

УДК 551.465,551.463.8,579.68(268.45),581.132

## ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ГЛУБОКОВОДНЫХ КОТЛОВИНАХ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

© 2015 г. Е. А. Серебrenникова, В. В. Сапожников, Л. А. Духова

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва  
e-mail: [havana345@mail.ru](mailto:havana345@mail.ru)

Поступила в редакцию 22.04.2014 г.

На основе информации, полученной за 18 лет в ходе ежегодного мониторинга и дополненной архивными данными, рассмотрены особенности многолетней изменчивости различных гидрохимических характеристик глубоководных котловин Каспийского моря. Показано влияние развития гипоксии и сероводородного слоя на положение слоя нитратного максимума и содержание нитратов в нем. Путем изучения изменчивости вертикальных распределений гидрохимических показателей выявлены некоторые определяющие факторы для выноса биогенных веществ из фотического слоя и их накопления в придонных горизонтах. Данные 2013 г., среди прочего, выявили уникальные особенности каспийского прибрежного апвеллинга, что позволит в дальнейшем избежать занижения оценок продуктивности вод Среднего Каспия.

DOI: 10.7868/S0030157415020161

### ВВЕДЕНИЕ

Каспийское море — уникальный водный объект, изолированный от Мирового океана, что делает его уязвимым для естественных и искусственных внешних воздействий. Одним из наиболее показательных индикаторов состояния экосистемы этого водоема оказывается уровень моря, в частности, современное высокое стояние уровня указывает на пониженную соленость поверхностного слоя и усиление стратификации водной толщи [7].

На протяжении последнего столетия этот водоем и его бассейн подвергались различным внешним воздействиям, в том числе антропогенным [9, 11, 13, 14]. Поэтому была разработана комплексная схема и регулярно осуществляется мониторинг, который позволяет получать информацию о современном состоянии Каспийского моря. Полученные результаты, среди прочего, характеризуют процессы взаимосвязанных изменений уровня моря, гидрологической и гидрохимической структур вод в глубоководных котловинах Каспия.

Последние годы ярко выражена тенденция к обеднению фотической зоны за счет интенсивного выноса биогенных веществ в придонные горизонты. Слабое конвективное перемешивание приводит к обострению гипоксии в глубинных водах и накоплению сероводорода в придонном слое. Недостаток кислорода также вызывает постепенное уменьшение мощности слоя нитратного максимума и снижение содержания нитратов в нем, как это отмечено в 2010–2013 гг. [3].

Помимо абиотических составляющих существенный вклад в формирование гидрохимиче-

ской структуры вод вносят и живые организмы. В течение десятилетий фитопланктонное сообщество Каспийского моря прошло через ряд масштабных перемен. Например, такие последствия регулирования стока как зимние паводки и изменение состава растворенных и взвешенных веществ в речных водах [5] способствовали доминированию в общей биомассе фитопланктона вида-вселенца *Pseudosolenia calcar-avis* с 1960-х и до недавнего времени. Последние годы наметилась тенденция к новой перестройке фитоценоза Каспийского моря благодаря увеличению биомассы других видов фитопланктона [6].

Целью настоящего исследования гидрохимических условий глубоководной части Каспийского моря является комплексное изучение динамики среды обитания водных организмов и факторов, определяющих ее изменчивость в масштабе нескольких лет.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основным методическим подходом к изучению современного состояния и многолетних изменений среды обитания гидробионтов Среднего и Южного Каспия является ежегодный гидролого-гидрохимический мониторинг по системе квазиширотных разрезов, проходящих через максимальные глубины обеих котловин.

Для изучения изменчивости гидрохимических показателей были использованы данные, полученные за последние 80 лет. Самая ранняя из рассмотренных комплексных съемок глубоководных участков моря была выполнена в 1934 г. под руко-

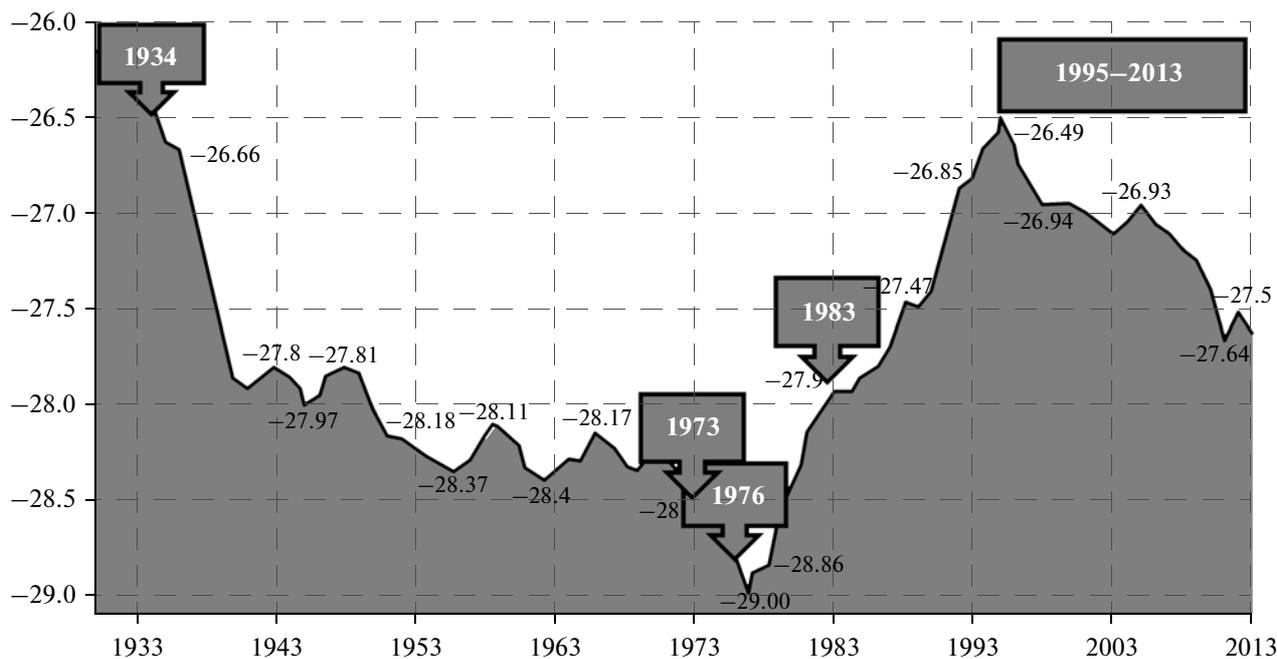


Рис. 1. Ход уровня Каспийского моря с 1930 по 2013 гг. с указанием времени проведения экспедиций: 1934, 1973, 1976, 1983 и 1995–2013 гг.

водством Бруевича [2] и приходилась на период высокого стояния уровня (рис. 1). На годы наиболее сильного обмеления Каспийского моря пришлось две комплексные экспедиции в 1973 и 1976 гг. В период подъема уровня была выполнена комплексная гидролого-гидрохимическая съемка в 1983 г. На современном этапе высокого стояния уровня экспедиции в глубоководные районы моря проводятся практически ежегодно в рамках совместной программы экологического мониторинга Каспийского моря ФГУП «ВНИРО» – ФГУП «КаспНИРХ» (1996–2011 гг.) и ФГУП «ВНИРО» – Институт Океанологии РАН им. П.П. Ширшова (2012–2013 гг.).

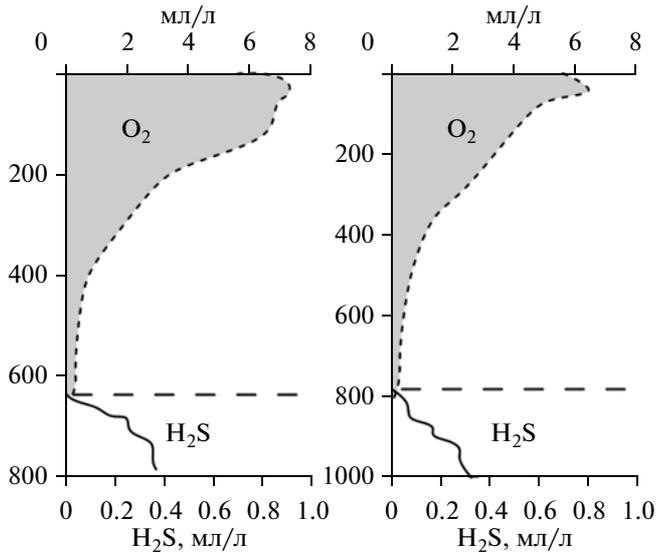
С учетом последних экспедиционных данных оценка изменений гидролого-гидрохимической структуры Каспийского моря проводится на основании многолетней динамики содержания растворенного кислорода и минеральных форм биогенных элементов – азота (нитратного, нитритного и аммонийного), фосфора и кремния. В годы высокого стояния уровня в глубинных водах котловин Среднего и Южного Каспия отмечается понижение содержания кислорода, поэтому с 2006 г. в придонных горизонтах отбирались пробы воды для определения концентрации сероводорода. В 2013 г. определение содержания сероводорода проводилось спектрофотометрическим методом [8], в предыдущие годы применялся метод обратного титрования. Кроме того, в 2013 году в слое предполагаемой границы сероводородного слоя частота отбора проб по глубине была увели-

чена для более детального изучения гидрохимии вод на этих горизонтах. Все анализы были проведены в судовой лаборатории непосредственно после отбора. Графическая обработка материалов выполнена с использованием программ Microsoft Excel, Golden Software Surfer 11, Golden Software Grapher 8.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Имеющиеся экспедиционные данные дают представление о состоянии экосистемы Каспийского моря как для периода высокого уровня (1934 г., настоящее время), так и для периода низкого уровня (1973 и 1976 гг.) (рис. 1). Кроме того, практически непрерывный 18-летний ежегодный мониторинг позволяет отследить тренды развития экосистемы Каспийского моря, выделив их на фоне циклической изменчивости климатических факторов.

Многие исследователи проводят параллели между Каспийским и Черным морями. Поскольку одной из основных черт Черного моря является обширнейшее сероводородное заражение, закономерным выглядит повышенное внимание к динамике содержания растворенного кислорода в глубоководных котловинах Каспия. После резкого подъема уровня к 1995 г. до отметки –26.5 м (рис. 1) началось постепенное усугубление гипоксии в глубинных водах Среднего и Южного Каспия. В придонном слое Дербентской котловины на глубине 780 м уже в 1995 г. концентрация кислорода



**Рис. 2.** Вертикальное распределение концентраций растворенного кислорода и сероводорода в августе–сентябре 2013 г. в точках максимальных глубин Дербентской (слева) и Южно-Каспийской (справа) котловинах.

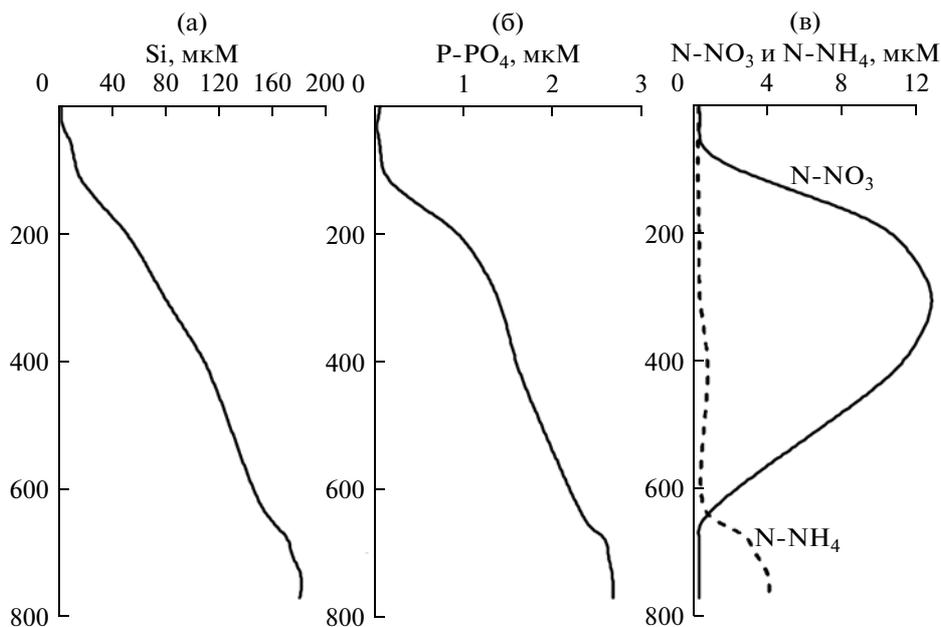
не превышала 0.4 мл/л [13]. В последующие годы концентрация кислорода у дна приближалась к нулю, а в 2003–2004 гг. были отмечены следы сероводорода. В 2006 г. гипоксия отмечалась уже с глубины 400 м, а ниже 550 м содержание кислорода было близким к точности метода. Тогда же была надежно определена концентрация сероводо-

рода в придонном слое Среднего Каспия, составившая 0.06 мл/л [12].

В настоящее время, несмотря на падение уровня Каспия до  $-27.67$  м к 2011 г., анаэробная зона у дна постепенно разрастается, и толщина сероводородного слоя уже достигла 150–200 м (рис. 2). Концентрация сероводорода в 2013 г. достигла в Южном Каспии 0.32 мл/л на глубине 980 м [3]. В Среднем Каспии у дна на глубине 780 м была зарегистрирована концентрация сероводорода 0.36 мл/л, что превышает наблюдения 1933–1934 гг.: максимально зафиксированное содержание сероводорода тогда составило 0.29 мл/л [2].

Параллельно с этим, усиливается вынос биогенных веществ за пределы фотического слоя. Например, в период низкого уровня в центральной части Среднего Каспия на поверхности в августе фиксировалось до 0.8–1.2  $\mu\text{M}$  фосфора, сейчас концентрация фосфатов значительно понизилась и в летний сезон не превышает 0.1–0.2  $\mu\text{M}$ . В анаэробных придонных водах, напротив, произошло накопление фосфатов до 2.7  $\mu\text{M}$  и кремния до 180  $\mu\text{M}$  (рис. 3а, 3б). Концентрация нитратов образует максимум 13.5  $\mu\text{M}$  на промежуточных глубинах 200–400 м, а затем снижается до нуля в придонных водах. В бескислородном слое восстановленная форма азота, ионы аммония, присутствует в концентрациях 3–4  $\mu\text{M}$  (рис. 3в) [3].

Подобные тенденции обусловлены не только климатическими, но и антропогенными изменениями, в частности, влиянием зарегулирования большей части стока, что сказывается не только на режиме поступления пресных вод, но и на их



**Рис. 3.** Вертикальное распределение концентраций минеральных форм кремния (а), фосфора (б) и азота (в) в Среднем Каспии (в самой глубокой точке – 788 м) в 2013 г.

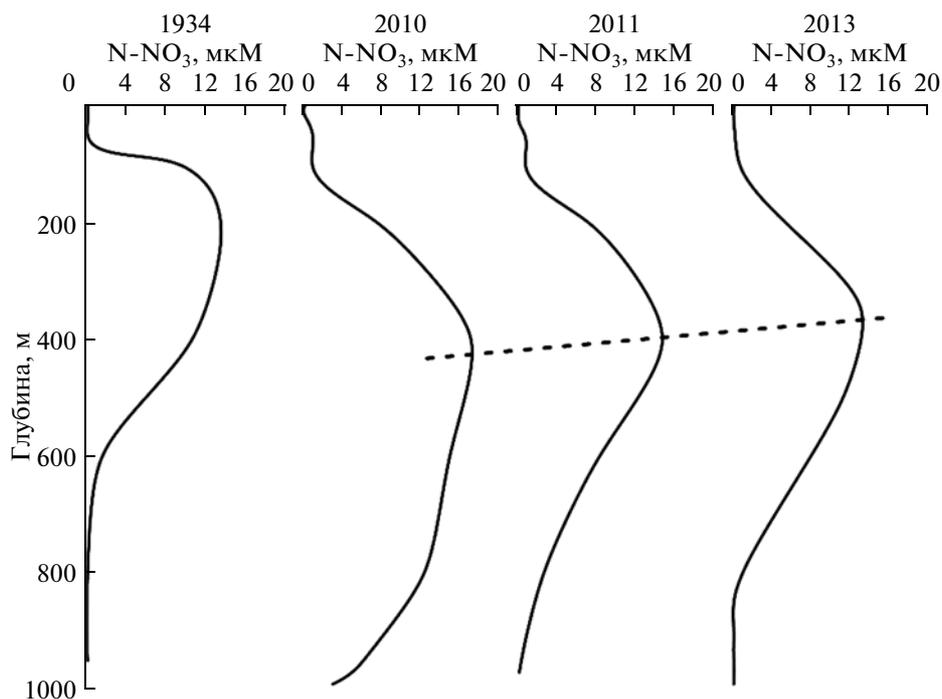


Рис. 4. Вертикальное распределение нитратов в разные годы в самой глубокой точке Южного Каспия (пунктирная линия соединяет точки максимальных концентраций нитратов).

гидролого-гидрохимических характеристиках [10]. Например, зимой, когда идет активная выработка электроэнергии на ГЭС, сбрасывается порядка 30–35% пресного стока. Эти воды, формирующие зимние паводки, распространяются по акватории Северного и Среднего Каспия, создавая условия для более раннего, более продолжительного и более интенсивного цветения диатомовых водорослей. Поскольку эти водоросли не потребляются следующими звеньями трофической цепи, после отмирания они опускаются в придонные слои, где полностью разлагаются, обогащая эти воды кремнием, фосфором и аммонийным азотом.

#### АНАЛИЗ ДАННЫХ МНОГОЛЕТНЕГО МОНИТОРИНГА

На сегодняшний день рассчитанная глубина зимней конвекции в Среднем и Южном Каспии не превышает 150–200 м, напоминая механизм конвективной вентиляции холодного промежуточного слоя в Черном море [14]. Достоверно известно, что в годы пониженного уровня (ниже –28 м) вентиляция придонных вод в котловинах случалась регулярно, причем последнее событие зимнего конвективного перемешивания всей толщи вод было зафиксировано в 1977 г. [14, 15]. Таким образом, органическое вещество, попадающее в нижележащие горизонты, окисляется в плохо вентилируемых водах и вызывает дефи-

цит кислорода, который по оценкам составляет 0.25 мл/л в год [15].

Поскольку за последние 30 лет не произошло ни одной масштабной вентиляции глубинных вод, в придонных горизонтах выработан запас кислорода, не только растворенного, но и связанного в составе легко восстанавливаемых соединений. Например, данные последних съемок в точке максимальной глубины в Южно-Каспийской котловине отчетливо иллюстрируют уменьшение содержания нитратов в слое нитратного максимума: в 2010 г. максимальное зафиксированное содержание нитратов составило 14.82 µM, а в 2013 г. — только 13.19 µM (рис. 4).

Кроме того, слой нитратного максимума смещается ближе к поверхности: с 2010 по 2013 гг. этот слой поднялся на 50 м. Эта тенденция хорошо согласуется с данными 1934 г., когда максимальные концентрации были зафиксированы на горизонте 200 м (рис. 4), а ниже 700 м кислородо-содержащие минеральные соединения азота полностью отсутствовали. Главной причиной изменения характеристик нитратного максимума, является интенсификация процессов нитрат-редукции в гипоксической зоне. Поэтому глубина перегиба кривой вертикального распределения нитратов является достоверным индикатором положения истинной верхней границы распространения гипоксии.

Обратной стороной потребления кислорода на окисление органического вещества становится накопление минеральных соединений биогенных элементов. Поэтому в нижних 200 м, где накапливается сероводород, последние годы растет концентрация аммонийного азота: в 2008 г. в придонном горизонте Южно-Каспийской котловины содержалось порядка  $0.6 \mu\text{M}$ , а во время экспедиции 2013 г. уже отмечалось  $3.47 \mu\text{M}$ . Также, в придонных слоях обеих каспийских котловин из года в год наблюдается тенденция к росту концентраций минерального фосфора и кремния. В частности, по экспедиционным данным 1997 г. содержание кремния на дне Дербентской впадины не превышало  $90 \mu\text{M}$ , уже к 2006 г. была зафиксирована концентрация в  $200 \mu\text{M}$ . Кроме того, нельзя не отметить, что накопление кремния в придонных водах Среднего Каспия в настоящее время существенно превысило содержание кремния в 1934 г. ( $130 \mu\text{M}$ ) при значительно более высоком стоянии уровня [2, 3]. Таким образом, на современном этапе в Среднем Каспии процессы накопления биогенных веществ, вероятно, идут интенсивнее, чем во время исследований С.В. Бруевича (рис. 5).

Существенным фактором интенсификации накопления кремния стало многолетнее активное развитие диатомовой водоросли *Pseudosolenia calcar-avis*, долгие годы доминирующей по биомассе на всей акватории Каспийского моря [6]. Увеличенный зимний речной сток и изменение состава биогенных веществ в нем катализировали активное развитие этого вида, а большие размеры и очень прочная кремниевая оболочка сделали эту водоросль недоступной для фитофагов [5, 6]. Это, наряду с высокой скоростью деления, существенно ускорило выведение биогенных веществ из фотического слоя: крупные и прочные клетки *Pseudosolenia* погружаются быстрее, чем разлагаются.

Основным районом активного развития фитопланктона в Среднем Каспии является апвеллинг у казахского берега. В последнее время на основании спутниковых данных появились мнения о том, что апвеллинг практически не проявляется по содержанию хлорофилла [1]. Однако в 2013 г. в этом районе были отобраны пробы кислорода на горизонте максимальной флуоресценции (по данным зондирования), располагавшемся на глубине 17 м. Выяснилось, что над верхней границей термоклина сконцентрировано огромное количество фотосинтезирующих организмов, создавших пересыщение вод кислородом более 200% ( $13.82 \text{ мл/л}$ ). Кроме того, вертикальное распределение температуры показало, что на некотором удалении от берега холодные и богатые биогенными веществами воды апвеллинга “ныряют” в подповерхностный горизонт, в то время как сверху находится тонкий слой прогретых обедненных вод открытого моря. Поэтому спутниковые данные, к сожалению, не могут достоверно показать

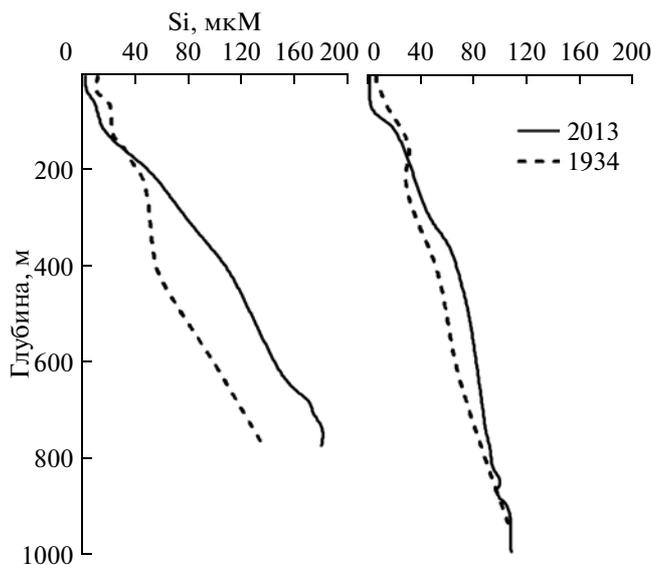


Рис. 5. Вертикальные распределения концентраций минеральных форм кремния в точках максимальной глубины в Среднем (слева) и Южном (справа) Каспии.

динамику продуктивности вод в районе казахского апвеллинга.

По результатам последних съемок видна сложность и многофакторность процессов накопления кремния и фосфора: с 2006 г. содержание этих биогенных элементов в придонном горизонте Дербентской котловины постепенно уменьшалось в течение 5 лет. Только в 2010 г. вновь стала проявляться тенденция к росту концентраций, в августе–сентябре 2013 г. в самой глубокой точке Среднего Каспия было зафиксировано  $187 \mu\text{M}$  кремния и  $2.68 \mu\text{M}$  фосфора (рис. 6). Подобные события, скорее всего, являются откликом на изменения в составе фитоценоза, описанные некоторыми исследователями: стали активно развиваться виды диатомовых водорослей, доступные для потребления зоопланктоном, в то время как доля *Pseudosolenia calcar-avis* в общей биомассе постепенно уменьшается [6]. Эти процессы могут приводить к ослаблению выноса биогенных веществ из фотического слоя и увеличению “новой” первичной продукции. Сигнал этих изменений может отражаться и на последующих звеньях пищевой цепи вплоть до численности различных видов пелагических рыб в глубоководной части Каспийского моря. С другой стороны, в глубинных водах уменьшение потока органики из фотического слоя затормозит развитие гипоксии и образование сероводорода.

Однако, если уровень моря опять начнет расти, сероводородное заражение может развиваться исключительно за счет усиления стратификации, как это было в 1933–1934 гг., когда еще не было ни *Pseudosolenia*, ни регулирования стока. Соотно-

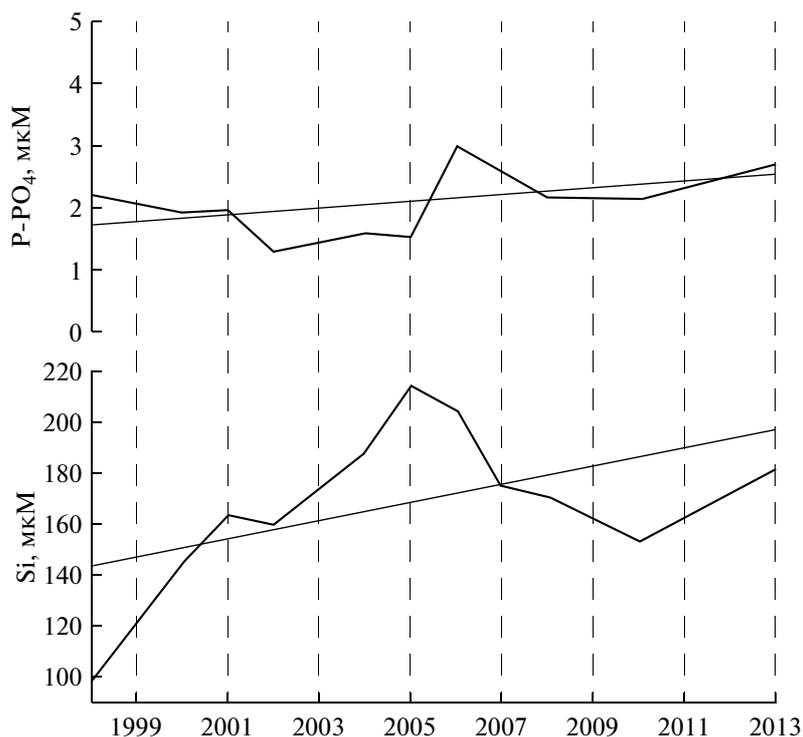


Рис. 6. Многолетняя изменчивость концентраций фосфора и кремния в придонном горизонте Дербентской котловины.

шение скоростей этих противоположно направленных процессов и определяет гидрохимическую структуру вод Дербентской и Южно-Каспийской котловин.

## ВЫВОДЫ

Современные мониторинговые исследования глубоководных котловин Каспийского моря дают возможность наблюдать за такими длительными процессами перестройки экосистемы как смена доминирующих видов фитопланктона, обеднение фотического слоя, развитие гипоксии в глубинных водах и накопление сероводорода у дна.

Наличие гидрохимических данных за 18 лет позволило отследить отклик гидрохимической структуры глубинных вод на изменения доли различных видов фитопланктона в суммарной биомассе: снижение доли *Pseudosolenia calcar-avis* привело к снижению темпов накопления кремния в придонных водах, в то время как концентрация фосфора уверенно растет год от года в обеих котловинах. Кроме того, ежегодно фиксируется постепенное снижение концентрации нитратов в глубинных водах обеих котловин в связи с недостатком кислорода и накопление аммонийного азота в анаэробных придонных водах. В будущем пристальное изучение вертикальных распределений различных форм азота позволит получить более полное представление об интенсивности про-

цесса нитрат-редукции и скорости подъема верхней границы распространения гипоксии в глубинных водах.

Кроме того, данные съемок позволяют изучать и менее масштабные особенности состояния вод. Так, исследования 2013 г. выявили неожиданную особенность каспийского апвеллинга, “подныривающего” под поверхностные воды центральной части моря. Изучение этого явления в дальнейшем позволит избежать существенного занижения продуктивности моря при оценке по спутниковым данным.

Существующий сегодня ряд гидрологических и гидрохимических наблюдений охватывает менее ста лет, поэтому влияние различных факторов на сложную и многокомпонентную экосистему Каспийского моря оценивается с недостаточной для достоверных прогнозов степенью точности. Поэтому продолжение ежегодных комплексных исследований необходимо для получения более точной информации о многолетней изменчивости глубоководных котловин Каспийского моря.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-05-00230).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонюк А.Ю. Изменчивость океанологических процессов и полей во внутренних морях (Черном, Азовском, Каспийском) на основе дистанционно-

- го зондирования. Автореф. канд. дис., М.: МГУ, 2014. 32 с.
2. Бруевич С.В. Гидрохимия Среднего и Южного Каспия. М.-Л.: Изд. АН СССР, 1937. 352 с.
  3. Духова Л.А., Серебrenникова Е.А., Амбросимов А.К., Ключиткин А.А. Гидрохимические исследования глубоководных котловин Каспийского моря в августе–сентябре 2013 г. на НИС “Никифор Шурев” // Океанология. 2015. Т. 55. № 1. С. 162–164.
  4. Зенкевич Л.А. Биология морей СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 740 с.
  5. Левшакова В.Д., Ардабьева А.Г., Татаринцева Т.А. Фитопланктон и первичная продукция планктона. Фауна и биологическая продуктивность. Каспийское море. М.: Наука, 1985. С. 5–54.
  6. Карпинский М.Г. *Pseudosolenia calcar-avis* (Bacillariophyta, Centrophyceae) в Каспии // Росс. журн. биол. инвазий. 2010. № 1. С. 2–11.
  7. Косарев А.Н. Каспийское море. Структура и динамика вод. М.: Наука, 1990. 164 с.
  8. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
  9. Экологические проблемы Каспия / Отв. ред. Хубларян. М.: Наука, 2000. 184 с.
  10. Романенко В.И. Первичная продукция органического вещества в процессе фотосинтеза в каскаде волжских водохранилищ // Биологическая продуктивность и качество воды Волги и ее водохранилищ. М.: Наука, 1984. С. 48–60.
  11. Сапожников В.В. Процессы накопления биогенных элементов в глубоководных котловинах Среднего и Южного Каспия // Океанология. 2002. Т. 42. № 5. С. 677–682.
  12. Сапожников В.В., Азаренко А.В., Гращенкова О.К., Кивва К.К. Гидролого-гидрохимические исследования Среднего и Южного Каспия на научно-исследовательском судне “Исследователь Каспия” (2–17 сентября 2006 г.) // Океанология. 2007. Т. 47. № 2. С. 312–315.
  13. Сапожников В.В., Белов А.А. Условия появления сероводорода в глубоководных котловинах Среднего и Южного Каспия // Океанология, 2003. Т. 43. № 3. С. 368–370.
  14. Тужилкин В.С., Косарев А.Н. Многолетняя изменчивость вертикальной термохалинной структуры вод глубоководных частей Каспийского моря // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 4. С. 414–421.
  15. Peeters F., Kipfer R., Achermann D. et al. Analysis of deep-water exchange in the Caspian Sea based on environmental tracers // Deep-Sea Res. 2000. Т. 1. № 47. P. 621–654.

## Special Features of Hydrochemical Conditions Variability in the Deep Water Basins of Caspian Sea

E. A. Serebrennikova, V. V. Sapozhnikov, L. A. Dukhova

The features of long-term variability of different hydrochemical characteristics are studied on the base of information received during the 18 years of annual monitoring and supplemented by archival data. The effect of the development of hypoxia and hydrogen sulfide layer on the position of the maximum nitrate layer and nitrate content in it is shown. Some determinant factors for the removal of nutrients from the photic layer and their accumulation in bottom waters are identified by studying the variability of the vertical distribution of hydrochemical parameters. In 2013 the unique features of the Caspian coastal upwelling were revealed, that will help to avoid underestimation of the Middle Caspian water productivity.