

## АНТРОПОГЕННОЕ ЭВТРОФИРОВАНИЕ И КИСЛОРОДНЫЙ РЕЖИМ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

М.А.Салманов

*Институт Микробиологии НАНА  
AZ1073, Баку, Патамдартское шоссе, 40*

В результате проведенных многолетних исследований по определению первичной продукции и деструкции органического вещества в воде и грунтах Каспийского моря за последние 50 лет установлено, что в нем прогрессируют процессы антропогенного эвтрофирования и биологического потребления кислорода. Причиной указанных изменений в основном является обогащение моря аллохтонными веществами антропогенного происхождения. Будучи локальными в 60-х гг. прошлого века, очаги массового развития альгофлоры и бактериопланктона в акваториях смешивания речных вод главных рукавов Волги с морской, спустя 18-20 лет стали распространены по всему западному шельфу моря. В настоящее время антропогенное эвтрофирование устойчиво установлено и в центральных водах Среднего-Южного Каспия, и на восточном шельфе. Обогащение водной массы и донных отложений легкодоступными органическими веществами приводит к усилению его биологического распада, что в результате способствует формированию гипоксии в водной массе глубоководных зон Каспия.

Антропогенный прессинг на экосистему водоемов вызывает многопрофильный процесс: в одних случаях подавляет развитие фауны-флоры, в других, вызывая сукцессии, он способствует бурному развитию как простейших автотрофов, так и гетеротрофов и т.д. В любом своем проявлении он изменяет стабильность функционирования экосистемы водоема.

Участь антропогенного эвтрофирования не миновала и Каспийское море. Несмотря на то, что Каспийское море является одним из сильно и давно подверженных многопрофильным антропогенным воздействиям бассейнов, антропогенному эвтрофированию в нем и связанным с ним вопросам до сих пор не уделено должного внимания.

Эвтрофирование водоема прежде всего вызывается биогенными элементами и органическим веществом нестойкого характера. Также в результате биодеградации любого поллютанта в Каспии водные массы и донные отложения обогащаются продуктами метаболизма и в дальнейшем тоже вовлекаются в общий круговорот веществ в нем.

Основными источниками поступления в Каспий биогенных элементов и первым долгом органического вещества бытового и сельскохозяйственного происхождения являются реки и города, населенные пункты. Отклик гидроекосистем моря на эти нагрузки разли-

чен и зависит от ряда естественных и приобретенных в ходе антропогенного воздействия характеристик Каспия: состава растворенного органического вещества, минерализации, циркуляции, течения воды, глубины участка, термического режима и т.д. Многолетние исследования показали, что антропогенное изменение биогенной нагрузки так или иначе сказывается на изменении структуры экосистемы моря: повышается уровень биопродуктивности, меняется видовой состав биологических сообществ, нарушается устойчивость трофических связей, изменяются физические и химические свойства воды. Так или иначе антропогенное эвтрофирование Каспийского моря способствует повышению уровня его трофики, т.е. повышению скорости новообразования органического вещества. Этот процесс в Каспийском море не сбалансирован. Известно, что в естественных сбалансированных экосистемах поддерживается равновесие между образованием и распадом органического вещества, между выделением и потреблением кислорода. Нарушение этого равновесия на некоторых эвтрофированных участках Каспийского моря привело к биолого-химическим изменениям. Такие изменения характерны для акваторий речных эстуарьев, зон поступления стационарных сточных вод, где из-за чрезмерного обогащения воды легкодос-

тупным органическим веществом аллохтонного и автохтонного происхождения скорость дыхания превышает скорость обогащения воды кислородом. Это особенно заметно на нижних горизонтах вод глубоководных участков всех трех частей Каспия (Салманов, 1999).

Следует отметить, что антропогенное эвтрофирование Каспийского моря в значительно большем масштабе началось на северо-западном и северо-восточном участках Северного Каспия в первой половине 60-х гг. прошлого века (Салманов, 1968, 1987). До этого в какой-то мере процесс антропогенного эвтрофирования Северного Каспия сдерживался в связи с уменьшением объема взвешенного вещества, минерального азота-фосфора в море в результате строительства каскада водохранилищ на Волге и других крупных реках, что было показано Л.А.Барсуковой (1971). Характерно, что в 70-ые годы в районах акваторий Белинского, Волго-Каспийского судоходного каналов, Аграхан-Кизлярского залива, Махачкалинского взморья, западной части Северного Каспия эвтрофирование носило локальный характер и возникало в основном летом. Вдоль западного шельфа очаги цветения отмечались лишь на ограниченных участках к юго-востоку от Абшеронского полуострова, мелководьях островов Бакинского архипелага и в прикуринском районе Южного Каспия (Салманов, 1975, 1981, 1987). Примечательно, что в 1983 году в результате продолжения процесса эвтрофирования указанные выше «очаги» слились в единое целое и на всем протяжении западного

шельфа от р. Волги до Астары цветение стало устойчивым, а к началу 90-х гг., расширяясь в широтном направлении, достигло середины глубоководного Южного Каспия.

На восточном шельфе Каспийского моря локальные очаги цветения фитопланктона отмечались лишь в начале 90-х гг. в районах о-ва Кулалы, юго-восточной части р. Урал, в мелководьях мм. Песчаный, Сагындык, у г. Актау, Бекташ. В восточной части Южного Каспия усиленное, причем почти в течение года, развитие фитопланктона отмечалось в районах п-ва Челекен, Туркменского, Красноводского заливов и до 200 м изобат разрезов Гасан-Кули, Огурчинск, Ульский и Окарем.

Как отмечено выше, первоначальное антропогенное эвтрофирование было отмечено в Северном Каспии, вызываемое в основном стоком р. Волги, обогащенным биогенными элементами и органическим веществом (табл. 1). Хотя нельзя не учитывать и роли других рек – Терека, Сулака и Урала в процессах антропогенного эвтрофирования в акваториях контакта речных вод с морской. Как видно из табл. 1, за 20 лет в стоке р. Волги сумма фосфатов, азота и органического вещества увеличена в среднем в 3 раза. Только разница в азоте-фосфоре за этот период составляет 389 тыс. т. Если исходить из известной зависимости, что 1 кг фосфора и азота в условиях Каспия потенциально может способствовать образованию более 1000 кг биомассы бактериопланктона, то не трудно представить себе масштабы и интенсивность антропогенного эвтрофирования в нем.

Таблица 1

Многолетние изменения стока биогенных элементов и органического вещества р. Волги (Катунин, др., 1992; Зенин, 1965)

Годы	Фосфор, тыс. т		Азот, тыс. т		Кремнекислота, тыс. т	Органическое вещество, млн. т
	минеральный	органический	минеральный	Органический		
1960-1970	1,6	14,3	60,3	140,4	430,0	2,9
1970-1975	2,8	24,0	91,8	286,0	534,0	3,4
1976-1980	5,6	61,5	68,7	276,0	443,0	3,9
1981-1985	7,3	40,8	138,0	367,0	384,0	6,4
1986-1990	14,1	28,4	182,0	380,4	467,0	6,3

Эвтрофирование Северного Каспия интенсифицируется из года в год, способствуя биолого-биохимическому расходу кислорода воды. Так, за летний сезон 1971-1983 гг. первичная продукция возросла на 7 млн. т, а величина деструкции органического вещества в грунтах – на 2,6 млн. т.

Установлено, что при эвтрофировании вследствие накопления легкоминерализуемых органических веществ увеличивается численность биодеструкторов и в результате резко нарушается стабильность экосистемы моря. Также при этом водная масса и донные отложения обогащаются метаболитами водорослей и продуктами промежуточного распада субстратов – микроорганизмами. На начальном этапе эвтрофирования процессы фотосинтеза преобладают над деструкцией органического вещества, т.е. валовая первичная продукция в акваториях антропогенного эвтрофирования в море сначала становится больше единицы, а после – в результате накопления биомассы продуцентов, наоборот, преобладают процессы деструкции. Таким образом, увеличение потребления кислорода аэробными гетеротрофами приводит к его дефициту. Более того, в условиях гипоксии происходит дополнительный расход кислорода воды, т.к. в присутствии продуктов распада усиливаются окислительно-восстановительные процессы.

Наблюдения, повторно проведенные в летне-осенний период 1988 г., показали, что в акваториях Северного Каспия, где отмечается цветение фитопланктона, дефицит кислорода в придонных слоях воды сохраняется с июня до первой половины октября. На опасность расширения масштаба гипоксии в придонных слоях воды в период летней стагнации и углубления процесса указывают также Д.Н.Катунин и др. (1992). По их же данным среднее значение площадей гипоксии в Северном Каспии составляет в июне 7,8, а в августе – 13,8 тыс. км<sup>2</sup>.

В Среднем Каспии процессы антропогенного эвтрофирования отмечаются почти повсеместно. Более интенсивно они протекают на западном шельфе, стимулируя биологическое потребление растворенного кислорода (табл. 2).

Следует отметить, что восточный шельф

Среднего Каспия характеризуется бедностью минеральных соединений азота и фосфора. Так, в 60-70-х гг. с ранней весны до осени в воде нам не удавалось отметить наличие нитрат-нитритов и фосфатов (Салманов, 1968, 1987). В то же время, начиная с 1983 года, в этих районах даже в период вегетации бактериопланктона средняя концентрация азота-фосфора сохранялась на уровне 28-50 мкг/л. Более того, здесь происходит увеличение среднегодовых значений этих элементов. Например, по сравнению с 1988 г., в 1992-93 гг. в районах южнее Баутина почти до границы Южного Каспия содержание азот-фосфора возросло в 2,5-3 раза. Поэтому на восточном шельфе Среднего Каспия происходит интенсивное развитие фитопланктона до стадии цветения, что было несвойственно данному региону. За 20 лет – с 1969 до 1989 гг. – среднегодовая продукция фитопланктона на западном шельфе была увеличена в 4 раза и достигла 8,5-9,1 гС/м<sup>2</sup> сутки, а величина деструкции органического вещества возросла с 0,58 до 1,96 мг С/л сутки соответственно. Более контрастны эти показатели на восточном шельфе – в акваториях Урдюк-Ераливо, где при увеличении первичной продукции за 30 лет (1964-1993 гг.) на порядок величина деструкции органического вещества в воде возросла более, чем в 60 раз.

В центральной части Среднего Каспия среднегодовая продукция фотосинтеза фитопланктона за этот же срок увеличена на 70%, а величина деструкции как в воде, так и в грунтах – в 2 раза.

При усилении фотосинтеза фитопланктона заметное изменение произошло и в кислородном режиме воды моря, особенно в глубоководных его частях, что связано в основном с минерализацией органического вещества. Результаты определения кислорода, растворенного в воде, представлены в табл. 3.

Интенсивное антропогенное эвтрофирование протекает и в Южном Каспии. Только этот процесс здесь устойчив в так называемых контактных зонах, имеющих стационарную связь с потоками загрязненных вод. Характер эвтрофирования в западной части Южного Каспия заметно отличается от такового Среднего Каспия тем, что зона максимального развития фитопланктона перемещена здесь на

более глубоководные участки.

Примечательно, что деградация фитопланктона в сравнительно мелководных зонах отмечается в акваториях Сумгайытского, Пираллахынского, Шиховского, Гарадаг-Алятского разрезов. На Прикуринском, Кур-Косинском, Лянкяранском и Астаринском участках антропогенное эвтрофирование, как и в Среднем-Северном Каспии, начало формироваться с побережья. Примечательно еще то, что в акваториях, где происходит подавление физиологической активности водорослей, численность микроорганизмов и величина биологического потребления растворенного кислорода воды – максимальны. Результаты

многолетних наблюдений над первичной продукцией фотосинтеза фитопланктона на западном шельфе представлены в табл. 4.

На западном шельфе Южного Каспия антропогенное эвтрофирование особенно прогрессирует в районах южнее устья р. Кура. В данном регионе устойчивое цветение воды расширяется к юго-востоку и в центральной части – над глубоководной впадиной, где среднесуточная величина первичной продукции и расход кислорода по сравнению с 1982 годом в 1997 году возросли на порядок. На восточном шельфе Южного Каспия эти процессы стали почти необратимыми в районах южнее Туркменского залива.

Таблица 2

Среднесуточные величины деструкции органического вещества ( $\text{г С/м}^2$ ) в летний сезон

Разрез	1963	1968	1975	1981	1988	1997
Махачкала	2,3	2,6	3,7	6,6	7,4	12,3
Каспийск	2,4	3,4	4,8	7,9	8,4	9,7
Избербаш	1,4	3,2	3,8	6,4	7,3	8,8
Дербент	3,1	4,1	5,3	8,4	7,9	11,7
Самур	3,3	4,4	5,6	9,4	10,3	14,7
Худат	0,6	0,9	3,6	5,8	7,4	10,3
Хачмас	0,9	1,3	4,2	8,3	9,6	12,1
Ялама	0,7	0,9	1,9	3,8	6,2	9,7
Килязи	0,6	1,3	2,0	4,3	6,3	8,6
Среднее	1,7	2,5	4,0	6,8	7,9	10,1

Таблица 3

Изменение концентрации растворенного кислорода воды ( $\text{мг О}_2/\text{л}$ ) в глубоководной части Среднего Каспия (ст. 5, Хачмас-Бекташского разреза) летом 1965, 1975, 1985 и 1995 гг.

Глубина	1965	1975	1985	1995
0,5	9,1	9,0	9,3	9,6
50	8,4	7,3	7,1	6,8
100	7,3	6,8	6,3	6,0
150	6,9	6,3	6,0	5,4
200	6,2	5,7	5,3	5,0
300	6,0	5,3	5,0	4,4
400	5,8	5,0	4,7	4,0
500	4,6	4,2	4,0	3,3
600	4,2	3,9	3,6	3,0
700	3,3	3,1	2,7	2,0
780	2,9	2,6	1,8	1,1

Таблица 4

Многолетние изменения среднесуточной продукции фитопланктона (гС/м<sup>2</sup>) на западном шельфе Каспия по данным наблюдений за август

Разрез	Глуб. м	1960	1964	1968	1972	1976	1980	1989	1997
Сумгайыт	10	0,13	0,20	0,32	0,17	0,15	0,14	0,17	1,30
	25	0,63	0,74	0,88	0,70	0,89	1,04	1,44	3,80
	50	1,30	2,40	3,10	3,60	4,10	4,30	4,60	4,80
	100	0,60	0,94	1,70	2,80	3,11	3,96	4,50	5,70
Пираллахы	10	0,66	0,09	0,10	0,13	0,21	0,19	0,22	0,93
	25	0,11	0,13	0,17	0,20	0,18	0,17	0,24	0,83
	50	0,24	0,33	0,26	0,44	0,63	0,71	0,92	1,23
	100	0,93	1,20	2,30	3,46	4,30	4,86	5,30	5,80
Шихов	10	0,04	0,06	0,09	0,10	0,06	0,05	0,13	0,21
	25	0,60	0,35	0,20	0,33	0,74	1,10	1,36	1,70
	50	0,90	1,35	2,00	2,30	3,40	4,40	4,90	5,10
	100	2,30	2,86	3,10	3,80	4,10	5,20	5,60	5,93
Аляты	10	0,16	0,18	0,30	0,45	0,13	0,26	0,31	0,96
	25	0,22	0,27	0,43	0,36	0,29	0,46	0,87	1,20
	50	1,35	1,42	2,20	3,10	3,93	4,30	4,80	5,10
	100	0,96	1,27	1,93	2,40	3,60	4,10	4,60	5,90
Устье Куры	10	0,10	0,12	0,09	0,21	0,07	0,05	0,07	0,04
	25	1,30	2,20	3,60	2,90	3,20	4,60	5,10	6,24
	50	1,50	1,75	2,00	3,10	3,90	5,10	6,80	8,90
	100	2,10	2,76	3,10	3,84	4,90	5,70	6,90	7,60
Лянкяран	10	1,20	2,30	1,60	2,80	3,40	4,40	4,90	5,60
	25	1,54	1,74	2,60	3,30	4,20	5,30	6,30	7,90
	50	2,00	2,44	2,83	3,46	4,30	5,20	5,90	6,80
	100	2,40	3,10	3,70	4,30	5,30	6,20	6,60	8,70
Астара	10	1,96	2,30	2,90	3,30	4,10	4,70	5,60	7,90
	25	1,30	2,10	2,86	3,70	4,30	5,30	5,80	6,90
	50	1,90	2,30	3,30	4,10	5,30	6,20	6,80	8,30
	100	2,10	3,20	3,80	4,60	5,70	6,60	7,40	8,60

Следует отметить, что до 1975 года в открытой части Южного Каспия отмечалось наличие растворенного кислорода на всех глубинах в придонном слое воды. Так, в пробах воды в зонах максимальных глубин – 900-996 м кислород составлял 1,9-1,6 мг О<sub>2</sub>/л соответственно. Содержание сероводорода (запах, черный цвет) в грунтах составляло не более 18-22% из сотни взятых образцов. В то же время наличие сероводорода в грунтах в году отмечалось в 43 из 56 образцов.

Устойчивость гипоксии в глубоководной части Южного Каспия доказывается тем, что процессы стагнации, водообмена, температурный режим и другие факторы не оказывают влияния на обогащение придонных слоев кислородом. Результаты определения кисло-

рода в зимний сезон 1972 и 1995 гг. показали, что гипоксия глубоководных участков Южного Каспия стала устойчивой даже в зимний период и нет сомнения в том, что она является результатом эвтрофирования и представляет серьезную опасность для экосистемы Южного Каспия в целом. Экологические последствия антропогенного эвтрофирования в Каспийском море проявляются еще и в сокращении глубины трофогенного слоя в акваториях цветения, а также в интенсивном развитии анаэробных форм бактерий.

Многочисленные измерения прозрачности воды во времени и пространстве показали, что за последние 20 лет в Северном, Среднем и Южном Каспии эвфотический слой воды уменьшился в среднем на 1,2; 2,5 и 3 м соот-

ветственно. Также наблюдается изменение глубины температурной стратификации воды: в Среднем и Южном Каспии слой температурного скачка перемещен на 3,5 м выше обычного. Характерно, что в слоях термоклина биомасса бактериопланктона стала значительно больше: если в 60-70-х годах численность сапрофитных бактерий в слоях скачка была на 35-40% больше таковой поверхностных слоев, то по данным 1987, 1993 и 1997 гг. она превосходит численность гетеротрофов поверхностных горизонтов в 1,5-2 раза. Очевидно, увеличение на 40% расхода кислорода воды связано с активностью микроорганизмов, т.е. их минерализующей деятельностью органического вещества.

Следует отметить, что анаэробные бактерии – денитрифицирующие, сульфатредуцирующие, метанобразующие, анаэробные клетчаткоразлагающие – обычно выделялись из образцов донных отложений. В воде в большей части они отсутствуют, за исключением изолированных, сильно загрязненных бухт-заливов (Салманов, 1987). В то же время за последние 8-10 лет эти бактерии стали обычными в бактериоценозе придонных слоев воды глубже изобат в 75-100 м. Также установлено, что увеличение роста первичной продукции, величины деструкции органического

вещества, следовательно, и уменьшение процента насыщения воды кислородом положительно влияют на количественно-качественный состав анаэробных бактерий в Каспии.

#### ЛИТЕРАТУРА

- БАРСУКОВА, Л.А. 1971. Многолетний биогенный сток р. Волги у Астрахани. *Тр. Касп. НИРХ*, 26, 73-81.
- ЗЕНИН, А.А. 1965. Гидрохимия Волги и ее водохранилище. Гидрометеиздат. Ленинград. 180.
- КАТУНИН, Д.Н. 1992. Гидрохимический режим и изменение экосистемы Каспийского моря в XX веке. В сб.: *Биоресурсы Каспия*. Астрахань, 160-162.
- КАТУНИН, Д.Н., ИВАНОВА, Н.В. и др. 1992. Многолетние тенденции изменения биогенного и органического стока р. Волги у г. Астрахани. В сб.: *Биоресурсы Каспия*. Астрахань, 161-163.
- САЛМАНОВ, М.А. 1968. Первичная продукция фотосинтеза фитопланктона на западном побережье Среднего и Южного Каспия. В сб.: *Биология Ср. и Юж. Каспия*. Наука, Москва, 64-70.
- САЛМАНОВ, М.А. 1975. Первичная продукция и деструкция органического вещества Каспийского моря. *Тез. Всесоюзн. конф.* Пушкино, 73.
- САЛМАНОВ, М.А. 1981. Численность и биомасса микрофлоры, первичная продукция и деструкция органического вещества Бакинской бухты. В сб. сектора микробиологии АН Азерб. ССР, 56-63.
- САЛМАНОВ, М.А. 1987. Роль микрофлоры и фитопланктона в продукционных процессах Каспийского моря. Наука, Москва, 216.
- САЛМАНОВ, М.А. 1999. Экология и биологическая продуктивность Каспийского моря. Баку. 400.