

БИОГЕННЫЙ СТОК ВОЛГИ И ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Биогенный сток Волги

Изучение минеральных и органических взвесей и химического состава волжских вод было начато в 1936 г. С. В. Бруевичем и С. В. Аничковой (1941). С этого времени мы имеем непрерывный ряд наблюдений за взвешенным веществом, минеральным фосфором, минеральным и аммиачным азотом и минеральным растворимым кремнием. С 1941 г. эти наблюдения проводились Н. И. Винецкой (1962), после 1947 г. М. В. Федосовым и Л. А. Барсуковой (1959), а затем Л. А. Барсуковой (1957, 1962, 1965, 1967, 1971).

Более полное изучение всех форм содержания азота и фосфора в речном стоке начато с 1951—1952 гг. Результаты этих исследований представлены в работе Л. А. Барсуковой (1971). В 1961—1966 гг. наблюдения в районе с. Верхнее Лебяжье проводила Б. М. Затучная (1970). У Волгограда в 1957—1961 гг. аналогичные работы были выполнены А. А. Зениным (1965).

Изучению биогенных элементов в водохранилищах посвящены работы Н. Н. Гусевой (1968) и В. И. Сиденко (1968, 1971). А. И. Симонов (1969) обобщил гидрохимические наблюдения по Азовскому, Аральскому, Каспийскому и Балтийскому морям, показав исключительно важное значение рек в балансе фосфора этих морей и постепенное уменьшение его концентраций в речном стоке в направлении моря.

При изучении биогенного стока прежде всего возникает вопрос, в какой мере сказалось зарегулирование на концентрации биогенных веществ в волжских водах и выносе их в море. Точки зрения различных исследователей по этому вопросу на первый взгляд кажутся диаметрально противоположными. Так, А. А. Зенин (1965), подводя итог многолетним гидрохимическим исследованиям Волги и ее водохранилищ, пришел к выводу, что сток минерального фосфора после зарегулирования существенно не изменился. По его наблюдениям, в 1957—1964 гг. годовой сток фосфатов в районе Волгограда составлял 5,4—7,3, в среднем 6,0 тыс. т, т. е. находился на том же уровне, что и до зарегулирования, когда, по данным С. В. Бруевича и Н. И. Аничковой (1941), он составлял (1936—1940 гг.) 3,9—7,7, в среднем 6,1 тыс. т. Наблюдения последних авторов проводились в районе Астрахани.

Сходной точки зрения придерживаются Н. Н. Гусева (1968) и В. И. Сиденко (1968, 1971). Так, по В. И. Сиденко, концентрация минерального фосфора в Волгоградском водохранилище в 1960—1967 гг. достигала 30—80 мкг/л, а в реке до зарегулирования (1944—1958 гг.) — 18—38 мкг/л. В Куйбышевском водохранилище средняя концентрация фосфатов, по данным Н. И. Гусевой, увеличилась с 19 до 49 мкг/л.

Однако наблюдения Л. А. Барсуковой (1971) и Н. И. Винецкой (1968) убеждают, что годовой сток минерального фосфора в створах с. Верхнее Лебяжье и Астрахани за период с 1936—1940 до 1967—1969 гг. уменьшился с 6 до 1,8 тыс. т, т. е. более чем в три раза. При этом следует учесть, что в море попадает не более половины этого количества.

Данные об уменьшении фосфатов в стоке Волги в направлении моря, выявленные А. И. Симоновым (1969), подтвердились в 1972 г., когда концентрации фосфатов, по наблюдениям Волжской комплексной экспедиции АН СССР, по всей Волге — от Чебоксар до Волгограда — в июле

держались на уровне от 20—30 до 70—80 мкг/л, а у с. Верхнее Лебяжье в период половодья не превышали 15 мкг/л. В Северном Каспии концентрации минерального фосфора в большинстве районов были ниже 8—10 мкг/л.

Таким образом, правы те исследователи, которые доказывают, что концентрации фосфатов в водохранилищах не только сохранились на уровне, наблюдавшемся до зарегулирования стока Волги, но и существенно возросли. Но одновременно правы и те, кто доказывает резкое уменьшение фосфатов в нижнем течении реки и в море (по наблюдениям у с. Верхнее Лебяжье и у Астрахани).

Второй вопрос сводится к установлению периода резкого изменения содержания фосфатов в нижнем течении Волги.

Большинство исследователей (Винецкая, 1965, Барсукова, 1971, Москаленко, 1971, Затучная, 1970, Пахомова, Затучная, 1966, 1972) считают бесспорным, что уменьшение взвесей и минерального фосфора в стоке Волги стало проявляться в начале пятидесятих годов (1949—1955) в связи с созданием каскада водохранилищ.

Л. А. Барсукова (1971) пишет, что период 1936—1940 гг., несмотря на его маловодность (148—205 км³), характеризовался большими величинами выноса биогенных элементов и взвесей. Наблюдавшееся в те годы небольшое по объему (93—132 км³), но продолжительное (61—94 суток) весеннее половодье обогатило Каспий значительным количеством питательных солей (фосфатов — до 3,6 тыс. т, взвесей — до 16 млн. т). В многоводный период 1941—1948 гг. наблюдался и наибольший вынос минерального растворенного фосфора (в среднем за половодье — 5,5 тыс. т) и взвешенного вещества (до 29,0 млн. т). Такое увеличение биогенного стока указывает на прямую связь между водностью весеннего половодья и выносом биогенов, что отмечала Н. И. Винецкая (1952). В 1949—1955 гг. эта связь была нарушена и, несмотря на увеличение водного стока в половодье (против 1936—1940 гг.), вынос фосфатов уменьшился более чем в два раза. Такое несоответствие Л. А. Барсукова объясняет созданием ряда водохранилищ, где происходит аккумуляция биогенов волжского стока.

Чтобы решить этот вопрос, мы построили, по наблюдениям Л. А. Барсуковой, график водности Волги, содержания взвешенных веществ и фосфатов в единице объема и вынос этих элементов в зону наблюдений (рис. 8). Из этого графика видно, что с увеличением стока в 1940 и 1941 гг. после маловодного периода (1933—1939) содержание и вынос взвешенных веществ и фосфатов возрастает; с 1942 по 1945 г. соответствующих наблюдений нет. Резкое снижение обоих элементов произошло в 1946—1948 гг. при значительном стоке до создания на Волге и Каме основных водохранилищ. В 50-х годах количество взвешенных веществ увеличивается, фосфатов незначительно снижается. С 1955—1957 гг. существенно снижаются оба элемента, что совпадает с сооружением плотин у Куйбышева и Волгограда. В многоводный 1966 г. количество взвешенных веществ и фосфатов резко повышается, но затем вновь падает.

Нам представлялось вполне логичным, что количества взвесей и концентраций минерального фосфора в единице объема воды должны находиться в положительной коррелятивной связи с объемом стока в период половодья.

Однако четкой связи между соответствующими элементами обнаружить нам не удалось. Ряд лет с большим объемом стока характеризуется низким содержанием взвесей и фосфатов, и наоборот, в некоторые маловодные годы наблюдается повышенная концентрация обоих элементов. Так, в многоводный 1947 год (сток в половодье 160 км³) взвешенных веществ было 60 г/м³. При зарегулированном стоке в 1966 г. (объем попуска — 140 км³) взвешенных веществ было 70 г/м³. В то же время в годы относительно небольшого половодья (в 1939 г. — 112 км³, 1940 г. —

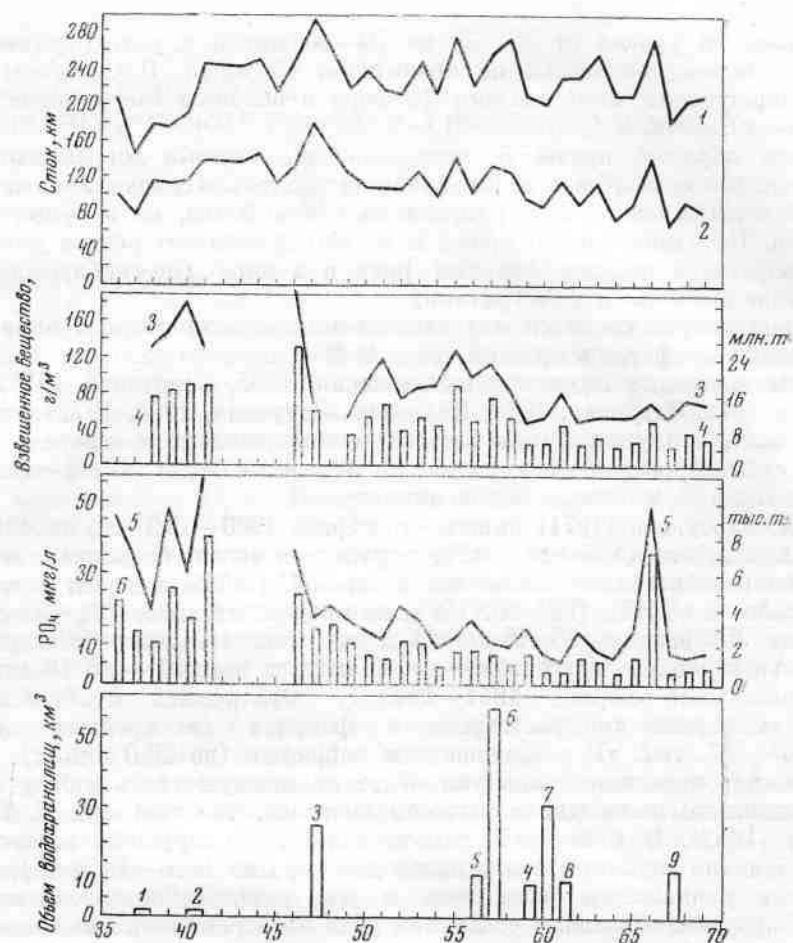


Рис. 8. Элементы стока и биогенного режима Волги

1 — годовой сток Волги у с. В. Лебяжье, км³; 2 — сток Волги за половодье; 3 — взвешенное вещество за половодье, г/м³; 4 — взвешенное вещество за половодье, млн. т; 5 — минеральный фосфор за половодье, мкг/л; 6 — минеральный фосфор за половодье, тыс. т; внизу объемы водохранилищ, в скобках даны годы их заполнения: 1 — Ивановское (1937 г.); 2 — Угличское (1940 г.); 3 — Рыбинское (1941—1947 гг.); 4 — Горьковское (1955—1959); 5 — Камское (1954—1956 гг.); 6 — Куйбышевское (1955—1957 гг.); 7 — Волгоградское (1958—1960 гг.); 8 — Воткинское (1961 г.); 9 — Саратовское (1967 г.)

120 км³) количество взвешенных веществ достигало соответственно 145 и 180 г/м³.

Большой интерес представляют наблюдения за концентрациями и выносом взвешенных веществ и фосфатов в 1946—1950 гг.

	1946 г.	1947 г.	1948 г.	1949 г.	1950 г.
Годовой сток, км³	254	299	261	217	237
Половодье, км³	135	180	152	128	110
Взвешенные вещества, г/м³	195	67	Нет данных	53	90
Минеральный фосфор, мкг/л	36	17	21	17	14
Вынос взвешенных веществ, млн. т	26,4	12,1	Нет данных	6,7	9,9
Вынос минерального фосфора, тыс. т	4,9	3,0	3,2	2,2	1,5

Объем стока и половодья 1946 г. был значительным по сравнению с предшествующими 1944 и 1945 гг. Показатели по взвешенным веществам и фосфатам были высокими. В следующий 1947 г. водность Волги резко

возрастает, а содержание взвешенных веществ и фосфатов снижается. В 1948 г., к сожалению, соответствующие наблюдения не проводились, но и в два последующие года (1949 и 1950) содержание взвешенных веществ и фосфатов было низким.

Приведенные факты позволяют предполагать, что фонд взвешенных веществ минеральных и органических и фонд фосфатов относительно ограничен. Он накапливается в маловодные годы и быстро вымывается в многоводный период.

Приведенные ниже данные [по Барсуковой (1971) и Винецкой (1968)] свидетельствуют о значительном уменьшении концентраций фосфатов на участке между створом с. Верхнее Лебяжье и морем. Здесь концентрации фосфатов уменьшились в период 1954—1965 гг. в два раза. Концентрации в восточной части моря были несколько ниже, чем в западной. Концентрации фосфатов уменьшались в направлении моря, от мелководной зоны к глубоководной, а также во времени — с июня к августу.

С. Верхнее Лебяжье Северный Каспий	Время взятия пробы и количество Р, мкг/л			
	Период половодья, 11,0			
	Западный район		Восточный район	
	июнь	август	июнь	август
Мелководная зона	6,6	5,7	3,4	5,6
Глубоководная зона	5,1	5,6	4,6	4,7

Процесс снижения концентраций фосфатов должен характеризовать его использование при формировании первичной продукции.

Нужно думать, что в море выпадение минерального фосфора в осадки минимальное. Уменьшение же количества фосфатов в дельте Волги, на пути к морю, должно быть, по всей видимости, значительным вследствие оседания со взвешенными веществами в зарослях тростника и использования их высшей водной растительности, количество которой в процессе роста дельты и образования авандельты резко увеличилось.

О концентрациях фосфатов в период 1936—1940 гг. мы имеем возможность судить только по неполным данным. Они были следующие: у Астрахани 33 мкг/л, море (западная глубоководная часть) 7,5—17,5 мкг/л. Как видно, уменьшение концентраций фосфатов в море по сравнению с рекой было также весьма значительным — в 2—4 раза.

Наряду с уменьшением в самом нижнем течении Волги концентраций минерального фосфора существенно возросла в последнее время концентрация органического растворенного фосфора, в результате прежде всего развития синезеленых водорослей в волюжско-камских водохранилищах. Так, до создания больших водохранилищ (1953—1955 гг.) сток минерального фосфора относился к органическому растворенному как 1 : 3. В 1967—1969 гг. это соотношение составляло 1 : 6.

Остается неясным, в какой мере растворенный органический фосфор может быть резервом минерального фосфора. В водохранилище и Волгу в районе Волгограда общего фосфора попадает около 50—70 мкг/л. Тем не менее минерального фосфора в волюжских водах на подходе к дельте, как мы уже отмечали, очень мало, причем количество его на взморье еще значительно снижается. Несомненно, что такое уменьшение концентраций минерального фосфора сдерживает развитие жизни в Северном Каспии, на что неоднократно указывала Н. И. Винецкая (1952, 1962, 1966а, б).

В итоге рассмотрения и анализа приведенных материалов мы можем отметить следующее: количество фосфатов в водохранилищах по сравнению с речным режимом этих участков Волги до зарегулирования стока возросло; в створе с. Верхнее Лебяжье общее количество фосфора изменилось незначительно, но резко уменьшился приток минерального фосфора; создание северных водохранилищ (Иваньковского, Угличского и Ры-

бинского) в 1937—1941 гг. не могло оказать значительного влияния на гидрохимический режим Волги в целом и в частности на ее нижнее течение вследствие бедности биогенными элементами подзолистых и заболоченных почв бассейна Рыбинского водохранилища («Рыбинское водохранилище», 1972); наиболее резкое снижение количества взвешенных веществ произошло между 1946 и 1950 гг. в многоводный период; количество взвесей и минерального фосфора в бассейне Волги является, видимо, ограниченным: при обильном стоке в течение нескольких лет подряд концентрации взвешенных веществ и фосфатов могут снижаться; изменения концентрацией взвешенных веществ и фосфатов в 1958—1959 гг. явились результатом создания главных водохранилищ Волжско-Камского каскада в 1954—1955 гг. (Горьковского, Камского, Куйбышевского).

Возникает вопрос, не изменились ли источники биогенных элементов, в частности фосфора, питавшие воды Волги в прошлом и питающие их в настоящее время.

До зарегулирования стока Волги естественный уровеньный режим определял системность заливания и осушения поймы реки. В половодье в пойме формировались водные экосистемы, в период межени развивались экосистемы суши. Чередуясь, каждая экосистема обогащалась предшествующей биопродукцией. В настоящее время на всей площади залитых земель эта системность нарушена, вследствие чего обогащение вод Волги биогенными элементами резко уменьшилось. Одновременно, видимо, возросла роль биогенных элементов антропогенного происхождения в результате роста городского населения, применения детергентов, фосфорных удобрений и т. д.

По данным С. М. Драчева и Л. А. Петуховой (1971), только стоки г. Москвы повышают концентрацию общего фосфора в р. Москве на порядок и увеличивают его содержание в Оке, ниже устья р. Москвы, примерно в 5 раз. По расчетам этих авторов, Москва сбрасывает ежедневно 4,4—5,8 т фосфора (около 2 тыс. т в год). Рост населения и развитие промышленности в бассейне Волги за последние 30—40 лет несомненно сопровождалось увеличением объема сбрасываемых в реку биогенных элементов.

Биогенный сток — основа формирования всех звеньев продуцирующей системы Северного Каспия, и мы должны совершенно четко представлять себе источники этого питания и условия насыщения волжских вод биогенными элементами и прежде всего солями фосфора. Мы должны представлять эти условия не только для данного времени, но и в перспективе с учетом намечающихся преобразований природы в бассейне Каспийского моря и развития сельского хозяйства.

Наши знания этих вопросов ограничены, в связи с чем по просьбе редколлегии кандидат географических наук Л. Ф. Насулич подготовила помещаемый ниже раздел, дающий представления об особенностях водосборной площади Волги в отношении питания волжских вод взвешенными веществами и биогенными солями.

О формировании биогенного стока в бассейне Волги

Бассейн Волги представляет собой обширную равнинную территорию, простирающуюся на 1700 км с севера на юг и на 250—1500 км с запада на восток, весьма разнообразную по своим физико-географическим условиям. На севере бассейна расположена лесная зона — тайга и смешанные леса, в центральной части — лесостепь и степь, на юге — полупустыня и пустыня.

Бассейн Верхней Волги расположен в зоне избыточного увлажнения, где осадки преобладают над испарением. Годовое количество осадков достигает здесь 500—600 мм с преобладанием их летом и максимумом в июле. Испарение составляет всего 250—500 мм. Годовой показатель ув-

лажнения 0,35—0,60. Зимой наблюдается устойчивый снежный покров толщиной 45—60 см. Среднегодовой поверхностный сток составляет 6—8 л/сек/км²; преобладает он весной, составляя 60% годового.

В этой части бассейна доминирует эрозивно-моренный рельеф, характеризующийся значительным расчленением поверхности и крутизной склонов от 5 до 15°. Поверхность бассейна представляет собой четвертичные отложения, состоящие преимущественно из морены, флювиогляциальных супесей и песков, покровных суглинков. Широкое распространение имеют задровые равнины со специфичными ландшафтами полей.

Равнинный рельеф, широкое распространение тяжелых суглинков, избыточное атмосферное увлажнение и высокое залегание грунтовых вод способствуют распространению здесь болот и переувлажнению поверхности почвы. Глубина залегания грунтовых вод колеблется от 0 до 10 м, минерализация их слабая — 0,1—0,5, на юге — 1 г/л.

По характеру растительности и почвы территория относится к подзоне южной тайги. Преобладают здесь дерново-подзолистые почвы различной степени оподзоленности и механического состава и почвы болотного типа, сосредоточенные в полевых.

Почвы формируются на моренных и покровных суглинках, песках и супесях, в условиях промывного режима, обладают кислой реакцией. В этих условиях усиливается растворение минеральных веществ, содержащихся в почве, в том числе и минеральных удобрений, и вынос их из верхних горизонтов почвы в нижние. Глубина проникновения минеральных удобрений в почву зависит от ее механического состава и количества атмосферных осадков.

В Верхне-Волжском бассейне биогенные элементы проникают в речной сток в результате водной эрозии почв, выноса их паводковыми водами с затопляемых окультуренных площадей и инфильтрации в грунтовые воды. Освоение территории сельским хозяйством — всего 30—40% общей площади. Поэтому количество выносимых биогенных элементов и, в частности фосфатов, в речной сток должно быть небольшим.

Бассейн Средней Волги расположен в пределах лесостепной и степной ландшафтных зон. Рельеф здесь эрозийный, отличающийся большой густотой и глубиной расчленения поверхности.

Для Среднего Поволжья характерно недостаточное количество атмосферных осадков. За год их выпадает 350—600 мм, испарение же составляет 500—800 мм. Показатель годового увлажнения в лесостепи равен 0,35—0,45, в степи — 0,15—0,35. Высота снежного покрова — 20—30 см.

Среднее Поволжье обладает густой сетью ручьев и рек. Основная масса воды проходит по рекам во время бурного весеннего половодья и составляет 60—80% годового стока. Среднегодовой поверхностный сток равен 1—4 л/сек/км² в лесостепной полосе и 0,2—1 л/сек/км² — в степной. Заболоченные участки встречаются лишь в долинах рек. Грунтовые воды залегают на глубине 20—50 м. Минерализация в лесостепной зоне невысокая — до 1 г/л, а в степной — от 1 до 3 г/л и более.

Основная растительность — широколиственные леса — дубравы и дубово-сосновые боры, которые расположены в виде островов среди полей и по балкам, оврагам и в долинах рек. Леса произрастают на серых лесных почвах; под степями развиты черноземы — оподзоленные, выщелоченные на севере, типичные и обыкновенные в центральной части и карбонатные на юге. Почвы формируются на лёссах, лёссовидных суглинках, элювиях коренных пород, флювиогляциальных и аллювиальных отложениях. Сельским хозяйством освоено здесь 70—80% территории.

Для зоны Среднего Поволжья характерна недостаточная обеспеченность водой, часто повторяющиеся засухи и интенсивная водная и ветровая эрозия почв, развитию которых способствует бурное весеннее снеготаяние, летние ливни, легко размывающиеся грунты и интенсивная

распашка степей. В рассматриваемой зоне проводятся снегозадержание, искусственное орошение, полезащитное лесоразведение, специальные севообороты с использованием удобрений.

Исследование баланса питательных веществ мощных черноземов, проведенное в последние годы Научно-исследовательским институтом по удобрениям и инсектофунгицидам (НИУиФ), показало, что азот, поступающий в почву с атмосферными осадками и семенами, примерно покрывает потери его от вымывания. Баланс по фосфору всегда положительный, даже при однократном внесении его в течение года.

Проведенные Всесоюзным научно-исследовательским институтом удобрений и агропочвоведения (ВИУА) исследования проникновения минеральных удобрений в глубь черноземных почв показали, что азот и калий накапливаются преимущественно на глубине 20—40 см, на глубине 40—60 см их значительно меньше. Максимальное накопление фосфора в пахотном горизонте наблюдается на глубине 0—20 см, значительно меньше его на глубине 20—40 см и совсем мало на глубине 40—60 см. Такая закономерность обусловлена растворимостью и подвижностью азота и калия в почвах и хорошей закрепляемостью фосфора.

Приведенные данные позволяют предположить, что грунтовые воды в Среднем Поволжье насыщаются минеральными удобрениями в местах их контакта с поверхностными талыми и ливневыми водами, т. е. на дне оврагов, балок и у подножий склонов речных долин, где они залегают близко к поверхности или выклиниваются. Верховодка, образующаяся на водораздельных участках с тяжелыми суглинистыми почвами весной и осенью, может выносить минеральные удобрения, особенно в периоды совпадения сроков внесения удобрений с продолжительными дождями.

Нужно отметить, что глубокое выклинивание в речные долины восточного склона Приволжской возвышенности вскрывает коренные породы, содержащие фосфориты, поэтому в твердом стоке протекающих здесь рек возможно повышенное содержание фосфора. Можно предполагать, что в настоящее время наибольшие количества биогенных элементов в зоне Средней Волги поступают вследствие смыва удобрений талыми и ливневыми водами с площади пахотных земель¹.

Нижнее Поволжье расположено в полупустынной и пустынной зонах, включающих возвышенность Ергеней и Прикаспийскую низменность. Полупустынная зона отличается небольшой абсолютной высотой, а пустыня лежит ниже уровня моря. Преобладает равнинный слабо расчлененный рельеф с широко распространенными западинами, лиманами и сорами. Вдоль побережья Каспийского моря наблюдаются обширные массивы песков с золовыми формами.

Для Нижнего Поволжья характерны резкий дефицит влаги и большое испарение. За год здесь выпадает всего 100—300 мм осадков, а испарение достигает 900—1000 мм. Годовой показатель увлажнения равен 0,05—0,15. Снежный покров достигает высоты всего 10—25 см и лежит недолго. Поэтому поверхностный сток незначителен — 0,2—1 л/сек/км². Речная сеть не развита, оврагов и балок мало. Талые воды очень скудны и слабо увлажняют почву. Грунтовые воды залегают неглубоко — от 0 до 5—10 м; они сильно минерализованы — от 3 до 100 г/л, но встречаются линзы пресных вод в лиманах и западинах, которые имеют важное хо-

¹ В удобрениях вод Каспия биогенными элементами важное значение в прошлом имел смыв органогенных веществ с полей и лугов. Так, К. М. Бэр (1860, стр. 30) пишет: «Волга с притоками своими ежегодно наводняет обширные пространства и уносит органические остатки прошедшего года ниже по течению своему. К этому присоединяется еще то, что она протекает большей частью по странам, в которых навоз считается излишним бременем и где не знают для него лучшего употребления, как заваливать им овраги, столь часто образующиеся в тамошней рыхлой почве, дабы предотвратить продвижение их вперед. Каждый дождь принимает в себя что-нибудь из этого навоза и уносит в Волгу».

зяйственно-бытовое значение. К сожалению, эти пресные воды имеют сезонный характер и малообильны.

Растительный покров типичен для полупустынь и пустынь, он сильно разрежен, беден видами и представлен в основном злаковыми, полынью и эфемерами. Для растений характерно преобладание подземной массы по сравнению с наземной. Почвы полупустынь каштановые и бурые, сформировавшиеся в зоне типчаково-ковыльных степей в условиях непромывного водного режима. Почвообразующими породами на севере Нижнего Поволжья являются лёссовидные суглинки. Все почвы полупустынь и пустынь отличаются щелочной реакцией.

До недавнего времени Нижнее Поволжье было районом пастбищного животноводства. Только в последние годы здесь начало развиваться орошаемое земледелие — на каштановых почвах выращивают ценные сорта пшеницы. Главнейшими препятствиями для развития здесь земледелия являются недостаток влаги, щелочность, засоленность и слабая окультуренность почв.

По перспективному плану развития сельского хозяйства Нижнее Поволжье входит в новые районы орошения. Здесь начинают осваивать большие площади для возделывания различных сельскохозяйственных культур, развивается садоводство, в Волго-Ахтубинской пойме — рисосеяние (совместо с рыбоводством), создаются многолетние культурные пастбища и луга.

Принимая во внимание особенности каждой из трех зон водосборной площади Волги в отношении рельефа, густоты речной сети, количества осадков и величины испарения, типа почв, распаханности земель, следует признать, что ведущее значение в обогащении вод бассейна Волги взвешенными веществами и фосфатами принадлежит зоне Средней Волги. Несравненно меньшую роль в этом процессе играет зона Верхней Волги. Значение южной зоны в формировании взвешенных веществ и биогенных элементов Волги минимальное. Однако остается не совсем ясным, в какой мере обогащению вод Волги способствует Волго-Ахтубинская пойма, через которую всегда проходило большое количество волюжской воды. Но ввиду небольшого выноса фосфатов восточными рукавами дельты в море можно предположить, что в этом отношении значение поймы относительно невелико.

Колебания современного гидрохимического режима Каспийского моря

Солевой состав и гидрохимические характеристики вод Каспийского моря сформировались и изменяются в результате совместного влияния стока рек, газо- и солеобмена с атмосферой, подземной составляющей понного стока в море и подводного грязевого вулканизма.

Особенности регионального распределения гидрохимических характеристик и гидрохимической структуры морских вод определяются местными физико-географическими условиями, динамикой водных масс (особенно в верхнем слое) и конвективным перемешиванием. Последний фактор наиболее важен для глубинных слоев моря.

Обмен химическими субстанциями в процессе газо- и солеобмена с атмосферой изучен недостаточно, но в первом приближении его можно считать установившимся. Как показали исследования последних лет, подземный понный сток в море несомненно следует учитывать при оценке химического баланса моря, однако имеющиеся данные позволяют пока делать лишь самые общие оценки. Материалы геологических и геохимических работ, проведенных в Южном Каспии, показывают, что в этом районе на гидрохимические условия может влиять деятельность подводных грязевых вулканов, расположенных как на шельфе, так и на дне глубоководной впадины. По мнению геологов, в результате деятельности

вулканов на поверхность дна моря происходит высачивание глубинных сильно минерализованных вод (Соловьев, Маев, Юнов, 1961; Юркевич и др., 1962). Это надо иметь в виду при нахождении аномалий гидрохимических характеристик в глубинных слоях воды Южного Каспия.

В настоящей главе гидрохимический режим Каспийского моря и его изменения рассматриваются главным образом в зависимости от характера гидрологических процессов в море. При сравнении с данными предыдущих исследований принимаются во внимание изменения стока Волги и его химического состава, происшедшие за последнее время.

Значительное уменьшение стока Волги, составляющего более 70% всего речного стока в море, произошло в тридцатые годы, что оказало сильное воздействие на гидрохимические условия в море. Анализ гидрохимических условий на определенных этапах жизни моря проводился многими авторами. Детальное исследование этих условий по материалам 1934 г., т. е. практически до падения уровня моря, было выполнено С. В. Бруевичем (1937). Материал, характеризующий период после падения уровня (за 1939—1954 гг.), был проанализирован Б. Н. Абрамовым (1959). Особенности гидрохимического режима моря в 1958—1963 гг. в сравнении с предшествующими годами весьма подробно рассмотрены в работах А. С. Пахомовой и Б. М. Затучной (1966) и А. С. Пахомовой (1970). Гидрохимические условия в Среднем Каспии в 1965—1966 гг. изучены Г. Н. Нурмагомедовым (1968а, б). Распределение кислорода в Среднем и Южном Каспии в 1964—1966 г. показано А. Н. Косаревым и А. В. Поляковой (1970).

Специальные исследования влияния зарегулирования стока Волги на гидрохимические условия Северного Каспия приведены Н. И. Винецкой (1968), Л. А. Барсуковой (1971).

В настоящей работе эти исследования продолжены. Показано современное пространственное и сезонное распределение гидрологических и гидрохимических характеристик в Среднем и Южном Каспии. На стандартных разрезах — Жилой—Куули, Дивичи—Кендерли и Куринский Камень — Огурчинский были определены соленость, плотность, величина pH, содержание кислорода, фосфора, нитратов и кремния. Большинство разрезов было выполнено в августе, ноябре и феврале 1968—1969 и 1970—1971 гг., причем зима 1968/69 г. была холодной, а 1970/71 г. — теплой. Кроме того, были составлены таблицы вертикального распределения кислорода, pH, фосфора и кремния в Среднем и Южном Каспии в 1965—1970 гг. и солености — в 1965—1968 гг., проведено их сопоставление с данными Пахомовой за 1958—1963 гг. Такой анализ позволяет детально показать современные гидрохимические условия Каспийского моря и их изменения за последние годы.

Соленость. Сравнение относительного содержания солеобразующих компонентов показало, что существенных изменений солевого состава вод Северного Каспия за период с 1938 по 1968 г. не произошло. Расчеты солевого баланса моря показывают, что средняя соленость Каспия за последние 50—60 лет остается постоянной и находится в пределах 12,82—12,86‰ (Архипова и др., 1972). Однако в Северном Каспии соленость претерпевает существенные изменения. Под влиянием гидрометеорологических условий в разные сезоны и годы наблюдаются изменения солености и в некоторых прибрежных районах Среднего и Южного Каспия.

Волжские воды, поступающие в море по западным рукавам дельты, в основном выносятся в Средний Каспий, причем преимущественно вдоль западного побережья. В половодье эта тенденция сохраняется, однако опреснение западной части происходит более широким фронтом. Волжские воды, выносимые в море по восточным рукавам дельты, поступают в основном в восточную часть Северного Каспия. Воды р. Урал опресняют предустьевое пространство, а в половодье — и мелководный район

восточного побережья. Опреснение Северного Каспия в результате прохождение речных полых вод длится с мая по июль (Катунин, 1971). Речной сток, вступая во взаимодействие с солеными водами моря, снижает соленость в отдельных районах Северного Каспия от 12,5 до 3—4‰.

Наиболее значительные вертикальные и горизонтальные градиенты солености наблюдаются в районе свала глубин, на границе между Северным и Средним Каспием, где происходит интенсивное перемешивание опресненных северокаспийских вод с более солеными среднекаспийскими. Вертикальные градиенты солености здесь могут достигать до 10‰.

В настоящее время сохраняется основная закономерность распределения солености на поверхности в Среднем и Южном Каспии. Величина ее возрастает в направлении с севера на юг и с запада на восток. Это объясняется опреснением вод вблизи западного берега под влиянием речного стока и осолонением поверхностного слоя у восточного берега в итоге интенсивного испарения в условиях жаркого климата прилегающих пустынь. Здесь соленость достигает 13,6—14,0‰, а в мелководных заливах и бухтах бывает еще выше.

В открытой части моря соленость достигает в среднем 12,80—12,90‰. С глубиной, как правило, средние годовые величины солености возрастают, но весьма незначительно (на 0,05—0,20‰). Многолетние колебания средних годовых величин солености тоже невелики — не более 0,2‰. Сезонные изменения солености также малы и не превышают в Среднем и Южном Каспии 0,10—0,15‰.

Сравнение распределения солености на разрезах в 1965—1968 гг. с данными А. С. Пахомовой (1970) за 1958—1962 гг. показывает, что на разрезе Чечень — Мангышлак произошло повышение солености на 0,2—0,5‰. Слабое увеличение солености отмечено на разрезе Дивичи — Кендерли, а на разрезе Жилой — Куули соленость в основном не изменилась. На разрезе Куринский Камень — Огурчинский в верхнем слое наблюдалось даже некоторое уменьшение солености, а в глубинных слоях она осталась практически неизменной.

Таким образом, анализ данных за 1965—1970 гг. показывает, что основные закономерности и горизонтального и вертикального распределения солености в глубоководных районах моря остались прежними. Увеличилась межгодовая изменчивость солености. В северных районах моря соленость повысилась в среднем на 0,5‰, а в Южном Каспии существенных изменений солености не отмечено.

Распределение кислорода. Несмотря на замкнутость, в Каспийском море имеются весьма благоприятные условия для аэрации вод. Высокое насыщение их кислородом, особенно в глубинных слоях, происходит главным образом вследствие интенсивного развития процессов плотностного перемешивания, усилившегося после осолонения Северного Каспия в результате уменьшения стока Волги.

Наибольшее содержание кислорода наблюдается зимой в северной части моря, благодаря низкой температуре воды и хорошему перемешиванию, быстро распространяющемуся до дна. Как показали экспедиции МГУ, абсолютное и относительное содержание кислорода у кромки льда весьма высоко. Зимой 1965, 1969 и 1970 гг. абсолютное содержание кислорода вблизи ледовой кромки достигало 9,0—10,5 мл/л, а относительное доходило до 110—120% (свидетельство высокого биологического продуцирования). В 1966 и 1968 гг. содержание кислорода у кромки снизилось до 6,0—7,5 мл/л, что было обусловлено интенсивным подтоком среднекаспийских вод — теплых и менее насыщенных кислородом.

Высокое содержание кислорода в Северном Каспии зимой подтверждается данными, полученными Астраханской гидрометеорологической станцией в феврале 1964—1965 гг. во время наблюдений со льдов. Во время этих работ подо льдом содержание кислорода достигало 10—

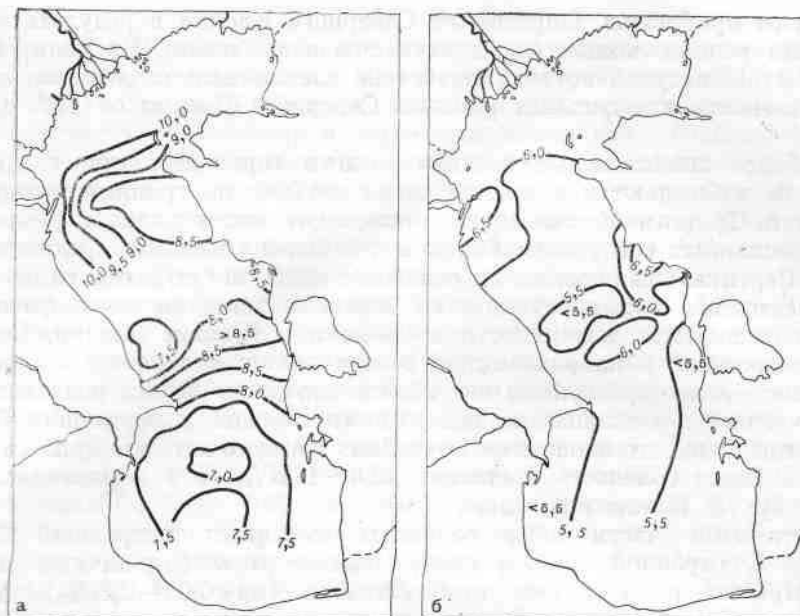


Рис. 9. Распределение величины абсолютного содержания кислорода в Каспийском море в верхнем слое (в мл/л) зимой (а) и летом 1965 г. (б)

11 мл/л, причем иногда наблюдалось даже пересыщение воды кислородом. В феврале 1964 г. в центральной части разреза о-в Новинский — о-в Кулалы пересыщение у дна достигало 170% при однородной температуре во всем слое воды и повышенной величине рН.

Именно вблизи кромки льда вследствие интенсивного охлаждения воды и льдообразования происходит повышение плотности вод и они сползают по склонам в глубинные слои среднекаспийской впадины, насыщая их кислородом и улучшая вентиляцию¹.

Благодаря интенсивному конвективному перемешиванию в Среднем Каспии зимой, его воды в это время года отличаются высокими величинами и однородным вертикальным распределением кислорода. Следует, однако, отметить, что поскольку содержание кислорода в придонных слоях определяется условиями развития зимней циркуляции, оно может существенно изменяться в различные по суровости зимы. В настоящее время на акватории Среднего Каспия зимой преобладает содержание кислорода на поверхности 7,5—8,5 мл/л, а иногда и более высокое (рис. 9). Относительное содержание кислорода составляет 90—100, иногда 110%.

В слое воды, где зимой происходит конвективное перемешивание (0—150, 200 м, иногда глубже), содержание кислорода также бывает высоким — 5—6 мл/л. На нижней границе этого слоя вертикальный градиент кислорода резко возрастает и его содержание уменьшается в среднем до 3,0—3,5 мл/л (около 30%). В суровую зиму 1968/69 г., когда перемешивание в Среднем Каспии распространялось до дна и вертикальные градиенты плотности почти отсутствовали (во всем слое воды плотность составляла 10,9—11,0), содержание кислорода на разрезе Дивичи — Кендерли в слое 0—300 м достигало 7,0, а вблизи дна 5,0—6,0 мл/л (рис. 10). Однако высокое содержание кислорода у дна в Среднем Каспии — более 5,0 мл/л (около 70%) — отмечалось и в марте 1971 г., хотя зима была теплой.

¹ Более подробно некоторые особенности этого процесса будут рассмотрены ниже.

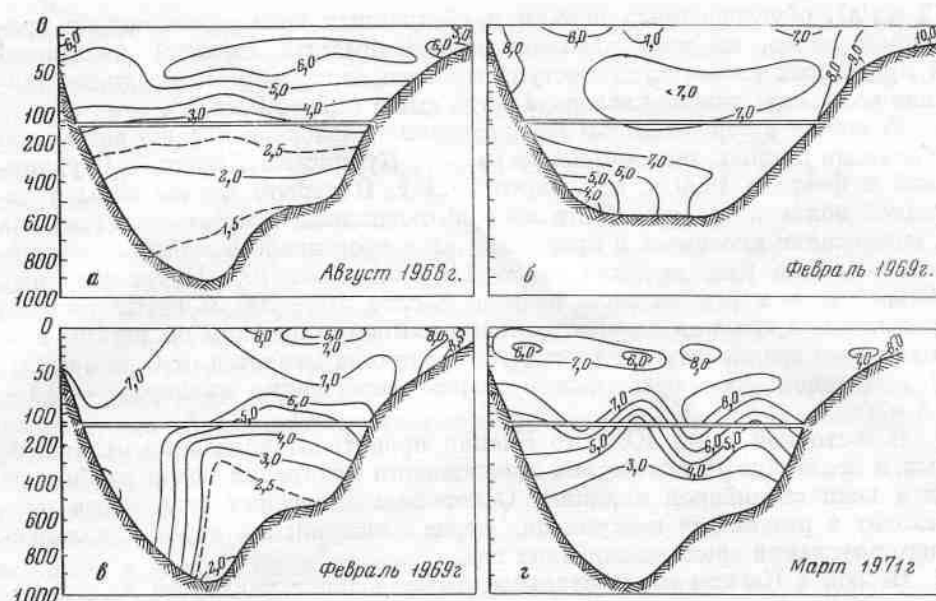


Рис. 10. Вертикальное распределение абсолютного содержания кислорода в Каспийском море (в мл/л) на разрезах Дивичи—Кендерли (б) и о. Куринский камень—о. Огурчинский (а, в, з)

В глубоководных районах Среднего Каспия зимой может происходить подъем глубинных вод с низким содержанием кислорода (2,5—3,0 мл/л) и тогда в слое 200—400 м образуется промежуточный минимум кислорода, а в слое от 400 м до дна его содержание повышается до 3,5—4,0 мл/л. Такое распределение кислорода обусловлено сползанием обогащенных кислородом северокаспийских вод в глубинную часть Среднего Каспия и компенсационным подъемом придонных вод, обедненных кислородом.

В Южном Каспии, где зимой температура воды выше, наблюдается более низкое содержание кислорода. Так, по данным за 1964—1972 гг. средняя величина его на поверхности была равна 7,0—7,5 мл/л (около 100%), а иногда снижалась до 6,7 мл/л. Для прибрежных районов характерно более высокое содержание кислорода — 8,0—8,5 мл/л, что обусловлено большим охлаждением воды.

В аномально теплую зиму 1965/66 г. в открытых районах Южного Каспия наблюдалось повышение относительного содержания кислорода (до 105—110%); это согласуется с почти полным отсутствием здесь фосфатов и свидетельствует о том, что деятельность фитопланктона зимой не затухала. Однако средние значения относительного содержания кислорода (95—100%) и величины содержания фосфатов (до 20 мкг/л) в поверхностном слое показывают, что зимой в Южном Каспии развитие фитопланктона обычно приостанавливается и содержание кислорода в верхнем слое определяется в основном температурой и адвекцией вод течениями.

Вертикальное распределение кислорода в Южном Каспии зимой определяется теми же закономерностями, что и в Среднем. В слое, охваченном конвекцией (0—50, 100 м), содержание кислорода высокое — более 6 мл/л, а на нижней границе этого слоя уменьшается до 3,5—5,0 мл/л. На самых больших глубинах содержание кислорода составляет 1,7—2,2 мл/л.

Здесь так же, как и в Среднем Каспии, отмечаются ситуации, когда в слое 200—300 м наблюдается промежуточный минимум кислорода

(2 мл/л), обусловленный подъемом обедненных кислородом вод из придонных слоев, на что указывает куполообразный характер изоксиген. В придонных слоях, куда поступают более аэрированные среднекаспийские воды, содержание кислорода тогда выше (2,5—3,0 мл/л).

Различие в вертикальном распределении кислорода хорошо видно при сравнении данных, полученных на разрезе Куринский Камень — Огурчинский в феврале 1969 г. и в марте 1971 г. В первом случае воды в западной половине разреза были хорошо охлаждены и перемешаны до дна и содержание кислорода в придонном слое превышало 6 мл/л, а в восточной половине разреза было около 2,0 мл/л (рис. 10). В теплую зиму 1970/71 г. в марте на этом разрезе в слое 100—200 м четко выделяется нижняя граница распространения зимней конвекции по резким вертикальным градиентам кислорода (его величина меняется от 6 до 3 мл/л). В придонном слое наблюдалось низкое содержание кислорода — 2,1—2,4 мл/л.

В восточной части Южного Каспия происходит сползание охлажденных и осолоненных вследствие интенсивного испарения вод в глубинные слои южнокаспийской впадины. Основная же аэрация этих слоев происходит в результате поступления через Апшеронский порог и дальнейшего опускания среднекаспийских вод.

Весной в Каспии горизонтальное распределение кислорода на поверхности было более однородным, чем зимой. По данным 1964—1966 гг., в апреле в Среднем Каспии абсолютное содержание кислорода было 6,9—7,9, а в Южном — 7,0—7,4 мл/л, что в основном соответствует 100 и более процентам насыщения. Повышенное содержание кислорода свидетельствует об усиленном фотосинтезе фитопланктона. В Среднем Каспии содержание кислорода в верхнем слое ниже, чем в более глубоких. Это вызвано начавшимся прогревом верхнего слоя воды, тогда как на глубине сохраняются обогащенные кислородом слои в результате зимней конвекции.

Летом содержание кислорода в верхнем слое воды ниже, чем зимой, что обусловлено значительным повышением температуры и потреблением кислорода на биохимические процессы. Распределение кислорода по акватории Среднего и Южного Каспия равномерное. Среднее содержание кислорода в верхнем слое воды в Среднем Каспии — 5—6 мл/л (иногда 6,5 мл/л), а в Южном — 5,6—6,0 мл/л (т. е. 95—100%). Такое неполное насыщение кислородом верхнего слоя указывает на то, что летом в Среднем и Южном Каспии потребление кислорода на окислительные процессы преобладает над фотосинтетическим продуцированием. В Южном Каспии наблюдается более полное насыщение вод кислородом, поскольку здесь, в более теплых водах, процесс фотосинтеза развит сильнее. Так, летом 1967—1971 гг. в Южном Каспии относительное содержание кислорода в поверхностном слое достигало 110 и даже 120% (значительно выше, чем в прошлые годы). Это указывает на интенсивную деятельность фитопланктона.

По всей акватории моря на глубинах 10—30 м летом наблюдается резкий термоклин, который препятствует распространению кислорода в глубинные слои моря и характеризуется его подповерхностным максимумом (6—7 мл/л) на нижней границе термоклина. Образование максимума, по-видимому, связано с усилением фотосинтеза фитопланктона в этом слое высокой плотностной устойчивости. У восточного берега Среднего Каспия, где летом наблюдается интенсивно развитый апвеллинг, термоклин размыт, а содержание кислорода повышено (до 6,5—9,0 мл/л) во всем слое вследствие лучшей его растворимости при пониженной температуре.

С глубиной содержание кислорода убывает сначала медленно, так как в слое 100—200 м сохраняются повышенные его величины вследствие зимнего обогащения. На нижней границе слоя зимней конвекции наблю-

даются резкие вертикальные градиенты кислорода — его содержание уменьшается с 5—6 до 3—4 мл/л. Далее в направлении дна кислород снова постепенно уменьшается до 2,7—3,3 мл/л в Среднем Каспии и 1,5—2,2 мл/л в Южном. При этом существенное значение имеют условия перемешивания и насыщения глубинных вод кислородом, наблюдавшиеся в прошедшую зиму. Насыщение кислорода летом в придонных слоях составляет 20—30%.

Осенью содержание кислорода в море снова повышается и к зиме достигает максимальных величин. Насыщенность кислородом понижается, так как затухают процессы фотосинтеза. Слой плотностного скачка размывается, и кислород довольно равномерно распределяется по глубине. Суточные изменения кислорода наиболее отчетливо выражены в верхнем слое, где их величина наибольшая, у дна они малы. Наибольшее изменение кислорода наблюдается не на поверхности, а на горизонтах 20—25 м, что объясняется повышенной интенсивностью процессов фотосинтеза в слое термоклина.

За последние 50—60 лет в кислородном режиме Каспийского моря произошли существенные изменения, обусловленные изменением его гидрологического режима. Первые подробные наблюдения за распределением кислорода в Каспии были проведены Н. М. Книновичем в 1914—1915 гг. По его данным, высокое содержание кислорода наблюдалось в слое 0—100 м, в слое 200—400 м оно снижалось, а с 500 м и до дна не превышало 1 мл/л. В придонных слоях кислород отсутствовал (Средний Каспий) или был выражен долями миллилитра на метр (Южной Каспий). в Среднем Каспии на 700 м и даже на меньшей глубине имелся сероводород, в Южном Каспии он встречался лишь изредка в наиболее глубоких слоях.

С. В. Бруевич (1937) детально проанализировал распределение кислорода и других гидрохимических характеристик в Среднем и Южном Каспии в 1934 г. Он отмечал присутствие кислорода в количестве 0,13—0,64 мл/л на больших глубинах Среднего Каспия, а на глубинах ниже 700 м — в Южном Каспии присутствие сероводорода в количестве 0,29 мл/л (Пахомова, Затучная, 1966).

Б. Н. Абрамов (1959), изучавший распределение кислорода и биогенных веществ в 1939—1954 гг., сравнил их значения с величинами, наблюдавшимися в предшествующие годы (1934—1938). Он отмечал, что в период интенсивного снижения уровня моря (1934—1954 гг.), начиная с лета 1937 г., глубинные воды Среднего Каспия начали обогащаться кислородом и к 1943 г. его содержание в них достигло максимума, после чего колебания были незначительными и происходили на высоком уровне. В Южном Каспии процесс обогащения глубинных вод кислородом происходил значительно медленнее.

С 1937 по 1940 г. возросли концентрации фосфатов в верхнем слое моря и уменьшилась их концентрация в придонных слоях. Такие же изменения произошли в распределении нитритов и кремния. Все перечисленные явления Б. Н. Абрамов объясняет усилением вертикальной циркуляции в период падения уровня моря и сползанием аэрированных вод в глубинные слои моря.

А. С. Пахомова, сравнившая данные по кислороду за 1958—1962 гг. с материалами 1934—1943 гг., пишет, что это сравнение убедительно указывает на обогащение кислородом вод Каспийского моря в настоящее время. Концентрация кислорода во всей толще вод значительно возросла. В то же время отмечается некоторое обеднение кислородом вод на средних горизонтах (Пахомова, Затучная, 1966).

Наши исследования, а также расчеты, проведенные А. С. Пахомовой, подтверждают, что повышение содержания кислорода в глубинных слоях моря вызвано усилением процесса сползания охлажденных, богатых кислородом и обладающих высокой плотностью вод по склонам дна

в глубинные слои среднекаспийской впадины. В глубинные слои Южного Каспия глубинные среднекаспийские воды поступают через Апшеронский порог (рис. 11).

В чем причина усиления этого процесса после понижения уровня моря? Плотность вод, охлаждающихся в районе свала глубин на границе между Северным и Средним Каспием, а следовательно и глубина их сползания могут быть весьма различными, в зависимости от температуры воды и солености в этом районе. Прошедшее за последнее время уменьшение стока Волги и связанное с ним осолонение северной части моря привело к увеличению плотности вод на свале глубин и повысило воз-

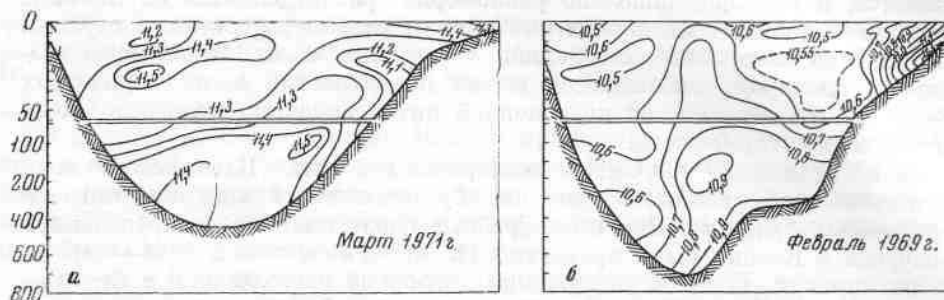


Рис. 11. Распределение условной плотности воды в Каспийском море на разрезах Дивичи — Кендерли (а) и о. Куринский камень — о. Огурчинский (б)

можность вентиляции глубинных слоев средней части моря. В феврале плотность на разрезе Чечень—Мангышлак достигает 11,2—11,4. Воды с такой плотностью могут опускаться до придонных горизонтов в котловине Среднего Каспия.

Указанная возможность формирования глубинных вод Среднего Каспия вследствие сползания по склонам дна охлажденных вод была подтверждена выполненным в Государственном океанографическом институте анализом распределения условной плотности зимой. Анализ показал, что возможность опускания северо-каспийских вод до дна Дербентской котловины, как это было в 1941 и 1962 гг., действительно существует и что такой возможности не было в 1915 и 1934 гг. (Пахомова, Затучная, 1966). Следует иметь в виду, что сползающие охлажденные воды замещаются солеными и более теплыми водами, поступающими в район кромки льда из Среднего Каспия. Здесь они охлаждаются и, приобретая весьма высокую плотность, в свою очередь опускаются в глубинные слои моря, т. е. в районе кромки льда устанавливается своеобразная циркуляция вод, обеспечивающая хорошую вентиляцию самых глубинных слоев Среднего Каспия. На развитие этой циркуляции влияет и температура воды в северном районе Среднего Каспия, которая может отличаться на 2—3° в разные по суровости зимы.

Вентиляция глубинных слоев Южного Каспия происходит вследствие поступления среднекаспийских вод и поскольку возможная глубина их опускания по южному склону Апшеронского порога увеличилась, улучшились и условия вентиляции глубинных вод южной части моря, хотя процесс этот начался позже и происходил с меньшей интенсивностью.

Современные условия возможности вентиляции глубинных слоев Каспийского моря хорошо иллюстрируются распределением плотности воды и кислорода на меридиональных разрезах через Средний и Южный Каспий, выполненных экспедициями МГУ как зимой, так и летом. Распределение условной плотности на таком разрезе зимой 1965 гг. показано на рис. 12.

Проведенный нами анализ распределения кислорода в 1965—1970 гг. характеризует период относительной стабильности стока Волги и соле-

ности Северного Каспия, установившейся на новом уровне. Поэтому изменения глубины распространения зимней конвекции определяются теперь в основном суровостью зимы и степенью охлаждения вод. Сравнение наших данных с данными А. С. Пахомовой за 1958—1962 гг. показывает, что распределение кислорода в основном осталось примерно таким же. Как верхние, так и глубинные слои воды Каспийского моря достаточно насыщены кислородом, причем в Среднем Каспии насыщение выше, чем в Южном. Вместе с тем следует отметить, что и в Среднем, и в Южном Каспии среднее содержание кислорода в верхнем слое увеличилось на 0,3—0,5 мл/л, а в глубинных слоях уменьшилось на 0,1—

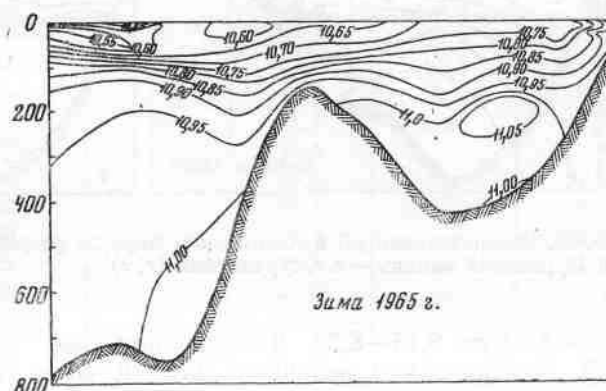


Рис. 12. Распределение условной плотности в Каспийском море на меридиональном разрезе по 51° в. д.

0,4 мл/л. Таким образом, вертикальная стратификация кислорода несколько увеличилась, что характеризует относительную стабильность условий аэрации (можно предположить, что некоторое влияние на уменьшение насыщения кислородом глубинных слоев воды вызвано тем, что в 1965—1970 гг. наблюдалось несколько теплых зим).

Активная реакция (pH). По сравнению с океаном и другими морями активная реакция каспийской воды повышена, что обусловлено ее большим щелочным резервом. Так же, как и кислород, pH изменяется по сезонам в связи с разной интенсивностью биохимических и физико-химических процессов. Сезонные изменения pH хорошо выражены в зоне фотосинтеза (до 50—100 м), ниже и до дна они значительно меньше. В зависимости от физико-географических и гидрологических условий величина pH меняется в различных районах моря от 8,5—8,6 на поверхности до 7,9—8,0 у дна.

Наблюдения, проведенные зимой 1970 г., показали, что у кромки льда величина pH была высокой — 8,3—8,4 в верхнем слое воды и 8,25—8,35 у дна. В Среднем Каспии зимой значения pH в верхнем слое изменялись от 8,2 до 8,4, увеличиваясь с запада на восток. В феврале 1969 г. вблизи восточного берега величина pH достигала 8,5 (рис. 13). При хорошем перемешивании величина pH плавно уменьшается с глубиной и у дна равняется 8,15—8,20.

Высокие величины pH наблюдаются зимой и на разрезе Жилой—Куули — от 8,3—8,4 до 8,5—8,6.

В Южном Каспии зимой величина pH в верхнем слое также увеличивается с запада на восток с 8,3 до 8,5. Такое распределение pH соответствует повышению температуры воды зимой с севера на юг и с запада на восток. Кроме того, в южной части моря и зимой возможна (хотя и слабая) жизнедеятельность фитопланктона, т. е. потребление углекислого газа.

В слое 100—200 м в Южном Каспии зимой наблюдаются значительные вертикальные градиенты pH, отмечающие нижнюю границу проникновения зимней конвекции. В этом слое величина pH уменьшается с

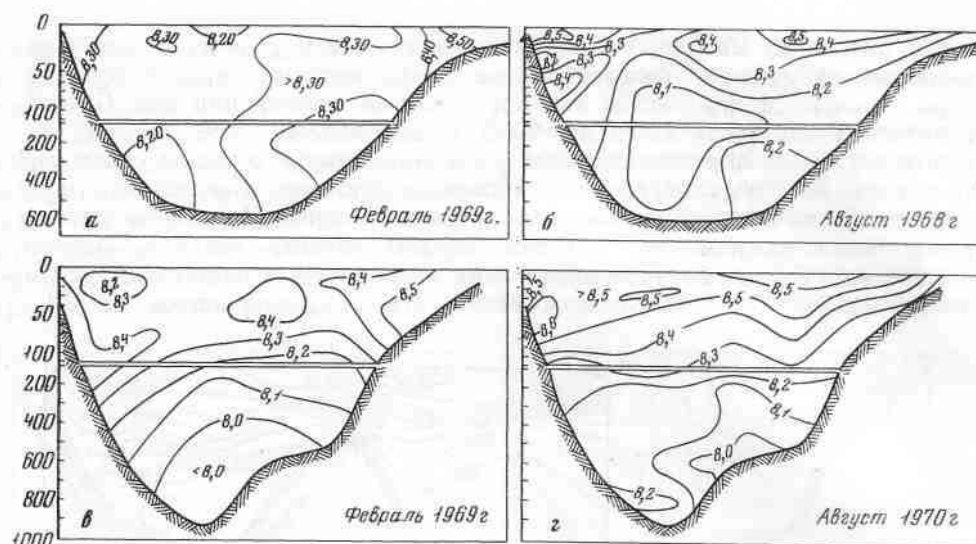


Рис. 13. Распределение pH в Каспийском море на разрезах Дивичи — Кендерли (а, б) и о. Куринский камень — о. Огурчинский (в, г)

8,35—8,40 до 8,15—8,20. В придонном слое величина pH равна 7,95—8,10. Максимальная величина pH в Южном Каспии в 1967—1971 гг. была 8,60.

Летом в верхнем слое воды Среднего Каспия величина pH составляет 8,4—8,5; особенно высокие значения pH наблюдаются в северо-западном районе, где биохимические процессы протекают наиболее интенсивно. Только вблизи восточного берега, в зоне летней температурной аномалии, величина pH уменьшается до 8,1—8,2, что отражает химические условия холодных глубинных вод, выходящих здесь к поверхности. В глубинных слоях Среднего Каспия сохраняются низкие значения pH — 8,0—8,2.

На разрезе Жилой—Куули летом величина pH уменьшается от поверхности до дна от 8,4—8,5 до 7,9—8,2. В Южном Каспии в верхнем слое pH равняется в основном 8,4—8,6, а с глубиной уменьшается до 8,0—8,2.

Сопоставление величин pH, наблюдавшихся в 1965—1971 гг., с данными А. С. Пахомовой за 1958—1962 гг., показывает, что характер распределения pH и ее средние величины сохранились такими же, однако максимальные значения в верхнем слое отмечались выше, что увязывается и с увеличением содержания кислорода. В некоторых ситуациях отмечается и повышение величины pH в целом на разрезах, например при сравнении распределения pH на разрезе Дивичи—Кендерли зимой 1962 и 1971 гг.

Биогенные вещества. Основной источник биогенных веществ — речной сток. В связи с зарегулированием стока Волги в 1956 и 1959 гг. поступление биогенных веществ в море значительно изменилось, биогенное питание Каспия ухудшилось. Помимо речного стока поступление биогенных веществ в море может происходить с ионным подземным стоком, а также в результате деятельности подводных грязевых вулканов. В последнем случае могут фиксироваться локальные «пятна», «ядра» биогенных веществ, отличающиеся по величине от их обычного распределения в данном слое воды. Однако, как уже отмечалось, доля подземного стока и вулканизма в биогенном питании моря почти не изучена.

Фосфаты. В Каспийском море концентрации фосфатов за очень редким исключением не превышают 60 мкг/л. Они значительно меняются

ТАБЛИЦА 3

Среднее многолетнее распределение фосфатов (в мкг/л) в Среднем и Южном Каспии

Глубина, м	1958—1963 гг.		1965—1970 гг.			
	Средний Каспий	Южный Каспий	I	IV	VI	VIII ₉
0	8,3	6,6	6,4	7,5	9,2	7,2
10	7,0	5,8	6,1	6,4	6,6	7,3
25	5,8	5,2	4,9	6,3	6,0	5,0
50	9,6	6,7	—	9,8	8,7	7,2
75	—	—	—	13,8	15,9	—
100	13	13	—	13,4	17,9	11,6
150	—	—	—	18,0	18,4	16,5
200	21	24	—	21,5	22,6	21,5
300	24	30	—	23,6	—	27,9
400	28	32	—	26,9	—	31,7
500	33	33	—	32,7	—	32,7
600	34	40	—	34,8	—	36,1
700	35	40	—	31,6	—	40,3
750	35	45	—	35,3	—	43,3
800	—	—	—	—	—	—

Примечание. Разрезы: I — Чечень — Мангышлан, IV — Дивичи — Кендерли, VI — Жилой — Куули, VIII — Куринский Камень — Огурчинский.

с глубиной (табл. 3) (рис. 14). В верхней фотосинтетической зоне содержание фосфатов снижено вследствие потребления их фитопланктоном. С глубиной содержание их сильно возрастает, благодаря окислению падающего сверху органического вещества и регенерации фосфатов. Глубже 400—500 м этот процесс несколько замедляется в связи с уменьшением содержания в воде кислорода, и поэтому у дна в сравнении с лежащими выше слоями иногда отмечается уменьшение фосфатов (Пахомова, 1970).

Специальные наблюдения, проведенные зимой 1969 г., показали, что во льдах Каспия содержится весьма высокое количество фосфатов, в 2—5 раз больше, чем в приледных водах: соответственно 8,6—16,7 и 2,5—3,9 мкг/л. Во льдах содержатся также и повышенные концентрации нитратов. Следовательно, при таянии льдов воды Северного Каспия существенно обогащаются этими важнейшими минеральными питательными солями, что должно способствовать интенсивному развитию весной у кромки льда фито- и зоопланктона (Орадовский, Филонов, 1972).

В Среднем и Южном Каспии фосфаты распределяются следующим образом. В западной половине моря содержание фосфатов в поверхностном слое выше в результате влияния речного стока. По данным 1964—1966 гг., зимой у западного берега Среднего Каспия, оно достигало 40 мкг/л, а у восточного — всего 9—10 мкг/л. В центральных районах количество фосфатов было высоким — 20—40 мкг/л. В меридиональном направлении оно увеличивалось с севера на юг, достигая 40 мкг/л на границе с Южным Каспием. По вертикали зимой в Среднем Каспии количество фосфатов возрастало с глубиной почти на 20 мкг/л. Зимой 1965/66 г. в Среднем Каспии наблюдались более низкие величины фосфора, чем в два предыдущих года: 6—10 мкг/л на поверхности и 25—27 мкг/л у дна. Однако такое пониженное содержание фосфора, возможно, объясняется тем, что эта зима была аномально теплой и деятельность фитопланктона не прекращалась.

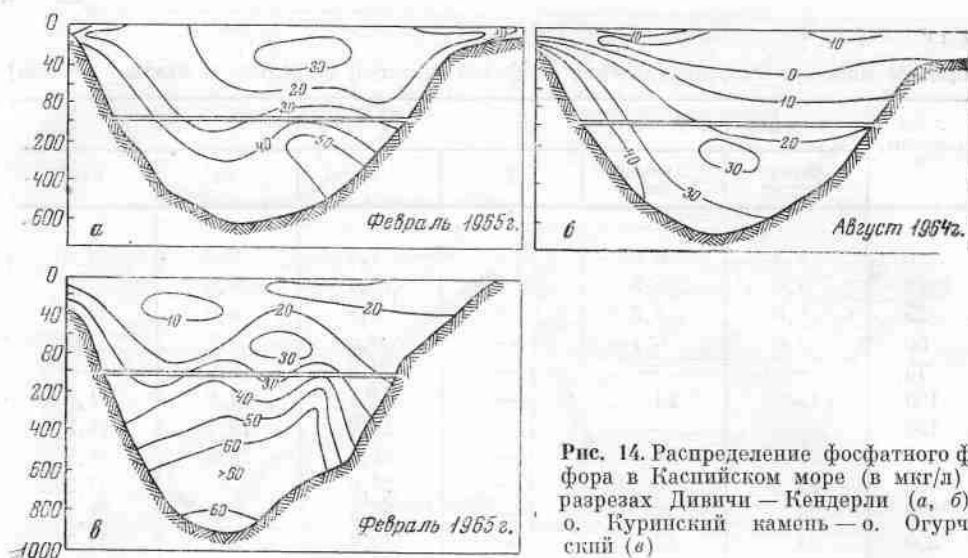


Рис. 14. Распределение фосфатного фосфора в Каспийском море (в мкг/л) на разрезах Дивичи — Кендерли (а, б) и о. Куринский камень — о. Огурчинский (в)

Летом 1964—1966 гг. распределение фосфатов в Среднем Каспии характеризовалось, хотя и меньшими, чем зимой, но все же значительными величинами во всей толще воды — от 10 до 30 мкг/л, за исключением слоя 0—25 м, где они интенсивно потреблялись. В районе апвеллинга у восточного берега количество фосфатов летом было выше, чем в открытом море, и изменялось на поверхности от 5—10 до 30 мкг/л в связи с поступлением фосфора из глубинных слоев моря (Пахомова, Косарев, 1972).

В Южном Каспии содержание фосфатов зимой в верхнем слое составляло 5—10, иногда доходя до 20 мкг/л. Ниже слоя фотосинтеза количество их значительно увеличивается с глубиной — до 60 мкг/л. В феврале 1969 г. на разрезе Куринский Камень — Огурчинский у дна их было 67 мкг/л.

Летом в южной части моря содержание фосфатов в слое фотосинтеза уменьшается почти до нуля в связи с интенсивным потреблением, а с глубиной постепенно возрастает до 10—20 мкг/л.

Таким образом, наибольшее количество фосфатов наблюдается в глубинных слоях Южного Каспия, в средней части моря запасы их меньше, так как здесь наблюдается более интенсивная вентиляция глубинных вод, обеспечивающая вынос фосфатов на поверхность. В верхнем слое воды в Южном Каспии содержание фосфатов также выше, чем в Среднем.

Сравнение величин фосфатов, наблюдавшихся в 1965—1970 гг., с данными А. С. Пахомовой, показывает, что в основном они отличаются незначительно, за исключением отдельных локальных отклонений. Такое распределение фосфатов свидетельствует о том, что их баланс в море, нарушенный изменением величины и распределения стока Волги, в настоящее время установился на новом, показанном уровне.

Нитраты. Из всех форм связанного азота наиболее важное значение в море имеют нитраты. Они интенсивно потребляются фитопланктоном, поэтому при развитии фотосинтеза количество их в поверхностном слое быстро истощается и падает до аналитического нуля. Пополнение нитратов в зоне фотосинтеза происходит из глубинных слоев.

В Среднем Каспии в течение года наибольшее содержание нитратов и равномерное распределение их с глубиной наблюдается зимой и объясняется как отсутствием потребления их в это время года, так и поступлением их из глубинных слоев в результате интенсивной зимней циркуляции.

В 1966 г. распределение нитратов в Среднем Каспии было исследовано Г. Н. Нурмагомедовым (1968). Зимой концентрация их в верхнем слое воды колебалась от 0 до 38 (в среднем 5,1) мкг/л, а летом на поверхности они повсеместно отсутствовали. Наибольшее количество нитратов — 30—38 мкг/л было отмечено в районе о-ва Чечень, наименьшее 0—0,1 мкг/л — в центральной и восточной частях Среднего Каспия. С глубиной концентрация нитратов увеличивалась, особенно сильно с глубины 100—200 м.

Сравнение данных А. С. Пахомовой 1961—1962 гг. с материалами С. В. Бруевича за 1934 г. показывает, что распределение нитратов по глубине стало более равномерным, тогда как раньше содержание нитратов достигало 150—160 мкг/л, в 1961—1962 гг. оно колебалось около 85 мкг/л в средней части моря и около 50 мкг/л в южной. В глубинных горизонтах (700—800 м) содержание нитратов понижалось до нуля. В 1961—1962 гг. этого не обнаружено, минимальное количество нитратов было 60—70 мкг/л в Среднем Каспии и 50—10 мкг/л в Южном. Все эти изменения в распределении нитратов вполне согласуются с более однородным распределением по вертикали рН и кислорода (Пахомова, 1970).

По данным А. С. Пахомовой, в 1960—1962 гг. зимой количество нитратов в Среднем Каспии было 40—76, летом — 3—82 мкг/л. Зимой 1966 г. концентрация нитратов повышалась с глубиной с 5,1 до 145 мкг/л, т. е. вертикальная стратификация была выражена гораздо резче. Значительное увеличение нитратов происходило в слое 100—200 м. Зимние величины нитратов на всех горизонтах были всегда выше летних.

В Южном Каспии зимой содержание нитратов в верхнем слое было значительно меньше, чем в Среднем, что свидетельствует об их потреблении и, следовательно, о развитии фитопланктона.

Кремний. Количество кремнекислоты в морской воде изменяется в широких пределах. Минимальные концентрации редко бывают меньше 100 мкг/л, максимальные могут превышать 3000 мкг/л. Источник кремнекислоты в море — материковый сток, поэтому по содержанию и распределению кремния в верхнем слое можно судить о влиянии речных вод в море. Источниками кремния в глубинных слоях Каспия могут быть подземный ионный сток и деятельность подводных грязевых вулканов.

На севере Среднего Каспия содержание кремния увеличивается от зимы к лету, что связано с внутригодовым распределением речного стока, поступающего в Северный Каспий. Распределение кремния в верхнем обедненном слое Среднего Каспия в холодное и теплое время года различно. Зимой обогащается его западная часть вследствие влияния речного стока. Так, например, в этом районе содержание кремния в феврале 1969 г. составляло 750—1000 мкг/л, а вблизи восточного берега — 500 мкг/л. Неравномерное распределение кремния в этих районах наблюдалось и в марте 1971 г. Так, Г. Н. Нурмагомедов (1968) также указывал, что зимой 1966 г. поверхностный слой в западном и центральном районах Среднего Каспия был более богат кремнием, чем в восточном (соответственно 400—600 и 300 мкг/л).

Вертикальное распределение кремния зимой в Среднем Каспии существенно зависит от степени развития вертикальной циркуляции и перемешивания вод. В феврале холодной зимы 1968/69 г., отличавшейся интенсивно развитыми процессами перемешивания в Среднем Каспии, содержание кремния во всей толще воды составляло 750—1000 мкг/л (причем у дна оно даже несколько уменьшалось).

В Южном Каспии в ноябре 1968 и 1970 гг. в слое от поверхности до глубины 100 м количество кремния было равно нулю, за исключением западного района, где оно увеличивалось до 300—400 мкг/л под влиянием стока р. Куры. Глубже происходило закономерное увеличение количества кремния до 1500—2000 мкг/л [следует отметить, что, по данным А. С. Па-

хомовой (1966), в верхнем слое Южного Каспия осенью отсутствие кремния не наблюдалось]. Зимой 1970/71 г. на разрезе Куринский Камень — Огурчинский содержание кремния в верхнем слое несколько возросло, до 200—500 мкг/л. В феврале 1969 г. такое же содержание кремния наблюдалось во всей толще воды в западной части разреза. В восточной его части, где сохранялась устойчивая стратификация вод, оно увеличивалось до 2500 мкг/л у дна.

В марте теплой зимы 1970/71 г. наблюдалась четкая вертикальная стратификация кремния; содержание его возросло ко дну от 1000 мкг/л на горизонте 200 м до 3000 мкг/л и более у дна. Такое содержание кремния в глубинных слоях Южного Каспия было существенно выше, чем в 1958—1963 гг. (Пахомова, 1970). Не исключена возможность его поступления в результате деятельности подводных грязевых вулканов, имеющих в Южном Каспии в значительном количестве¹.

Сравнение вертикального распределения кремния в Среднем и Южном Каспии показывает, что в верхнем слое воды (0—200, 300 м) количество его в средней части моря больше, что объясняется поступлением кремния с речным стоком прежде всего в эту часть моря. В глубинном слое, наоборот, количество кремния больше в Южном Каспии, видимо потому, что вследствие большего развития процессов конвективного перемешивания и вентиляции вод в Среднем Каспии в нем происходит интенсивный обмен кремнием между глубинными и верхними слоями.

Сравнение полученного материала с данными А. С. Пахомовой показывает, что за весь период исследований среднее содержание кремния в верхнем слое практически не изменилось. В глубинных же слоях Среднего и особенно Южного Каспия произошло увеличение содержания кремния.

* * *

Проведенные исследования показали, что в 1965—1970 гг. существенных изменений в гидрохимическом режиме Каспийского моря не произошло. Распределение основных гидрохимических характеристик и их величины находились в соответствии с данными А. С. Пахомовой, полученными за 1958—1963 гг.

В настоящее время Каспий переживает время относительной стабилизации гидрохимических условий, объясняемое тем, что влияние изменений гидрохимического режима моря, вызванных зарегулированием стока Волги в 1956—1959 гг., сбалансировалось и не ощущается столь сильно, как это было в первые годы после введения в строй крупных гидроэлектростанций.

Сопоставление современных гидрохимических характеристик Каспия с данными 1958—1963 гг. показывает некоторые их сдвиги. Так, при сравнении распределения солености на стандартных разрезах выявляется, что на разрезе Чечень — Мангышлак она повысилась на 0,2—0,5‰. Сравнительно небольшое увеличение произошло также на разрезе Дивичи —

¹ В августе-сентябре 1972 г. в экспедиции МГУ под руководством С. А. Брусиловского Н. Андреевой были собраны материалы о содержании биогенных веществ в придонном слое воды Южного Каспия. Пробы были собраны при помощи геологической трубки. Анализ собранного материала показал, что на западном шельфе содержание кремния колебалось от 150 до 800 мкг/л, увеличиваясь с глубиной. Мористее изобаты 100 м были взяты пробы в местах предполагаемых выходов грязевых вулканов. Было выяснено, что восточнее устья Куры, в районе банки Калмычкова на глубине 100—160 м содержание кремния достигало 1400 мкг/л, а к востоку от Куринской косы на глубине 450 м — 1900 мкг/л. Содержание фосфора в пробах до глубины 100 м равнялось 5—24 мкг/л, мористее — 30 мкг/л.

На восточном шельфе, западнее и юго-западнее о-ва Огурчинского, содержание кремния изменялось от 30 (о-в Огурчинский) до 800 мкг/л на глубине 100 м. Концентрация фосфора в придонных водах этого района изменялась от 0 до 13 мкг/л.

Кендерли, а на разрезе Куринский Камень — Огурчинский в верхнем слое отмечено даже некоторое уменьшение солености, а в глубинных слоях она осталась практически неизменной.

Распределение кислорода в основном также осталось примерно таким же, как в 1958—1962 гг.

Величины рН, так же как и содержание кислорода, сохранили основные закономерности своего распределения, однако в верхнем слое они стали более высокими, чем раньше.

Судя по распределению биогенных веществ, в настоящее время баланс их в море, нарушенный в 50-х годах в связи с зарегулированием стока Волги, установился и уменьшения количества биогенных веществ не происходит. Содержание фосфатов в общем незначительно отличается от данных А. С. Пахомовой за 1958—1963 гг. В глубинных слоях Среднего и особенно Южного Каспия отмечается увеличение содержания кремния.