

Таблица 23

Соленость воды Северного Каспия (‰), полученная по наблюдениям S_n , по формуле S_ϕ и по уравнению солевого баланса S_6

Год	S_n	S_ϕ	$S_n - S_\phi$	S_6	$S_n - S_6$	$S_\phi - S_6$
1954	8,14	8,38	-0,24	7,59	+0,55	+0,79
1955	7,30	7,68	-0,38	8,08	-0,78	-0,40
1956	9,13	8,30	+0,83	9,11	+0,02	-0,81
1957	8,39	7,68	+0,71	8,90	-0,51	-1,22
1958	7,76	7,56	+0,20	7,78	-0,02	-0,22
1959	8,35	7,56	+0,79	7,64	+0,71	-0,08
1960	8,67	8,21	+0,46	8,30	+0,37	-0,09
1961	8,66	8,87	-0,21	9,28	-0,62	-0,41
1962	9,03	8,62	+0,41	8,35	+0,68	+0,27
1977	—	8,84	—	8,49	—	+0,35
1978	—	8,77	—	8,60	—	+0,17
1991	—	9,23	—	9,83	—	-0,60
1992	—	9,27	—	9,63	—	-0,36
1999	—	9,51	—	9,50	—	+0,01
2000	—	9,51	—	9,37	—	+0,14

солености под влиянием волжского стока на данном разрезе в лучшей степени характеризуют те изменения солености, которые можно ожидать в Среднем Каспии при проведении всех предполагаемых народнохозяйственных мероприятий на Волге. В течение всего этого периода соленость в поверхностном слое разреза Чечень—Мангышлак колебалась в пределах 1‰, в то время как величина волжского стока менялась от 209 до 281 км³. Благодаря нахождению связи солености со стоком в пограничном районе Северного и Среднего Каспия сделан вывод о том, что в результате всех предполагаемых мероприятий на р. Волге существенных изменений в средней солености здесь не произойдет.

Глава IV

РЕЖИМ КИСЛОРОДА И АКТИВНОЙ РЕАКЦИИ pH

Систематические наблюдения над газовым режимом Северного Каспия проводятся с 1934 г. Первые сведения даны Бруевичем и Ивановым (1938). Довольно полно газовый режим исследовался в 1936 г.; материалы этих исследований обобщены в работе Иванова (1948). К числу крупных работ следует

отнести работу Федосова и Барсуковой (1959) и Винецкой (1962). В последней обобщены материалы наблюдений над гидрохимическим режимом Северного Каспия за период с 1935 г. до зарегулирования стока Волги.

АГМО под руководством ГОИНа начиная с 1960 г. и по настоящее время проводит систематические наблюдения над газовым режимом Северного Каспия.

Средние годовые и сезонные изменения кислорода и активной реакции pH

В работе Винецкой (1962) был приведен обширный материал наблюдений над элементами газового режима Северного Каспия в период до зарегулирования, и в связи с этим появилась возможность выявить те изменения в газовом режиме, которые произошли в море после зарегулирования речного стока. Оказалось (табл. 24), что в более глубокой и мелководной зонах западного района абсолютное содержание кислорода после зарегулирования не изменилось, в то же время относительное содержание кислорода несколько понизилось, а также снизились значения величин pH.

Таблица 24

Средние значения величин кислорода и pH в Северном Каспии в периоды до и после (1961—1963 гг.) зарегулирования речного стока

Годы	Зона	O ₂ мл/л	O ₂ %	pH
Западный район				
1935—1941, 1947, 1948, 1955	Мелководная	6,66	99	8,55
1935—1938, 1940, 1941, 1947, 1955	Глубоководная	6,41	101	8,44
1961—1963	Мелководная	6,64	97	8,39
1961—1963	Глубоководная	6,46	98	8,29
Восточный район				
1947, 1955	Мелководная	6,95	100	8,47
1935—1938, 1940, 1941, 1947, 1955	Глубоководная	6,38	97	8,40
1961—1963	Мелководная	6,53	97	8,35
1961—1963	Глубоководная	6,61	98	8,36

Максимальные межгодовые колебания абсолютного содержания кислорода в мелководной зоне западного района составляли

до зарегулирования 1,27 мл/л, после зарегулирования 0,47 мл/л; в более глубокой части моря эти колебания равны до зарегулирования 0,65 мл/л, после зарегулирования 0,13 мл/л. Максимальные межгодовые колебания относительного содержания кислорода в мелководной части моря составили до зарегулирования 29%, после зарегулирования 3%; в более глубокой части моря — до зарегулирования 9%, после зарегулирования 3%. Максимальные межгодовые колебания рН в мелководной части были равны в период до зарегулирования 0,15, после зарегулирования 0,10; в глубоководной части моря — в период до зарегулирования 0,10, после зарегулирования 0,07.

Таким образом, после зарегулирования стока отмечается стабильность в режиме средних годовых величин кислорода и активной реакции рН в западном районе.

В восточном районе Северного Каспия, особенно в его мелководной зоне, наблюдений, характеризующих режим до зарегулирования, очень мало. Тем не менее сравнение средних величин кислорода и рН за периоды до и после зарегулирования стока Волги свидетельствует о том, что существенных изменений в средних годовых величинах в восточном районе не произошло. Правда, в мелководной зоне после зарегулирования стока наблюдается некоторое понижение абсолютного и относительного содержания кислорода и уменьшение величин активной реакции рН.

Максимальные межгодовые колебания абсолютного содержания кислорода в глубоководной зоне восточного района составляли в период до зарегулирования 0,58 мл/л, после зарегулирования 0,39 мл/л. Максимальные межгодовые колебания относительного содержания кислорода были равны в период до зарегулирования 8%, после зарегулирования 4%. Максимальные межгодовые колебания рН составили до зарегулирования 0,10, после зарегулирования 0,06.

Таким образом, в результате зарегулирования стока в Северном Каспии наблюдается некоторое снижение относительного содержания кислорода, более существенно уменьшаются величины рН и амплитуды межгодовых изменений кислорода и рН.

Н. И. Винецкая (1962) подробно освещает сезонный ход кислорода и рН в Северном Каспии за 1935—1955 гг. По ее данным, наибольшие сезонные колебания кислорода наблюдались в мелководной зоне западного района Северного Каспия, а наименьшие — в мелководной зоне восточного района моря. Границей между этими зонами служит изобата 3 м. В работе приведены данные о средних многолетних колебаниях элементов газового режима по всем месяцам, исключая зимний период.

Абсолютное содержание кислорода в различные сезоны года, по данным до и после зарегулирования, зависит от температур-

ного режима моря, оно увеличивается весной и осенью и понижается летом (табл. 25).

За 1961—1963 гг. внутригодовые изменения абсолютного содержания кислорода, исключая зимний период, составили в мелководной зоне западного района 2,0, восточного 1,5 мл/л, в глубоководной зоне восточного района 3,3, западного 2,5 мл/л.

Величины относительного содержания кислорода учитывают изменения растворимости кислорода в зависимости от температуры и солености воды и служат показателями биологических процессов в море.

В мелководной зоне западного района моря как в период до зарегулирования, так и после наименьшее относительное содержание кислорода в воде отмечается в мае, наивысшее — в августе—сентябре (табл. 26). За 1961—1963 гг. относительное содержание кислорода изменилось от 91 до 112%. В июле обнаруживается довольно резкое снижение относительной величины кислорода (до 90%) по сравнению с 1935—1955 гг. (102%, по данным ВНИРО). Однако данные ВНИРО весьма приближенные, так как средняя многолетняя величина кислорода за июль получена только до 1937 г.

В мелководной зоне восточного района Северного Каспия насыщение воды кислородом в продолжение года колеблется от 99 до 105%. В глубоководной зоне восточного района моря в период до зарегулирования и после наибольшее относительное содержание кислорода отмечается в апреле, а наименьшее — в июле.

Характеристики относительного содержания кислорода до и после зарегулирования находятся в обратном соотношении для глубоководной зоны западного района. Зарегулирование, по-видимому, сыграло здесь роль в изменении годового режима насыщения воды кислородом. Если по данным 1935—1955 гг. максимум насыщения воды кислородом обнаруживается в июле, то по данным 1961—1963 гг. в июле наблюдается минимум; если по данным 1935—1955 гг. минимум относительного содержания кислорода приходится на сентябрь, то по данным 1961—1963 гг. осенью (октябрь) и весной (апрель) отмечается максимум. Насыщение воды кислородом за 1961—1963 гг. в глубоководной зоне западного района колеблется от 94 до 107%.

По данным 1935—1955 гг., увеличение значений рН повсеместно наблюдается в летнее время, что связано с усилением фотосинтетических процессов. Аналогичное распределение рН отмечается в период 1961—1963 гг. (табл. 27). В ряде случаев повышение рН происходило также и в сентябре. В период после зарегулирования в отличие от периода до зарегулирования в сезонном ходе рН отсутствовали резкие колебания. Так, максимальные колебания рН, по средним данным за 1961—1963 гг., составили в глубоководной зоне западного и восточного районов

Таблица 25

Абсолютное содержание кислорода (мл/л) в периоды до (1935—1955 гг.) и после (1961—1963 гг.) зарегулирования стока в поверхностном слое Северного Каспия

Год	Западный район							Восточный район						
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X-XI	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X-XI
Мелководная зона														
Среднее за 1935—1955 гг.	7,36	6,23	6,00	5,84	5,85	7,27	8,13	8,18	6,58	5,63	—	5,94	7,22	8,51
1961	7,51	6,20	—	—	—	7,05	—	7,83	6,28	—	5,51	—	6,91	—
1962	7,46	—	6,31	5,38	—	—	6,65	7,31	—	6,21	5,48	—	—	6,23
1963	7,52	—	6,04	5,51	—	—	7,24	7,30	—	—	5,50	—	—	7,22
Среднее за 1961—1963 гг.	7,50	6,20	6,18	5,44	—	7,05	6,94	7,48	6,28	6,21	5,50	—	6,91	6,73
Глубоководная зона														
Среднее за 1935—1955 гг.	7,47	6,45	6,22	6,12	5,92	6,60	7,08	7,58	6,25	5,91	5,81	5,91	6,82	7,52
1961	8,01	6,33	—	5,85	—	5,85	—	8,52	6,19	—	5,44	—	6,66	—
1962	7,32	—	6,14	5,39	—	—	6,70	7,59	—	6,25	5,23	—	—	6,43
1963	7,86	—	5,92	5,37	—	—	6,85	7,89	—	—	5,30	—	—	7,11
Среднее за 1961—1963 гг.	7,73	6,33	6,03	5,54	—	5,85	6,77	8,00	6,19	6,25	5,32	—	6,66	6,77

Таблица 26

Относительное содержание кислорода (% насыщения) до (1935—1955 гг.) и после (1961—1963 гг.) зарегулирования стока в поверхностном слое Северного Каспия

Год	Западный район							Восточный район						
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X-XI	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X-XI
Мелководная зона														
Среднее за 1935—1955 гг.	102	95	101	102	105	103	100	102	98	99	—	97	100	103
1961	102	91	—	92	—	112	—	105	99	—	91	—	102	—
1962	100	—	100	90,5	—	—	96	102	—	99	94	—	—	(90)
1963	97	—	98	95	—	—	100	98	—	—	95	—	—	102
Среднее за 1961—1963 гг.	100	91	99	92	—	112	98	102	99	99	93	—	102	—
Глубоководная зона														
Среднее за 1935—1955 гг.	103	100	103	105	101	97	97	100	100	98	96	98	96	96
1961	107	100	—	95	—	99	—	107	99	—	94	—	102	—
1962	100	—	98	94	—	—	100	100	—	100	92	—	—	94
1963	97	—	98	95	—	—	100	100	—	—	93	—	—	99
Среднее за 1961—1963 гг.	101	100	98	95	—	99	100	102	99	100	93	—	102	97

Таблица 27

Величины рН в периоды до (1935—1955 гг.) и после (1961—1963 гг.) зарегулирования стока в поверхностном слое Северного Каспия

Год	Западный район							Восточный район						
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X-XI	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X-XI
Мелководная зона														
Среднее за 1935—1955 гг.	8,45	8,46	8,45	—	8,86	(8,61)	8,39	8,36	—	8,53	—	8,68	—	8,28
1961	8,24	8,37	—	8,30	—	8,53	—	8,38	8,31	—	8,32	—	8,37	—
1962	8,31	—	8,40	8,44	—	—	8,32	8,32	—	8,36	8,40	—	—	8,45
1963	8,41	—	8,47	8,63	—	—	8,36	8,21	—	—	8,51	—	—	8,34
Среднее за 1961—1963 гг.	8,32	8,37	8,43	8,45	—	8,53	8,34	8,30	8,31	8,36	8,41	—	8,37	8,39
Глубоководная зона														
Среднее за 1935—1955 гг.	8,28	8,32	8,46	8,55	8,59	(8,50)	8,44	8,27	8,33	8,44	—	8,46	(8,40)	8,37
1961	8,30	8,14	—	8,40	—	8,32	—	8,40	8,28	—	8,41	—	8,49	—
1962	8,29	—	8,27	8,25	—	—	8,39	8,32	—	8,29	8,29	—	—	8,42
1963	8,31	—	8,29	8,38	—	—	8,35	8,25	—	—	8,46	—	—	8,45
Среднее за 1961—1963 гг.	8,30	8,14	8,28	8,34	—	8,32	8,37	8,32	8,28	8,29	8,39	—	8,49	8,43

0,20, в мелководной зоне западного и восточного районов 0,10.

Сезонный ход кислорода и pH в придонном слое моря в основном совпадает с их режимом в поверхностных горизонтах.

Однако в западном районе в летнее время, как правило, отмечаются довольно значительные колебания средних величин кислорода у дна по сравнению с поверхностным слоем (табл. 28). В глубоководной части моря это происходит благодаря особенностям рельефа дна и гидрологических условий.

Таблица 28

Величины O_2 % в июле у дна и на поверхности в западном районе
Северного Каспия

Горизонт	Глубоководная зона			Мелководная зона	
	1961 г.	1962 г.	1963 г.	1962 г.	1963 г.
Поверхность	95,1	94,0	95,0	90,5	97,7
Дно	98,9	78,1	79,0	79,5	85,3

В юго-западном районе нередко отмечается резкая стратификация вод по солености и, как результат, по кислороду. Понижение кислорода в мелководной зоне западного района у дна в летнее время по сравнению с поверхностным слоем воды объясняется, по-видимому, тем, что здесь имеют место интенсивные окислительные процессы.

Сезонные изменения кислорода и pH в водах различной солености. Максимальное абсолютное содержание кислорода во все периоды года отмечается в пресных речных водах (табл. 29). С увеличением солености оно снижается в апреле с 12 мл/л в речных водах до 7,7 мл/л в морских и осенью с 7,3 до 6,3 мл/л соответственно. Напротив, с ростом солености относительное содержание кислорода повышается. Речные воды несколько недосыщены кислородом. Промежуточные воды и воды с высокой соленостью чуть пересыщены. Максимальное пересыщение, достигающее 132%, обнаружено в районе водообмена, в зоне с соленостью 2—10‰, наименьшее относительное содержание его в речной воде (88%). В течение года максимальное содержание кислорода независимо от солености отмечается весной.

В июне с повышением температуры абсолютное содержание кислорода в Северном Каспии резко снижается, особенно в зоне смешанных вод (по сравнению с абсолютным содержанием кислорода в апреле примерно на 2 мл). Абсолютное содержание кислорода в реке в этот период также снижается до 9,4 мл/л, однако оно остается наиболее высоким по сравнению с содержанием в водах моря. Насыщение воды кислородом в реке и в море

Распределение кислорода и рН в водах Северного Каспия различной солености, 1961—1963 гг.

Месяц	Речные воды			Соленость водной массы, ‰								
				0,1—2			2—10			10—12		
	Распределение кислорода и pH											
сред- нее	макс.	мин.	сред- нее	макс.	мин.	сред- нее	макс.	мин.	сред- нее	макс.	мин.	
O ₂ мл/л												
IV	12,00	12,65	11,36	7,54	8,00	7,24	7,80	8,10	6,66	7,66	8,28	6,84
VI	9,41	10,08	8,55	6,18	7,62	5,05	5,85	6,94	5,56	6,29	6,99	5,44
VII	8,55	9,34	8,00	5,48	6,16	4,89	5,43	7,16	4,95	5,39	5,92	5,03
X	7,29	—	—	6,73	—	—	6,81	7,54	6,06	6,26	7,05	—
O ₂ %												
IV	94	99	88	97,9	100,6	95,0	102,7	132,0	97,1	101,1	106	97,4
VI	97	105	89	94,2	107,6	77,2	99,4	117	88,5	99,7	127,0	92,7
VII	95	103	90	95,2	103,8	89,5	93,8	101,9	87,1	95,1	104,1	87,2
X	63	—	—	96,3	97,0	95,1	99,5	112,4	88,6	99,4	115,6	87,7
pH												
IV	7,73	7,85	7,60	8,38	8,47	8,29	8,33	8,37	8,30	8,25	8,27	8,23
VI	7,80	8,02	7,66	8,50	8,55	8,46	8,27	8,32	8,24	8,25	8,29	8,20
VII	7,96	8,33	7,62	8,48	8,57	8,33	8,36	8,44	8,24	8,33	8,41	8,23
X	7,19	—	—	8,21	—	—	8,38	8,43	8,34	8,34	8,40	8,31

остается почти неизменным. Наибольшее пересыщение воды кислородом наблюдается в этот период в западном районе, в зоне с соленостью 10—12‰, где оно достигает в некоторых случаях 127%; минимальное относительное содержание его отмечается в зоне с соленостью 0—2‰ и составляет 77%, что связано с усилением окислительных процессов и с особенностями гидрологического режима этих вод.

В речной воде к лету величина рН незначительно повышается (в пределах 0,1). В водах более высокой солености значение рН почти не меняется по сравнению с весной. Повышение рН в Северном Каспии в июне оказывается характерным в основном только для зоны вод с соленостью от 0 до 2‰. Это можно объяснить усилившимся процессом фотосинтеза в предустьевом пространстве моря. Вместе с тем величины рН во всем море в июле увеличиваются и по-прежнему наиболее высокими они остаются в зоне с соленостью 0—2‰. Это объясняется тем, что в июле сказывается наибольшее влияние волжских вод на Северный Каспий, в особенности на западный район, и поэтому

интенсивность фотосинтетических процессов в этот период также наиболее высока. Насыщение воды кислородом остается в реке на прежнем уровне, в ряде случаев наблюдается незначительное пересыщение. В июле насыщение воды кислородом падает в зоне смешанных вод.

В осеннее время обнаруживается повышение абсолютного содержания кислорода как в море, так и в речной воде, что связано с понижением температуры и ослаблением процессов фотосинтеза. Значительное падение рН осенью обнаруживается в зоне с соленостью 0—2‰ и в реке, а в зоне смешения вод рН почти не меняется по сравнению с летом. Насыщение воды кислородом в реке снижается до 90%. Исключительный случай представляет октябрь 1961 г., когда абсолютное содержание кислорода в реке снизилось до 7,3 мл/л, насыщение воды кислородом до 63%, а рН до 7,2.

Предел колебаний абсолютного содержания кислорода в течение года довольно велик для всего моря. Он колеблется от 2 до 2,5 мл/л, но наибольшая его величина характерна для зоны смешанных вод. В речной воде амплитуда колебания в течение года достигает 4 мл/л. Насыщение кислородом в это время в море меняется незначительно (максимальная его амплитуда характерна для зоны смешанных вод и составляет 10%).

В западном и восточном районах, а также в зоне водообмена между ними сезонный ход элементов газового режима остается таким же, как и для всего моря в целом (табл. 30). Однако средние величины рН, абсолютного и относительного содержания кислорода в водах с соленостью 2—10‰ довольно сильно отличаются друг от друга в каждом из указанных выше районов.

В связи с этим представляет интерес изучение особенностей газового режима в западном и восточном районах и в зоне водообмена между ними. Основное пространство в поверхностных слоях восточного и западного районов, как правило, занято водами с соленостью от 2 до 10‰, т. е. смешанными водами. В апреле наиболее высокое абсолютное содержание кислорода наблюдается в восточном, наиболее низкое — в западном районе, а абсолютное содержание кислорода в районе водообмена с соленостью 2—10‰ близко к значениям кислорода в восточном районе (табл. 30). В июне все три района моря обнаруживают однородное распределение абсолютного содержания кислорода в зоне смешения вод с отклонениями не более 0,06 мл/л. В июле в западном районе по сравнению с восточным районом и районом водообмена абсолютное содержание кислорода более высокое (разность составляет 0,5 мл/л). Осенью абсолютное содержание кислорода продолжает оставаться наиболее высоким в западном районе, хотя разность в абсолютном содержании кислорода по районам уменьшается до 0,2 мл/л.

Распределение кислорода и рН в различных районах Северного Каспия в зоне с соленостью 2—10‰ по сезонам, 1961—1963 гг.

Месяц	Западный район			Восточный район			Район водообмена		
	среднее	макс.	мин.	среднее	макс.	мин.	среднее	макс.	мин.
O ₂ мл/л									
IV	101,5	105,0	96,1	102,2	110,0	95,0	103,2	132	97,3
VI	99,1	117,2	88,5	99,9	111,0	91,1	98,9	101,8	94,4
VII	93,0	101,9	82,7	93,6	100,3	87,1	93,2	99,4	87,0
X	104,4	112,0	96,0	98,2	111,7	86,1	97,5	109,7	89,6
O ₂ %									
IV	7,50	8,12	7,02	7,88	9,09	6,66	7,71	7,55	7,26
VI	6,08	6,80	5,56	6,14	6,94	5,52	6,11	6,40	5,52
VII	5,81	7,16	5,17	5,35	5,81	4,95	5,35	5,64	5,02
X	6,98	7,54	6,45	6,76	7,43	6,06	6,76	7,48	6,20
рН									
IV	8,29	8,35	8,19	8,27	8,40	8,24	8,31	8,39	8,22
VI	8,30	8,33	8,27	8,29	8,38	8,23	8,39	8,47	8,29
VII	8,39	8,50	8,32	8,38	8,47	8,29	8,34	8,42	8,24
X	8,37	8,44	8,27	8,42	8,45	8,40	8,39	8,44	8,29

Максимальная годовая амплитуда изменений в абсолютном содержании кислорода в промежуточной по солености зоне наблюдается в восточном районе и за 1961—1963 гг. составила 2,53 мл/л, минимальная — в западном (примерно 1,69 мл/л). В районе водообмена максимальная годовая амплитуда составляла 2,36 мл/л. Максимальная годовая амплитуда изменений абсолютного содержания кислорода в западном районе наблюдалась в зоне вод с соленостью 10—12‰ и равнялась 2,31 мл/л, что превышало амплитуду колебаний абсолютного содержания кислорода в зоне этих же вод в районе водообмена. В районе водообмена, в западном и восточном районах сезонный ход относительного содержания кислорода в зоне с соленостью 2—10‰ был одинаковым и годовая амплитуда насыщения воды кислородом в среднем равнялась 10% по всему морю. Величина активной реакции рН оказалась также более или менее однородной для всех районов моря.

Вертикальное распределение кислорода и рН

Образование вертикальной стратификации вод по содержанию кислорода и рН в мелководных районах определяется рядом условий: интенсивностью вертикального перемешивания,

обусловленной ветровым режимом или, наоборот, устойчивостью слоев воды, различным проявлением процессов фотосинтеза по глубине, рельефом дна, влияющим на условия перемешивания, и др.

В мелководных районах Северного Каспия в различные сезоны года наблюдается однородное распределение кислорода и рН по глубине. В восточном районе, как правило, вертикальная стратификация элементов газового режима не наблюдается. Так, максимальные колебания относительного содержания кислорода по вертикали в районе Уральской бороздины не превышали 10%. В районе водообмена между восточным и западным районами вертикальная стратификация рН и кислорода наблюдается крайне редко и эти непродолжительные изменения элементов газового режима по вертикали связаны с наличием противотечений, иногда имеющим место в данном районе. Правда, под воздействием ветров благодаря мелководности района вертикальная стратификация рН и кислорода довольно быстро исчезает.

В районе свала глубин и на юго-западе летом отмечается резкое изменение кислорода и рН с глубиной. Весной изменение по вертикали относительного содержания кислорода в районе свала глубин не превышает 10%.

Как правило, на западе вертикальное распределение кислорода и рН согласуется между собой. Так, в районе свала глубин на станции 25 уменьшение относительного содержания кислорода начинается на глубине 13 м и далее падает ко дну до 74% (табл. 31). Одновременно с уменьшением кислорода

Таблица 31

Вертикальное распределение кислорода (%) и некоторых гидрометеорологических элементов. Июль 1962 г.

Станция	Горизонт, м	Кислород	Направление ветра	Скорость ветра, м/сек.	Направление течения, град.	Скорость течения, см/сек.
22	0,5	92,9	СВ	6,6	257	14
	5,0	92,9			317	12
	10,0	78,5			117	5
23	0,5	92,7	ССВ	8,0	315	20
	5,0	98,6			319	16
	7,5	92,4			—	—
	11,0	81,4			140	7
25	0,5	94	СВ	5,5	—	—
	10,0	95			147	5
	13,0	90			—	—
	15,0	81			—	—
	19,5	74			57	4

в придонных горизонтах наблюдается и падение рН на 0,2 по сравнению с рН поверхностного слоя.

В юго-западном районе моря в июле наблюдается резкая вертикальная стратификация кислорода (рис. 22 а) и рН (рис. 22 б). Такое распределение элементов газового режима в данном случае тесно связано прежде всего с характером рельефа дна, образующего здесь некоторое углубление, которое

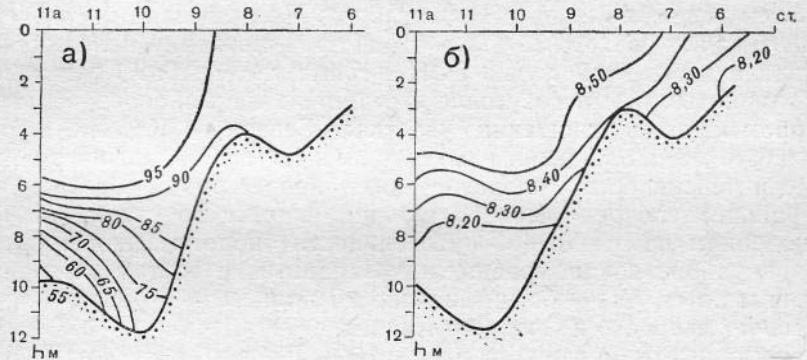
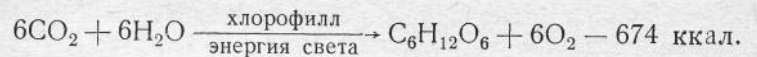


Рис. 22. Изменение элементов газового режима по вертикали в июле на дополнительном разрезе III.
а — кислород, б — рН.

затрудняет обмен. В момент наблюдения в данном районе были зарегистрированы крайне малые скорости течений. Резкое уменьшение кислорода и рН ко дну указывает на образование застойной зоны, где происходит накопление биогенных веществ и падение кислорода и рН.

Кислород и рН как показатели фотосинтетических процессов в море

Фитопланктон в море совершает гигантскую работу по аккумулярованию солнечной энергии путем преобразования ее в энергию химическую. Общий результат процесса фотосинтеза изображается следующим образом:



В процессе фотосинтеза зеленые растения потребляют двуокись углерода и воду при воздействии солнечного света, образуя при этом кислород и углеводы. Е. Рабинович (1953) считает, что шесть факторов, приведенных в уравнении, могут быть использованы для количественного исследования фотосинтеза. При этом необходимо учитывать, что интенсивность фотосинтеза

может зависеть от нескольких факторов одновременно. В то время как один фактор постепенно теряет свое значение, влияние другого фактора начинает возрастать.

В данной работе для количественного исследования фотосинтеза используются суточные колебания кислорода и рН. Известно, что в море изменения рН и кислорода происходят под воздействием различных факторов — физических, химических и биологических. Была сделана попытка учесть биологический фактор воздействия на рН и кислород. При решении поставленной задачи необходимо было отработать методику полевых исследований. С этой целью ГОИН совместно с АГМО организовал работы на многосуточных станциях на наиболее важных в промысловом отношении участках Северного Каспия. В результате по наблюдениям на станциях III и XIV можно судить об интенсивности биологических процессов, протекающих в районе непосредственного влияния волжского стока, по наблюдениям на ст. V — об интенсивности биологических процессов в районе водообмена между западным и восточным районами и по ст. VII — об интенсивности процессов в районе водообмена Северного и Среднего Каспия.

Суточные изменения в воде рН и кислорода являются показателем фотосинтетических процессов. Изучение обусловленного фотосинтезом суточного хода кислорода и рН в море является довольно сложным вследствие движения водных масс. Суточный ход кислорода и рН обнаруживается почти на всех многосуточных станциях Северного Каспия и, как правило, во все сезоны года. Величины суточных колебаний рН и кислорода изменчивы во времени. Наблюдения над кратковременными изменениями рН и кислорода проводились в апреле (предпаводочный период), мае (начало паводка), июле (период наибольшего влияния волжского стока на Северный Каспий) и сентябре—октябре (надвигание соленых вод Среднего Каспия на Северный Каспий). Максимальные амплитуды изменения кислорода и рН в течение суток в различные сезоны года иллюстрируются данными табл. 32.

В разные сезоны года на ст. VII, расположенной в районе наиболее высоких титров фитопланктона (Усачев, 1948), обнаруживаются и наибольшие колебания рН и кислорода.

При сравнении районов средних биомасс фитопланктона в июне и апреле 1961 г. оказалось, что районам наибольших титров фитопланктона, как правило, соответствуют районы максимальных суточных колебаний рН и кислорода (табл. 33). Это подтверждает положение о том, что в море величины суточных колебаний рН и кислорода в основном зависят от биохимического фактора (фотосинтез и разложение).

Для сравнения взяты данные диатомового фитопланктона, так как некоторые исследователи отмечают, что диатомовый

Таблица 32

Максимальные суточные изменения кислорода и рН на поверхности в различных районах Северного Каспия в разные сезоны 1961 г.

Станция	Апрель	Май—июнь	Июль	Сентябрь
О ₂ мл/л				
III6	0,5	0,6	1,30	0,7
XIV	0,5	0,6	0,7	0,7
V	0,5	0,4	0,6	0,2
VII	0,7	1,40	1,20	0,7
рН				
III6	0,10	0,05	0,13	0,15
XIV	0,13	0,10	0,17	0,10
V	0,18	0,10	0,09	0,03
VII	0,20	0,55	0,25	0,03

Таблица 33

Максимальные колебания кислорода, рН и средней биомассы диатомового фитопланктона в различных районах Северного Каспия (по данным отчета КаспНИРО за 1961 г.)

	Июнь		Апрель	
	центральное мелководье (станции III, V)	юго-западный район (ст. VII)	центральное мелководье (станции III, V)	юго-западный район (ст. VII)
Средняя биомасса диатомового фитопланктона, мг/м ³	314,9	663,2	260	419
Максимальные колебания кислорода	0,6	1,40	0,50	0,70
Максимальные колебания рН	0,10	0,55	0,10—0,18	0,20

фитопланктон обладает наиболее высокой способностью к фотосинтезу (Пырина, 1961) и в Северном Каспии диатомовый фитопланктон преобладает над другими формами. В районах наибольшего развития фитопланктона протекают сложные биохимические процессы синтеза и разложения органического вещества. Это вызывает резкие изменения величин кислорода и рН, особенно последних. Так, в июле 1959 г., по данным Б. М. Затучной (1964), на ст. V колебания рН составляли не более 0,1 при среднем содержании фитопланктона 4876 клеток/литр, на

ст. VII — около 0,4 при среднем содержании клеток фитопланктона 117 069 клеток/литр. Это хорошо согласуется с выводами Винецкой (1957) относительно того, что особенно велики суточные колебания на юго-западном участке в июле—августе. Правда, выводы Винецкой относятся к периоду до зарегулирования стока Волги. При сравнении данных, полученных автором в 1961 г., с данными Винецкой (1957) необходимо отметить следующие два обстоятельства.

1. В период до зарегулирования в районе непосредственного влияния стока Волги и на свале глубин наблюдались гораздо большие амплитуды суточных колебаний кислорода в течение года по сравнению с периодом после зарегулирования. Так, амплитуда суточных колебаний в течение года составляла на ст. XIV 0,78, на ст. VII 1,16 мл/л (1955 г.). Амплитуда суточных колебаний кислорода в течение года после зарегулирования значительно упала (на ст. XIV на 0,2 мл/л, на ст. VII на 0,7 мл/л).

2. Средние годовые значения суточных колебаний кислорода не изменились в течение года после зарегулирования. Однако произошло некоторое перераспределение этих колебаний по сезонам.

Исключение составляет ст. V (район водообмена западного и восточного районов моря), где средняя годовая амплитуда суточных колебаний кислорода по сравнению с аналогичной амплитудой в период до зарегулирования уменьшилась почти в два раза (табл. 34).

Таблица 34

Средние годовые значения амплитуды суточных колебаний кислорода в 1955 и 1961 гг. (мл/л)

Станция	По данным Винецкой, 1955 г.	По данным автора, 1961 г.
XIV	0,55	0,55
III6	0,88	0,77
VII	0,96	1,00
V	0,83	0,42

Остановимся подробнее на суточном ходе элементов газового режима в наиболее важных районах Северного Каспия. Так, в южной части водообмена между западным и восточным районами моря (ст. V) изменения рН и кислорода в апреле 1961 г. обнаруживают суточный ход фотосинтеза с максимальными значениями рН и кислорода в 18 часов и минимальными — в ночные часы. Величины кислорода и рН в дневное время суток, как правило, испытывают некоторое уменьшение. Это отмечалось и раньше Ивановым (1948). На этом явлении подробно останавливается Рабинович (1953), классифицируя его как

«временное падение образования органического вещества в середине дня» или как «полуденную депрессию».

Измерения газового обмена Костычевым и его сотрудниками, проведенные в весьма разных климатических условиях как с водорослями, так и с наземными растениями, показали, что явление «полуденной депрессии» широко распространено в растительном мире».

В июне наблюдается повсеместное усиление интенсивности фотосинтетических процессов и суточные колебания кислорода и рН проявляются более отчетливо, чем в апреле. В районе предустьевого взморья Волги (станции IIIб и XIV) кратковременные изменения рН и кислорода у дна, как правило, соответствуют кратковременным изменениям рН и кислорода на поверхности, и фотосинтез протекает во всей водной толще. Данные табл. 35 показывают максимальные и минимальные величины кислорода и рН в этом районе в июне 1962 г.

Таблица 35

Максимальные и минимальные величины рН и кислорода в течение суток на ст. IIIб в июне 1962 г.

Дата	Время, часы	Горизонт	рН	O ₂ мл/л	S ‰	t°	Направление ветра	Скорость ветра, м/сек.
3 VI	16	Поверхность	8,52	6,00	0,23	25,4	ВСВ	6,3
		Дно	8,57	5,80	0,22	25,38		
4 VI	4	Поверхность	8,51	5,10	0,22	25,7	С	5,7
		Дно	8,52	5,00	0,22	25,5		
	16	Поверхность	8,56	5,70	0,23	26,6	С	1,2
		Дно	8,56	5,70	0,24	26,1		
5 VI	4	Поверхность	8,51	5,20	0,23	25,9	ВСВ	6,1
		Дно	8,56	5,40	0,24	25,71		
	16	Поверхность	8,56	5,60	0,23	27,3	Штиль	
		Дно	8,50	5,60	0,22	26,0		
6 VI	4	Поверхность	8,52	5,00	0,23	25,9	З	7,9
		Дно	—	4,90	0,23	25,87		
	16	Поверхность	8,56	5,40	0,23	26,3	ЗЮЗ	11,0
		Дно	8,57	5,40	0,25	26,13		
7 VI	4	Поверхность	8,37	5,00	0,25	25,4	ЗЮЗ	9,0
		Дно	8,37	5,00	0,25	25,23		

Наиболее интенсивно фотосинтетические процессы протекают в Северном Каспии в июле, т. е. в то время, когда сильнее всего сказывается влияние паводочных вод на море. Так, в районе непосредственного влияния волжского стока (ст. IIIб) в июле отмечается закономерный и наиболее отчетливый суточный ход кислорода и рН (рис. 23). Максимум рН и кислорода наблюдается в 16 часов, минимум — в 4 часа. Фотосинтез охватил здесь всю толщу воды. В момент наблюдения на станциях IIIб

и XIV были отмечены довольно стабильные значения солености и температуры, гидрометеорологическая обстановка была относительно постоянной, а рН и кислород изменялись в результате процессов фотосинтеза.

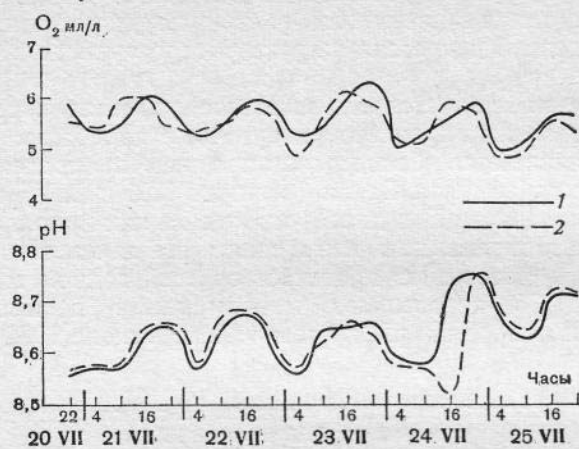


Рис. 23. Суточный ход кислорода и рН в июле на ст. III6.

1 — поверхность, 2 — дно.

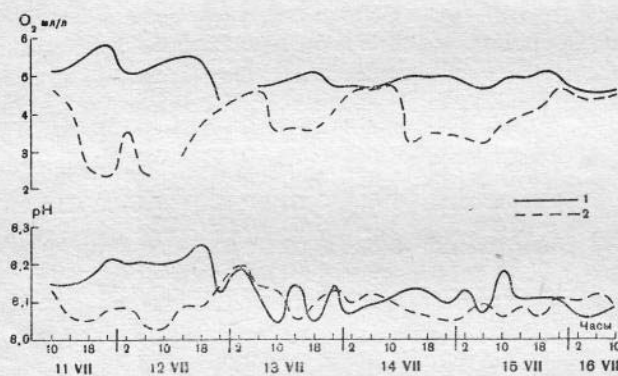


Рис. 24. Суточный ход кислорода и рН в июле на ст. VII.

1 — поверхность, 2 — дно.

Представляет большой интерес изучение суточного хода рН и кислорода в июле в районе свала глубин (рис. 24). Наличие противотечений в поверхностном и придонном слоях обусловило резкую вертикальную стратификацию воды по солености, температуре, рН и особенно кислороду. Вместе с тем во всей толще,

особенно в поверхностном слое воды, элементы газового режима испытывали огромное влияние жизнедеятельности водных организмов. Так, максимальное увеличение рН и кислорода на ст. VII наблюдалось, как правило, в 18 часов, иногда со сдвигом на более ранние часы, а минимальные значения рН и кислорода были отмечены в 22 часа.

Соотношения между значениями рН и кислорода

В работе Симонова (1965) проанализированы основные факторы, влияющие на формирование режима кислорода в устьевых районах: продуцирование кислорода в процессе фотосинтеза, потребление его на дыхание, переход кислорода из поверхностного слоя воды в атмосферу и наоборот под влиянием изменения давления, изменение растворимости кислорода в воде с изменением температурных условий среды и солености. Симонов указывает на то, что «в световой зоне имеет место связь $[O_2] = f[rH]$ и что режим кислорода определяется режимом активной реакции рН при прочих равных условиях». Для подтверждения этой зависимости он использовал материал многосуточных наблюдений на устьевом взморье Кубани за 1960—1962 гг. Подобная работа проведена по материалам, собранным на многосуточных станциях в Северном Каспии.

Связи между рН и кислородом строились отдельно по срокам наблюдений и отдельно для различных сезонов года (апреля, июня, июля и сентября). Затем для каждого сезона года полученные связи между рН и кислородом за разные сроки наблюдения сведены в один график (рис. 25). При построении связей сделаны допущения: а) принимался неизменяющимся режим температуры, давления и солености в течение всего периода наблюдений на каждой из многосуточных станций Северного Каспия; б) предполагался одновременным процесс поглощения углекислоты и выделения кислорода.

Дискретность связей рН и кислорода по срокам наблюдений объясняется тем, что каждая линия связи (каждый срок наблюдения) характеризуется определенными условиями температуры и давления.

Построенные графики дают возможность судить об интенсивности фотосинтеза в разные периоды времени суток и в различные сезоны и выявить сроки кислородного максимума и минимума.

Для того, чтобы перейти от одной связи между кислородом и рН к другой, построены дополнительные графики связи между значениями рН (или кислорода), определенными в различные сроки. Например, связи между $rH_{18 \text{ час}}$ и $rH_{10 \text{ час}}$, $rH_{18 \text{ час}}$ и $rH_{14 \text{ час}}$, $rH_{18 \text{ час}}$ и $rH_{22 \text{ час}}$. Кривые ABC , $A_1B_1C_1$, $A_2B_2C_2$ и т. д. дают возможность заранее судить о суточном ходе кислорода и рН.

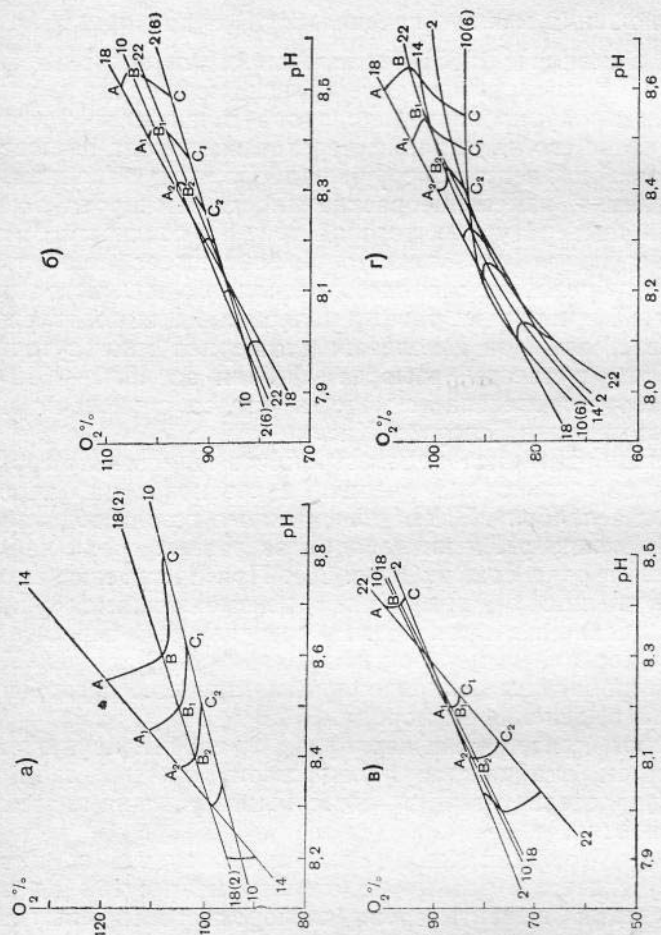


Рис. 25. Почасовые связи кислорода и pH в Северном Каспии в различные сезоны на поверхности.
а — апрель, б — июнь, в — июль (дно), г — июль.

Влияние физических факторов на изменение содержания кислорода в поверхностном слое

На растворимость кислорода в морской воде влияют в основном температура, соленость и давление. Известно, что с повышением температуры и солености растворимость кислорода в воде падает. В прибрежных районах в течение коротких промежутков времени температура воды, особенно в поверхностном слое, может меняться в пределах нескольких градусов. Изменение температуры на 1° вызывает изменение в содержании кислорода в воде более чем на 0,1 мл/л. Изменение солености на 1‰ вызывает повышение или понижение растворимости кислорода в среднем на 0,05 мл/л.

Наблюдения, проводившиеся в лаборатории Симоновым, показывают, что изменению атмосферного давления на 1 мм рт. ст. соответствует изменение абсолютного содержания кислорода примерно на 0,1 мл/л. Для определения влияния давления на суточный ход кислорода в поверхностных водах Северного Каспия из большого ряда наблюдений выбраны данные тех многосуточных станций, на которых изменение давления было наиболее существенным, а влияние фотосинтетических процессов невелико (апрель, сентябрь).

Все отобранные данные по абсолютному содержанию кислорода в поверхностном слое приведены с помощью океанологических таблиц к определенной температуре и солености. Затем была получена связь между абсолютным содержанием кислорода поверхностного слоя и изменением в этот же срок атмосферного давления. Связи оказались линейными. Затем по этим связям рассчитывались изменения содержания кислорода в мл/л при изменении давления на 1 мб в различные сроки наблюдений и выводилась средняя за весь период наблюдений величина изменения содержания кислорода в мл/л при изменении давления на 1 мб ($\Delta O_2 p$). За равновесную точку, при которой кислород поверхностного слоя воды находится в равновесии с атмосферой, принималось наименьшее давление p_0 , наблюдавшееся в течение определенного отрезка времени. Затем величина $\Delta O_2 p$ умножалась на величину $p_0 - p_{\text{набл.}}$.

Так, в сентябре на ст. XIV (рис. 26) изменения кислорода в связи с изменением давления на 1 мб в различные сроки наблюдений различны. Эти изменения составляют в 10 часов 0,02 мл/л, в 14 и 16 часов 0,03 мл/л, в 18 часов 0,07 мл/л, в 22 и 2 часа — 0,01 мл/л. Средняя величина этих изменений кислорода ($\Delta O_2 p$) равна 0,03 мл/л. Все данные по кислороду на этой станции были приведены к температуре 16° и солености 0,5‰.

Условно принимаем за p_0 давление, которое наблюдалось 20/IX в 6—14 часов. Таким образом, начиная с 10 часов 19/IX до 6 часов 20/IX наблюдалось уменьшение кислорода за счет

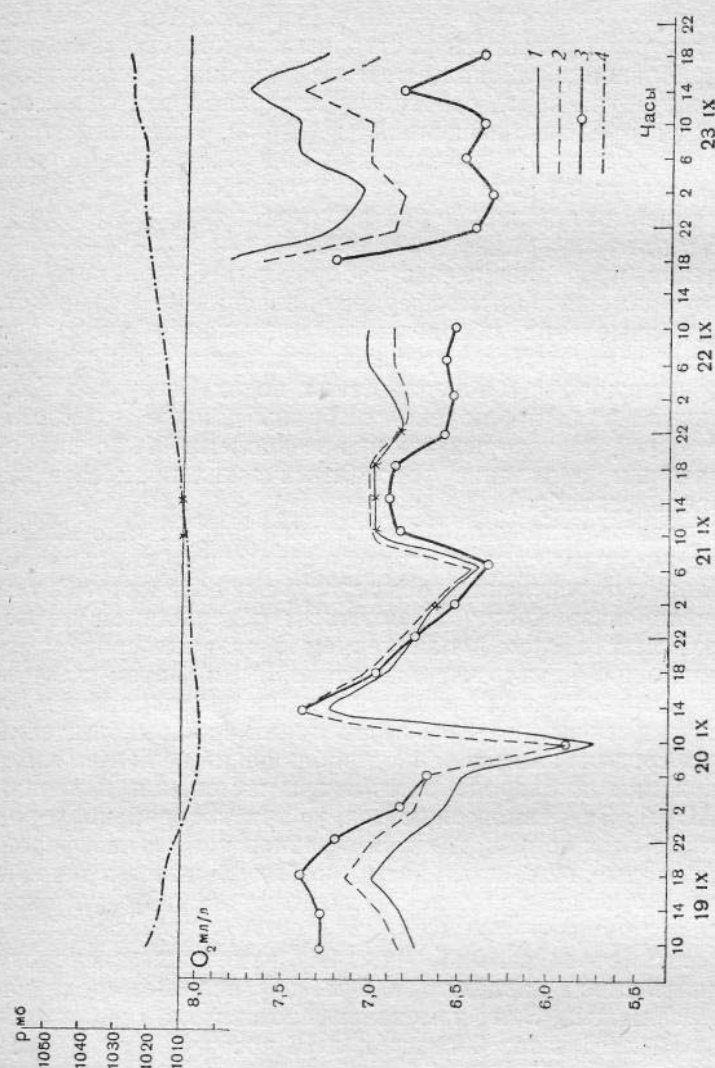


Рис. 26. Изменение абсолютного содержания кислорода в поверхностном слое на ст. XIV под влиянием различных физических факторов.
 1 — кислород наблюдаемый, 2 — кислород, приведенный к $t=16^\circ$ и $S^0_{\infty}=0.5$, 3 — кислород, приведенный к одному давлению, 4 — суточный ход давления.