Костяной А.Г., Сапожников Ф.В. и др.* Современное гидрофизическое и гидробиологическое состояние западной части Аральского моря // *Океанология*. 2003. Т. 43. № 2. С. 316–319.
 7. *Мирабдуллаев И.М.* Развитие артемии в Аральском море // *Биоразнообразие артемии в странах СНГ: современное состояние ее запасов и их использование*. Сб. докладов Международного научно-исследовательского семинара / Под ред. Литвиненко А.И. Тюмень: ТюмГУ, 2004. С. 51–55.
 8. *Шокальский Ю.М.* Физика моря. Л.: Гидрометиздат, 1959. 537 с
 9. *Aladin N.V., Filippov A.A., Plotnikov I.S. et al.* Changes in the structure and function of biological communities in the Aral Sea, with particular reference to the northern part (Small Aral Sea), 1985–1994: A review // *International Journal of Salt Lake Research*. 1998. V. 7. P. 301–343.
 10. *Friedrich J., Oberhansli H.* Hydrochemical properties of the Aral Sea water in summer 2002 // *J. of Marine Systems*. 2004. V. 47. № 1–4. P. 77–88.
 11. *Mirabdullaev I.M., Joldasova I.M., Mustafaeva Z.A. et al.* Succession of the ecosystems of the Aral Sea during its transition from oligohaline to polyhaline waterbody // *J. of Marine Systems*. 2004. V. 47. № 1–4. P. 101–108.
 12. *Zavialov P.O.* Physical Oceanography of the Dying Aral Sea. Chichester: Springer. Praxis, 2005. 154 p.
 13. *Zavialov P.O., Kostianoy A.G., Emelianov S.V. et al.* Hydrographic survey in the dying Aral Sea // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. № 13. P. 1659–1662, doi: 10.1029/2003GL017427.