

УДК (551.46.09:628.5+551.464.621).001.57

ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ БЕНТАЛИ МОРЯ НА КИСЛОРОДНЫЙ РЕЖИМ ПРИДОННЫХ ВОД

А. М. Бронфман

В современных условиях в моря во все возрастающих количествах поступают органические шлаки хозяйственной деятельности и урбанизации на водосборе. Включение этих веществ в процессы биотического круговорота, помимо других экологических последствий, проявляется в существенном нарушении кислородного баланса моря. В Балтийском море, например, на окисление органического вещества только бытовых сточных вод ежегодно расходуется около 3,6 млн. т кислорода (Oertzen, 1972).

Наиболее резких деформаций в кислородном режиме при этом следует ожидать в бентали моря, являющейся областью накопления органических веществ и в то же время характеризующейся наименее активной динамической и фотосинтетической аэрацией вод. Это особенно опасно потому, что придонные слои моря служат экологической нишей для зообентоса и популяций многих промысловых рыб; здесь, в контактной зоне «вода — грунт», протекают физико-химические и биохимические процессы, имеющие принципиальное значение для формирования химических параметров и продуктивности пелагиали.

Очевидно, угнетение кислородного режима придонных вод связано не только с органическим загрязнением бентали, но и со стагнированием вод в результате ослабления конвективного перемешивания, депрессией ветровой активности или увеличения плотностной стратификации водных масс, изменением валовой первичной продукции органического вещества и т. д. Современная океанография располагает методами анализа, позволяющими предвидеть возможные нарушения кислородного режима при изменении этих факторов, однако до сих пор нет объективных оценок влияния загрязнения водной среды веществами органического происхождения.

В предлагаемой работе делается попытка решить эту задачу для нефтепродуктов и детергентов, — наиболее распространенных органических примесей с четко выраженным негативным влиянием на кислородный режим и способностью активно аккумулироваться в бентали моря. Кроме того, исследовать детергенты важно еще и потому, что их широко применяют для борьбы с попавшей в море нефтью.

Несомненно, количественная информация о влиянии нефтепродуктов и детергентов на содержание растворенного кислорода может быть получена с помощью моделирования *in vitro*, однако в этом случае экстраполяция результатов опыта на реальные условия конкретного водоема сопряжена с риском значительных ошибок. Наиболее конкретно поставленная задача может быть решена только на основании на-

туральных измерений, позволяющих прямо либо косвенно учесть целый ряд важных элементов физико-химического режима моря, моделировать которые в эксперименте в настоящее время невозможно.

В нашем исследовании такой основой послужили результаты сезонных наблюдений в Азовском море. При этом был использован метод множественного регрессионного анализа — один из немногих количественных способов, позволяющих учитывать одновременное действие многих параметров на зависимую переменную, определять относительное влияние каждого параметра, а также измерять полный эффект с помощью расчетных коэффициентов.

С помощью указанного метода были исследованы следующие эмпирические модели:

$$K_{O_2} = f[E, (БПК_1)_{гр}, H_v, H_{гр}, D_v, D_{гр}],$$

$$K_{O_2} = f[E, (БПК_1)_{гр}, H_v, H_{гр}],$$

$$K_{O_2} = f[E, (БПК_1)_{гр}, D_v, D_{гр}],$$

где K_{O_2} — содержание растворенного кислорода в слое 0,5 м от дна;

E — вертикальная устойчивость вод;

$(БПК_1)_{гр}$ — суточная величина биохимического потребления кислорода поверхностным слоем донных отложений;

H_v, D_v — соответственно содержание нефтепродуктов и детергентов в придонном слое моря;

$H_{гр}, D_{гр}$ — то же для поверхностного слоя осадка.

Исходным материалом служили результаты 97 наблюдений, выполненных в широком интервале изменений исследуемых параметров (таблица). Диапазон температуры, для которого получена исходная информация, составил 5—25° при среднем значении 16,3°.

Некоторые статистические характеристики параметров модели
в пределах исследуемой выборки

	$K_{O_2}, \text{мг/л}$	$E, \text{усл. ед.}$	$(БПК_1)_{гр}, \text{гO}_2/\text{м}^2 \text{ в сутки}$	$H_v, \text{мг/л}$	$H_{гр}, \text{мг/л}$	$D_v, \text{мг/л}$	$D_{гр}, \text{мг/л}$
Среднее	6,29	2704	3,77	0,52	4,57	0,125	1,011
Максимум	9,80	19720	10,09	1,25	9,35	0,260	4,570
Минимум	0,21	—3850	0,50	0,00	0,06	0,000	0,010
Среднеквадратичное отклонение	1,36	5138	1,89	0,35	2,07	0,065	1,092

Исследование избранных моделей на ЭВМ «Одра-1204» показало, что они удовлетворительно аппроксимируют фактически регистрируемые изменения в содержании растворенного кислорода. Коэффициенты множественной корреляции оказались равными соответственно 0,874, 0,627 и 0,643, а вычисленные значения дисперсионного отношения Фишера (F), составившие 6,67, 8,77 и 11,11, при заданных степенях свободы превосходят даже 99%-ный уровень критических значений распределения F .

Структурные схемы исследуемых моделей представлены на рис. 1, 2 и 3; их анализ позволяет сделать следующие основные выводы.

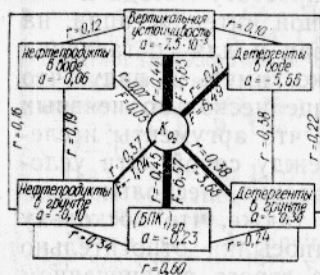


Рис. 1

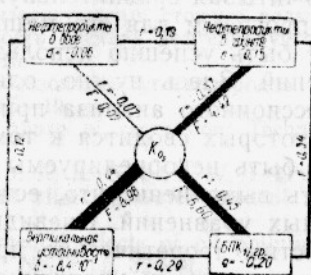


Рис. 2

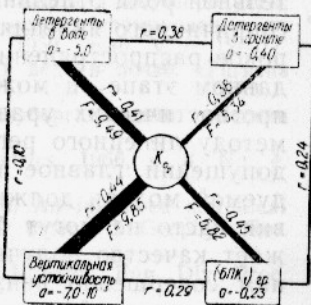


Рис. 3

1. Исходя из степени значимости (F), определенной с помощью дисперсионного отношения Фишера, ведущими факторами в исследуемых моделях являются: вертикальная устойчивость вод ($F=6,63 \div 9,85$), и величина биохимического потребления кислорода поверхностным слоем осадка ($F=6,57 \div 6,82$). Далее, в порядке убывания относительной роли следуют детергенты, находящиеся в придонных слоях моря ($F=6,49 \div 9,49$) и, наконец, нефтепродукты, аккумулированные в контактной зоне осадка ($F=3,68 \div 5,34$ и $1,04 \div 4,42$). Нефтепродукты, содержащиеся в придонном слое, оказывают незначительное влияние на его кислородный режим и согласно избранному критерию не являются значимым фактором ($F=0,02 \div 0,03$).

2. Судя по значениям коэффициентов регрессии (a) в диапазоне изменения параметров исследуемой выборки, увеличение содержания нефтепродуктов и детергентов в придонных слоях воды на $0,1 \text{ мг/л}$ приводит к падению концентрации растворенного в них кислорода соответственно на $0,006$ и $0,50-0,57 \text{ мг/л}$. Изменение количества нефтепродуктов и детергентов в грунте проявляется в кислородном режиме относительно слабее — каждый миллиграмм рассматриваемых веществ, аккумулированных в 1 г грунта, уменьшает содержание кислорода в придонном слое соответственно на $0,10-0,15$ и $0,30-0,40 \text{ мг/л}$. Если следовать выводам Бокса (1966) относительно смысловой роли коэффициентов регрессии, можно полагать, что указанные оценки опосредствованно учитывают также и эффект от общего нарушения кислородного баланса вследствие других проявлений нефтяного и детергентного загрязнения моря (образование поверхностных пленок, угнетение фотосинтеза, повышенное потребление кислорода в пелагиали, т. е. на пути его переноса в глубинные слои и др.).

Сравнительно слабое влияние нефтепродуктов на кислородный режим придонных вод не уменьшает экологической опасности нефтяного загрязнения. Относительно медленное разрушение нефтепродуктов, ранее показанное А. И. Изъюровой (1950), Е. И. Розановой (1967), М. Т. Голубевой (1960), Марфи (Murfy, 1971) и подтверждаемое нашими данными, способствует их накоплению в бентали моря и усилению токсического воздействия на донные биоценозы и демерсальных рыб.

Помимо прямого токсикоза, загрязнение нефтепродуктами и детергентами способно воздействовать на органическую жизнь бентали также вследствие угнетения кислородного режима придонных вод. Так, в зонах максимального загрязнения (см. таблицу), которые обычно совпадают в пространстве, отрицательные аномалии в содержании кислорода могут достигать $4,0 \text{ мг/л}$, т. е. величин, достаточных для того чтобы вызвать угнетение, асфиксию, а в определенных ситуациях (летнее стагнирование вод) и гибель оксифильных организмов дна.

В построениях нами использованы лишь те возможности линейного регрессионного анализа, которые открываются при выяснении относительной роли отдельных факторов в формировании того или иного многопричинного явления. Учитывая сравнительную простоту метода и широкое распространение программ для его машинной интерпретации, на данном этапе он может быть успешно использован и для составления прогностических уравнений. Здесь нужно, однако, иметь в виду, что методу линейного регрессионного анализа присуще несколько неявных допущений, главное из которых сводится к тому, что аргументы исследуемой модели должны быть некоррелируемы между собой. Эти условия часто не могут быть выполнены, что, естественно, несколько снижает качество полученных уравнений. Очевидно также, что поскольку нам совершенно неизвестны теоретические предпосылки относительно вида изучаемой зависимости, поиск уравнения в строго ограниченном классе функций (в данном случае линейных) не всегда может дать удовлетворительный результат.

В последнее время в работах американских гидрологов (Harris and all, 1961; Snayder, 1962) применен новый, более совершенный метод многомерного статистического анализа, в котором выбор аргументов модели организован так, что вводимые в расчет переменные не коррелируются (ортогональны) между собой. Поиск зависимости при этом осуществляется в более широком классе функций, что повышает аппроксимирующую способность получаемых уравнений.

Методика расчета по данному методу, представляющая собой новизну метода итераций, удобна для применения на ЭВМ и впервые была реализована на машине ИБМ-650 Бюро мелиорации Департамента внутренних дел США. В нашей работе были использованы программы ортогонализации, разработанные для ЭВМ БЭСМ-4 сотрудником Института механики и прикладной математики Северо-Кавказского Центра Высшей школы Ф. А. Сурковым.

В результате расчетов получен следующий ряд уравнений, которые могут быть использованы для прогноза содержания кислорода в придонных слоях загрязненного детергентами и нефтепродуктами моря.

$$K_{O_2} = 6,29 - 0,489 [\hat{D}_v^2 (\hat{BPK}_1)_{гр} - 0,047] - 0,412\hat{E} - 0,242\hat{D}_r;$$

$$K_{O_2} = 6,29 - 0,613 (\hat{BPK}_1)_{гр} - 0,413\hat{E} - 0,0459 [\hat{H}_v \cdot (\hat{BPK}_1)_{гр} E - 0,03] + 0,270 [\hat{H}_v \hat{H}_{гр} (\hat{BPK}_1)_{гр} - 0,045] = 0,228\hat{H}_{гр}.$$

Ввиду ограниченности диапазонов представления чисел в ЭВМ и с целью повышения точности расчета все независимые переменные, входящие в состав уравнений, нормированы, т. е. представлены в виде разности заданных и средних величин, отнесенной к среднеквадратичному их отклонению $(\hat{x} = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma})$.

Проверка приведенных уравнений для условий Азовского моря показала, что они обеспечивают достаточно хорошо точность аппроксимации — коэффициенты множественной корреляции составили соответственно 0,684 и 0,636.

Возможно, что специфика морфометрии и режима других морских акваторий повлияет на качество прогноза, получаемого с помощью приведенных уравнений. Проверка этого положения и разработка более универсальных или по крайней мере региональных прогностических уравнений должны стать задачей будущих исследований.

Голубева М. Т. Влияние сточных вод, содержащих нефть и нефтепродукты, на санитарное состояние водоемов и обоснование гигиенического нормирования их в воде водоемов. Сб. «Производственные сточные воды», 1960, вып. V, с. 12—17.

Изъюрова А. И. Скорость распада нефтепродуктов в воде и почве. «Гигиена и санитария», 1956, № 1, с. 8—16.

Розанова Е. П. Использование углеводов микроорганизмами. «Успехи микробиологии», 1967, № 4, с. 15—19.

Box, G. E. P. Use and abuse of regression. *Technometrics*, 1966, v. 8, No. 4, pp. 12—16.

Harris, B., A. L. Sharp, A. E. Gibbs, W. I. Owen. An improved statistical model for evaluating parameters affecting water yield of river basins. *J. Geophys. Res.* 1961, v. 66, No. 10.

Murphy, T. A. Environmental effects of oil pollution. *J. Sanit. Eng. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng.* 1971, v. 97, No. 3, pp. 32—41.

Oertzen, J.-A. Die Meeresverschmutzung ein Problem der Meeresbiologie. *Biol. Rdsch.* 1972, v. 10, No. 1.

Snayder, W. M. Some possibilities for multivariate analysis in hydrologic studies. *J. Geophys. Res.* 1962, v. 67, pp. 21—26.

*Influence of pollution observed in the benthic zone
of the Azov Sea on the oxygen content in the off-bottom layer*

A. M. Broniman

SUMMARY

Applying the multivariate statistical analysis the oceanographic data obtained have been processed at the computer. The results have revealed and estimated a decrease in the oxygen content occurred in the benthic zone due to pollution with oil products and detergents. The method and regression equations may contribute to forecasting.