

ТРУДЫ ВНИРО

ТОМ CXVIII

ВОПРОСЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ АЗОВСКОГО МОРЯ

ALL-UNION RESEARCH INSTITUTE OF MARINE
FISHERIES AND OCEANOGRAPHY
(VNIRO)

PROCEEDINGS

VOLUME CXVIII

PROBLEMS
OF MATHEMATICAL INVESTIGATIONS AND
MODELLING OF THE ECOSYSTEM
OF THE AZOV SEA

MOSCOW, 1976

639.2

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МОРСКОГО РЫБНОГО ХОЗЯЙСТВА И ОКЕАНОГРАФИИ
(ВНИРО)

Т 78

ТРУДЫ

ТОМ CXVIII

ВОПРОСЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ АЗОВСКОГО МОРЯ

МОСКВА, 1976

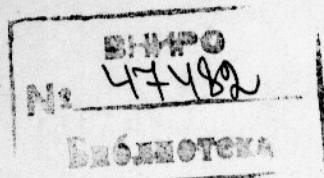
УДК 57.087.1:574.5.(262.54)

Редакционная коллегия:

П.А.Моисеев (ответственный редактор),
И.Барыбина, А.М.Бронфман, А.Б.Горстко,
С.В.Козлитина

Editorial Board:

P.A.Moiseev (Chief Editor),
I.A.Barybina, A.M.Bronfman,
A.B.Gorstko, S.V.Kozlitina



С о д е р ж а н и е

Стр.

Б р о н ф м а н А.М., К о з л и т и н а С.В.	
К у ч а й Л.А. Основные статистические параметры и циклические вариации материкового стока в Азовское море	8
К у ч а й Л.А. Статистический подход в задаче построения прогнозирующих функций солености Азовского моря	19
Г а р г о п а Ю.М., К о з л и т и н а С.В. Моделирование естественного процесса воспроизводства проходных рыб Азово-Кубанского района	27
Д у б и н и н а В.Г., К о з л и т и н а С.В. Применение математических моделей при обосновании требований рыбного хозяйства к водным ресурсам нижнего Дона	34
Г о р с т к о А.Б. Имитационная система "Азовское море"	48
С у р к о в Ф.А. О динамике водных масс Азовского моря	56
Б р о н ф м а н А.М., С у р к о в Ф.А. Статистическая модель формирования солености Азовского моря	62
Б р о н ф м а н А.М., И л ь и ч е в В.Г. К моделированию круговорота азота в Азовском море	70
Д о м б р о в с к и й Ю.А., Ч е р н у с Е.А. Математическая модель трансформации биогенных веществ Таганрогского залива	78
А л д а к и м о в а А.Я., С у р к о в Ф.А., Ш у с т о в а В.Л. Математическая модель динамики фитопланктона сообществ Азовского моря	87
Г о р с т к о А.Б., М о р д в и н о в а О.Г. Н е к р а с о в а М.Я., С т у д е н и к и н а Е.И. Моделирование динамики биомассы зоопланктона и бентоса	94

А б е ц е д а р с к а я Л.В., В о л о в и к С.П., В о р о н Т.А., Г о р с т к о А.Б., З а д о р о ж - н а я Н.С., К о в т у н И.О., С ы ч е в а В.Ю. М о д е л и р о в а н и е д и н а м и к и п о п у л я ц и й а з о в с к и х р ы б н а п р и - м е р е х а м с ы и б ы ч к а - к р у г л я к а	102
Р е ф е р а т ы	113

CONTENTS

	<u>Page</u>
Preface	
Bronfman, A.M., S.V.Kozlitina, L.A.Kuchai. Main statistical parameters and cyclic variations in the river discharge in the Azov Sea.	8
Kuchai, L.A. A statistical approach to the problem of constructing forecasting functions of salini- ty in the Azov Sea.	19
Gargopa, Yu.M., S.V.Kozlitina. Modelling of natural reproduction of anadromous fish from the Azov Sea - Kuban River basin.	27
Dubinina, V.G., S.V.Kozlitina. Application of mathematical models to substantiate requirements of fisheries to water resources in the downstream part of the Don River.	34
Gostko, A.B. The simulation system AZOV SEA.	48
Surkov, F.A. On the dynamics of water masses of the Azov Sea. ,	56
Bronfman, A.M., F.A.Surkov. A statistical model of salinity in the Azov Sea.	62
Bronfman, A.M., V.G.Ilyichev. To modelling the turnover of nitrogen in the Azov Sea.	70
Dombrovsky, Yu.A., E.A.Chernus. A mathemati- cal model of transformation of biogenic elements in the Bay of Taganrog.	78
Aldakimova, A.Yu., F.A.Surkov, V.L.Shus- tova. A mathematical model of the dynamics of phytoplankton biocenosis from the Azov Sea.	87
Gorstkova, A.B., O.G.Mordvinova, M.Ya. Ekrasova, E.I.Studenikina. Modelling of the dynamics of the biomass of zoo- plankton and benthos.	94

A b e t s e d a r s k a y a, L. V., S. P. V o l o v i k, T. A. V o r o n, A. B. G o r s t k o, N. S. Z a d o r o z h n a y a, I. O. K o v t u n, V. Y u. S y c h e v a. Modelling of the dynamics of fish populations from the Azov Sea with special reference to anchovy and round goby. .	102
A b s t r a c t s	113

ПРЕДИСЛОВИЕ

Серия статей, составляющих настоящий том трудов АзНИИРХа, посвящена чрезвычайно важной и достаточно сложной проблеме моделирования с помощью ЭВМ различных биологических процессов и определяющих их факторов окружающей среды, свойственных Азовскому морю.

Выбор этого водоема и его обитателей для подобного рода исследований и несомненная их результативность в значительной мере определяется относительно небольшим объемом Азовского моря и достаточно качественным фактическим материалом. Квалифицированное использование авторами фактических данных позволило показать влияние на биологическую продуктивность как антропогенных факторов, так и гидрологических и биологических особенностей этого бассейна. Авторы статей делают попытки математического моделирования гидрологических и биологических процессов, свойственных Азовскому морю, создают модели процессов воспроизводства и колебаний численности промысловых рыб в зависимости от различных параметров среды, структуры популяций, биологического и физиологического состояния популяции.

Особенно интересен второй раздел тома, в котором описывается созданная совместно сотрудниками АзНИИРХа и НИИ механики и прикладной математики Северо-Кавказского Научного центра высшей школы имитационная модель экосистемы Азовского моря. Изучение статистических закономерностей семейства траекторий исследуемой системы необходимо для оценки управляющих воздействий (антропогенного происхождения) на систему.

Представляется, что вынесение на широкое обсуждение содержания публикуемых статей будет способствовать дальнейшему развитию исследований, сопряженных с моделированием крупномасштабных биологических процессов в морских водоемах, определяющих в конечном счете их рыбопродуктивность.

P R E F A C E

The issue embraces papers presented by workers of the Azov Research Institute of Fisheries. They are dedicated to elaboration of methods of modelling various biotic and abiotic processes occurring in the Azov Sea at computers.

As is known, the biological productivity is affected with both anthropogenic factors and biological-hydrological peculiarities of the Azov Sea.

The first group of papers deals with statistical investigations of abiotic and biotic factors of the Azov Sea, with mathematical modelling of hydrological and hydrobiological processes as well as of the dynamics of populations of some commercial species of fish. The population of commercial species consisting of live specimens represents a multi-component open system characterized both with an astonishing stability and a high sensitivity to fluctuations in the input parameters. The presence of strongly interrelated variables which do not yield to describing is the most peculiar feature of the system. The authors have managed to isolate the most important variables to be studied first.

The other part of the issue describes a simulation model of the ecosystem of the Azov Sea.

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИ
НЕКОТОРЫХ БИОГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
АЗОВСКОГО МОРЯ**

УДК 31:556.16 (262.54)

ОСНОВНЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ
И ЦИКЛИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ МАТЕРИКОВОГО СТОКА
В АЗОВСКОЕ МОРЕА.М.Бронфман, С.В.Козлитина,
Л.А.Кучай

Материковый сток – важнейший природный ресурс, во многом определяющий развитие производительных сил общества. Ограничивающая функция стока особенно заметна в зонах недостаточного и неустойчивого увлажнения, где водные ресурсы лимитируют развитие производств, нуждающихся в воде. Такая ситуация характерна для бассейна Азовского моря, суммарный дефицит водохозяйственного баланса в котором уже на уровне 1970 г. составил около $9 \text{ км}^3/\text{год}$. По существующим прогнозам, к 1985 г. его величина достигнет $16\text{--}17 \text{ км}^3$.

Такое положение делает особенно актуальным получение возможно более полных характеристик речного стока и разработку прогнозных моделей, являющихся основой для планового и рационального развития основных предприятий-водопользователей.

В предлагаемой работе рассмотрено несколько параметров, позволяющих составить объективное представление о закономерностях стока Дона и Кубани и об изменениях его характеристик под влиянием антропогенных факторов (многолетнее и сезонное регулирование, безвозвратное изъятие и др.). К этим параметрам относятся.

1) функции распределения вероятностей и критерии (x^2 , λ , χ) проверки гипотез о законе их распределения;

2) первый начальный момент (ν), определяющий положение центра тяжести исследуемой выборки

$$\nu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i;$$

3) второй центральный момент (дисперсия D) и среднее квадратическое отклонение (σ), определяющие меру рассеяния эмпирических значений стока

$$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{v})^2};$$

4) коэффициенты вариации (C_v), асимметрии (C_s) и эксцесса (E)

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{v}}; \quad C_s = \frac{\mu_3}{\sigma^3}; \quad E = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3;$$

где μ_3 и μ_4 - третий и четвертый центральные моменты.

Все указанные параметры рассчитаны по стандартным программам на ЭВМ "Наири-2" по рядам естественного и фактического стока Дона (створ станицы Раздорской) за период 1876-1969 гг.; кроме того, аналогичным образом также по рядам естественного и фактического стока Дона были сделаны расчеты только за период его зарегулирования Цимлянским гидроузлом (1952-1969 гг.).

Установлено (табл. I), что для всей совокупности эмпирической выборки стока Дона (1876-1969 гг.) независимо от того, что были проанализированы естественные или фактически измеренные его значения, величина стока, судя по критерию Колмогорова-Смирнова (λ), подчиняется нормальному закону распределения ($\lambda = 1,36$). Однако использование более строгого критерия Пирсона (χ^2) указывает на существенные отклонения от нормального закона. Согласно табличным значениям при десяти степенях свободы и доверительной вероятности 0,95, нормальное распределение характеризуется величиной $\chi^2 < 18,31$. В рассматриваемом же нами случае χ^2 для рядов естественного и фактического стока Дона равно соответственно 112,7 и 145,7. По критерию α , определяющему тип кривой распределения вероятностей, закон распределения величин стока Дона может быть отнесен к первому типу кривых Пирсона (β - распределение). Аналогичные выводы могут быть сделаны и для естественного стока Дона в период, предшествующий его зарегулированию (1876-1952 гг.).

Из данных табл. I видно, что строительство Цимлянского гидроузла незначительно изменило характеристики естественного и фактического годового стока Дона за период 1876-1969 гг. и, таким образом, вполне правомерно использовать ряд измерений для анализа и моделирования.

Т а б л и ц а I

Статистические параметры стока рек Дона и Кубани

Характеристика стока и период (ряд)	γ	min	max	Ампли- туда	δ	C_v	C_s	E	x^2	λ	ε
1876-1969 гг.	27,4	10,8	69,4	58,6	Д о н 10,7	0,39	1,00	1,31	112,7	0,94	-2,35
	26,9	11,8	69,4	57,6	10,6	0,40	1,13	1,62	145,7	0,78	-2,15
До создания Цимлянского водохранилища (1876- 1951 гг.)	27,9	11,8	69,4	57,6	11,2	0,40	1,02	1,20	78,40	1,08	-1,33
После создания Цимлян- ского водохранилища (1952-1969 гг.)	25,4	10,8	42,6	31,8	8,4	0,33	0,24	-0,89	6,07	0,36	-0,02
	22,4	12,9	36,0	23,1	6,5	0,29	0,43	-0,80	16,09	0,77	-0,06
К у б а н ь											
1912-1969 гг.	13,4	8,6	18,3	9,7	2,35	0,18	-0,105	-0,590	11,26	0,66	-0,007
	12,8	6,9	17,7	10,8	2,29	0,18	-0,098	-0,325	6,57	0,80	-0,011

Примечание. В дробях: числитель - естественный, знаменатель - фактический сток.

Однако этот вывод значительно менее справедлив при сопоставлении рядов естественного и фактического стока за период его регулирования (1952-1969 гг.). В данном случае значения критериев Пирсона, Колмогорова-Смирнова и критерия типа кривой (α) для ряда фактического стока оказываются существенно измененными. Почти вдвое (от 0,24 до 0,43) возросла асимметрия стокового ряда. Одновременно регулирующая функция Цимлянского водохранилища значительно сократила амплитуду и среднеквадратическое отклонение стока, а безвозвратное изъятие речных вод - среднюю его величину (на 3 км^3 , см.табл. I).

Согласно критериям χ^2 и λ , распределение величин стока Кубани подчиняется нормальному закону. По значению $\alpha = -0,007$ это распределение принадлежит седьмому типу кривых Пирсона.

На временном этапе водохозяйственное строительство в бассейне Кубани еще сравнительно слабо изменило статистические характеристики стока реки, исключая его минимальные отметки, значения которых понизились от 8,6 до 6,9 км^3 (см.табл. I). Однако вычисленное сокращение среднего стока Кубани (на 5% - от 13,4 до 12,8 км^3) лишь частично отражает действительные масштабы его антропогенных преобразований, поскольку из 305 тыс.га орошаемых площадей, введенных в строй к 1970 г., более половины приходится на массивы, расположенные ниже Краснодара, где находится используемый при анализе гидрометрический створ. Кроме того, антропогенное изъятие стока Кубани частично компенсируется сокращением непродуктивного испарения в результате обвалования русла и регулирования стока, предотвращающих паводковые разливы реки. Значительный эффект, полученный для минимального стока Кубани, хорошо согласуется с выводами И.А.Шикломанова и Л.Е.Смирновой /17/ о том, что наибольшее снижение водности реки под влиянием хозяйственной деятельности фиксируется именно в маловодные годы (рис. I).

Интересен вопрос выделения циклических флуктуаций стока, анализ которых в последние годы все чаще используется для определения тренда в развитии стока и его генетического прогноза. При выявлении внутривековых колебаний водности рек одним из наиболее распространенных является метод исследования корреляционных и спектральных функций, расчеты которых все более широко применяются в гидрологических исследованиях. Однако при помощи корреляционных функций можно выяснить лишь

тенденцию и периодичности, а не продолжительность различных периодов или циклов, поскольку процесс стока сложен. Поэтому достаточно объективную информацию можно получить лишь при сочетании исследований как корреляционных, так и спектральных функций.

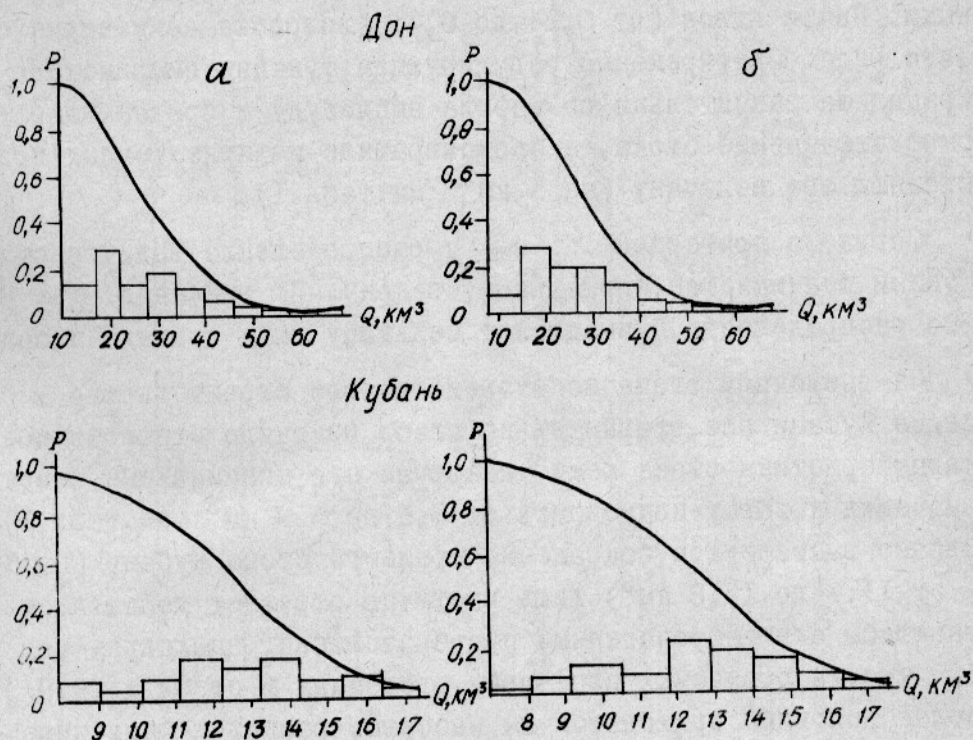


Рис. I. Дифференциальные и интегральные гистограммы распределения для восстановленных (а) и фактических (б) рядов стока Дона и Кубани

В предлагаемой работе, чтобы увеличить достоверность результатов корреляционных функций, проводились расчеты не только для полных стоковых рядов Дона и Кубани, но и для отдельных их участков, имеющих общую точку начального отсчета. Исследовались следующие ряды: для стока Дона - 1876-1920, 1876-1935, 1876-1950, 1876-1969 гг., для стока Кубани - 1912-1951 и 1912-1969 гг. При анализе полученных данных наиболее реальными считались лишь те внутрирядные связи стока, которые проявлялись в большинстве рассматриваемых интервалов времени.

Как видно из табл. 2, внутрирядные связи для стоковых рядов Дона выражены слабо. Достоверно положительные пики выделяются лишь при $\tau = 12$ лет ($R_\tau = 0,151-0,229$). В ряде 1876-1920 гг. некоторое увеличение коэффициентов автокорреляции отмечается

также при сдвигах $\tau = 4$ и 7 годам (R_τ соответственно $0,181$ и $0,121$), однако тенденция к периодичности при исследовании других, более представительных выборок, не подтверждена.

Т а б л и ц а 2

Значения коэффициентов автокорреляции (R_τ)
для годового стока рек Дона и Кубани

Сдвиг	Д о н				Кубань	
	1876- 1969гг.	1876- 1920гг.	1876- 1935гг.	1876- 1950гг.	1912- 1969гг.	1912- 1951гг.
1 год	0,110	0,048	0,043	0,127	0,169	0,221
2 года	-0,001	0,102	0,060	0,018	0,143	0,137
3 года	-0,047	0,057	0,052	-0,029	-0,083	-0,150
4 года	0,050	0,181	0,073	0,016	-0,029	-0,181
5 лет	0,035	-0,003	-0,054	-0,058	0,208	0,114
6 лет	-0,188	-0,186	-0,233	-0,230	-0,010	-0,112
7 лет	-0,033	0,121	0,008	-0,067	0,248	0,233
8 лет	-0,066	0,083	-0,019	-0,026	0,188	0,198
9 лет	0,008	-0,033	0,037	0,069	0,091	0,073
10 лет	-0,060	-0,206	-0,155	-0,089	0,135	-0,026
11 лет	0,026	-0,100	0,035	-0,023	-0,247	-0,576
12 лет	0,151	0,069	0,223	0,153	0,047	-0,213
13 лет	-0,027	-	-	-	-0,276	-0,498
14 лет	0,058	-	-	-	0,021	-
15 лет	0,137	-	-	-	0,132	-
16 лет	0,123	-	-	-	-0,012	-

Результаты расчетов отличаются от значений корреляционной функции, полученных для стока Дона Г.П.Калининым и А.И.Давыдовой /8/, что, очевидно, связано с использованием других реализаций стока. Наибольшие значения этими исследователями получены при τ , равном $2(R_\tau = 0,15)$, $5(R_\tau = 0,12)$, 12 и 14 годам (R_τ соответственно $0,11$ и $0,15$).

Нашими расчетами спектральных функций (рис.2) практически во всех исследуемых выборках стока Дона обнаружен четырехлетний цикл. Значительно увеличивается амплитуда спектра также на частотах $\omega = 2,690$ и $0,483$, соответствующих циклу $2-3$ года и 13 лет.

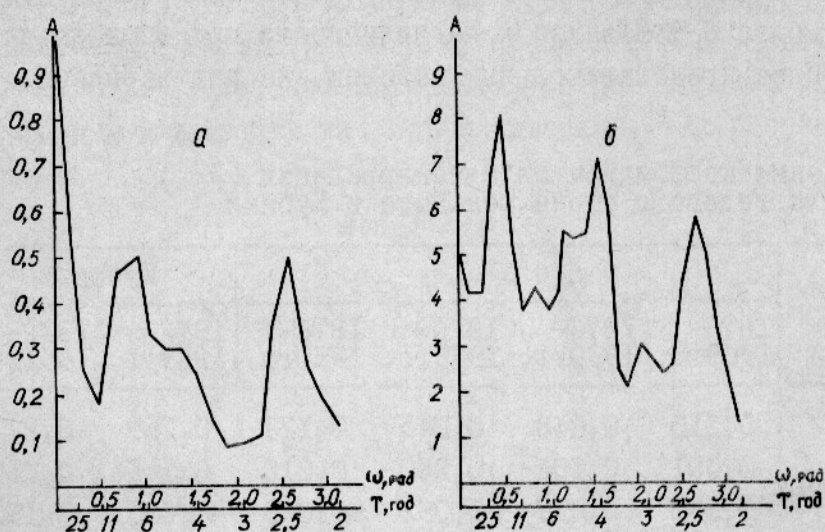


Рис.2. Спектральные функции рядов стока Кубани (а) и Дона (б)

В ходе корреляционных функций стока Кубани для рядов 1912-1951 и 1912-1969 гг. внутрирядные связи особенно заметны при τ , равном 5 и 7-8 годам (см.табл.2). В наиболее представительной выборке 1912-1969 гг. положительные пики обнаруживаются также при τ , равном 10 и 15 годам. По данным же Калинина и Давыдовой /8/, существенные положительные аномалии корреляционной функции стока Кубани обнаруживаются при τ , равном 5 ($R_\tau = 0,20$) и 15 годам ($R_\tau = 0,22$).

В связи с малой дисперсией стока Кубани в его спектре отсутствуют явно выраженные возмущения, однозначно подтверждающие наличие циклов, установленных при анализе корреляционных функций. В то же время некоторое увеличение амплитуды наблюдается на частотах, соответствующих циклам 2-3 и 7-8 лет (см.рис.2).

Таким образом, в стоке Дона наиболее реальными могут быть признаны циклы с продолжительностью 2-3, 4 и 12-13 лет, в стоке Кубани - 2-3 года и 7-8 лет. Вопрос о наличии в стоке Кубани 15-летнего цикла остается открытым, однако имеются косвенные показания, позволяющие считать этот цикл реальным. Исходя из значений амплитуды (A) спектральных функций, полученных для наиболее полных стоковых рядов 1876-1969 гг. (Дон) и 1912-1969 гг. (Кубань), значимость циклов располагается в следующей последовательности: для Дона - 13 лет ($A = 8,16$ на

частоте $\omega = 0,483$), 4 года ($A = 7,20$ на $\omega = 1,571$) и 2-3 года ($A = 5,50$ на $\omega = 2,690$), для Кубани - 7-8 лет ($A = 0,57-0,53$ на $\omega = 0,785-0,873$) и 2-3 года ($A = 0,50$ на $\omega = 2,55-2,62$).

Полученные результаты требуют некоторой интерпретации в отношении их сопряженности с циклическими вариациями геофизических процессов и стока других рек.

Как следует из данных расчета, наименьшая по продолжительности гармоника, обнаруженная в колебаниях стока Дона и Кубани составляет 2-3 года. Выражена она сравнительно слабо, ее идентификация оказалась возможной лишь при исследовании спектральных функций. В коррелограмме внутрирядные связи при τ равном 2-3 года, обнаружить не удалось.

В то же время, полученный нами квазидвухлетний цикл стока Дона и Кубани, по-видимому, не является эфемерным. По данным работ /1, 6-10/, в которых проанализированы стоковые ряды основных рек северного полушария, рассматриваемая гармоника входит в состав наиболее часто повторяющихся циклов. Основной причиной, генерирующей указанный цикл, О.Ф.Кондрашова и Н.П.Смирнов /9/ считают аналогичное изменение в ритмике атмосферных циркуляционных процессов в умеренных широтах северного полушария.

Обнаруженный в колебаниях стока Дона четырехлетний цикл имеет аналоги в изменениях интенсивности Гольфстрима, колебаниях материкового стока и солености Балтийского моря /2, 14/. Однако природа этого цикла до настоящего времени не известна.

Реальность полученной для Кубани вариации продолжительностью 7-8 лет, помимо данных корреляционного и спектрального анализов, подтверждается наличием аналогичного цикла в колебаниях стока и других рек северного полушария /1, 7, 8, 11/. По мнению Э.И.Саруханяна и Н.П.Смирнова /13/, этот цикл связан с ритмикой нутационных движений радиус-вектора полюса вращения Земли, вызывающей аналогичные изменения циркуляции вод Мирового океана, перераспределение тепла в его различных областях и, как следствие, соответствующие преобразования атмосферной циркуляции, влияние которой на формирование стока очевидно.

Выделенные при автокорреляционном и спектральном анализе стока Дона и Кубани циклы продолжительностью 12-15 лет, были

идентифицированы рядом исследователей также и для других рек Европы /5, 7, II/. По нашему мнению, эта циклическая вариация генерируется аналогичными изменениями меридиональных процессов в атмосфере, как известно /3, 4/, особенно сильно влияющих на формирование стока в Азовском бассейне.

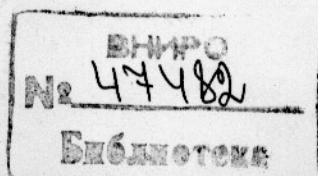
З а к л ю ч е н и е

При объяснении геофизических предпосылок рассмотренных циклических вариаций не ясны причины отсутствия в стоке Дона гармоники продолжительностью 7-8 лет, так хорошо выраженной в стоке Кубани. Обусловленная таким глобальным процессом, как нутационные колебания земной оси, она должна была проявиться и здесь, тем более, что размеры водосбора Дона значительны, а кроме того, эта река сообщается с бассейнами Волги и Днепра, где эта вариация прослеживается достаточно четко. Причины указанного несоответствия циклов следует искать в резко различных условиях питания стока Кубани (ледниковое - 45, грунтовое - 25, дождевое - 25 и снеговое - 5%) и Дона (снеговое - 67, грунтовое 30, дождевое - 3%), однако этот вопрос требует дальнейших исследований.

Список использованной литературы

1. А г а р к о в С.Г., Д р у ж и н и н И.П., К о н о в а - л е н к о З.П. Циклическая структура многолетних колебаний годового стока рек Казахстана и Средней Азии. Изв. АН СССР, сер.географ., 1973, № 6, с.67-79.
2. А н т о н о в А.Е. К вопросу о причинах колебаний солености в Балтийском море. "Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря", сб.3, Рига, 1967, с.3-13.
3. Б р о н ф м а н А.М., С п и ч а к М.К. Некоторые вопросы формирования стока р.Дон в зависимости от характера атмосферной циркуляции. Сб.работ Ростовской ГМО, 1967, вып.6, с.12-20.
4. Г а р г о п а Ю.М. Многолетние колебания стока р.Кубани под влиянием климатических и антропогенных факторов. Изв.Северо-Кавказского научн.центра Высшей школы, сер. естеств.наук, 1973, № I, с.67-71.

5. Гвоздева В.Г. Функции спектральной плотности рядов наблюдений и опыт применения их для анализа циклическости годового стока рек ЕТС. Труды ЛГМИ, 1969, вып.35, с.8-14.
6. Давыдова А.И. Особенности колебаний стока рек различных районов северного полушария. Сб. "Проблемы речного стока", М., Изд-во МГУ, 1968, с.17-28.
7. Калинин Г.П. Проблемы глобальной гидрологии. Л., Гидрометеиздат, 1968, 377 с.
8. Калинин Г.П., Давыдова А.И. Циклические колебания стока рек Северного полушария. Сб. "Многолетние колебания стока и вероятностные методы его расчета" М., Изд-во МГУ, 1968, с.9-21.
9. Кондрашова О.Ф., Смирнов Н.П. Двухлетний цикл в колебаниях стока Верхней Волги. "Биология внутренних вод". Информационный бюлл., 1971, № 12, с.29-37.
10. Кондрашова О.Ф., Смирнов Н.П. Об изменениях периода и амплитуды квазидвухлетнего цикла в стоке рек СССР. "Биология внутренних вод". Информационный бюлл., 1973, № 19, с.52-56.
11. Логинов В.Ф. Некоторые особенности проявления солнечной активности в стоке рек Европы. "Солнечные данные", 1967, № 7, с.27-36.
12. Рождественский А.В. Внутривековые циклические колебания годового стока рек СССР. Труды ЛГМИ, 1968, вып.28, с.69-76.
13. Саруханян Э.И. Смирнов Н.П. Многолетние колебания стока Волги. Л., Гидрометеиздат, 1971, 166 с.
14. Смирнов Н.П. Долгопериодные ритмические явления в деятельности Гольфстрима. Изв. ВГО, 1965, № 5, с.17-26.
15. Смирнов Н.П. Солнечная активность и колебания стока рек СССР. Изв.ВГО, 1974, № 3, с.211-216.
16. Шикломанов И.А., Смирнова Л.Е. Оценка влияния хозяйственной деятельности на сток крупных рек Кавказа. Труды ГГИ, 1973, вып.206, с.92-122.



Main statistical parameters and cyclic
variations in the river discharge in the
Azov Sea

A.M.Bronfman, S.V.Kozlitina,
L.A.Kuchai

S u m m a r y

The functions of the distribution of probabilities, statistical criteria of regularities of their distribution, dispersions, variation coefficients, asymmetry and excess of the runoff of the Don and Kuban rivers are analysed. All characteristics are processed at the computer NAIRI-2. The water schemes constructed recently in the basin have not considerably affected the statistical characteristics of the runoff. On the basis of the spectral analysis the main cyclic fluctuations in the water content in the Don and Kuban rivers are found and their geodesic nature is described in detail.

Том СХУШ	Труды Всесоюзного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО)	1976
-------------	---	------

УДК 31:551.464.5 (262.54)

СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ЗАДАЧЕ ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОЗИРУЮЩИХ ФУНКЦИЙ СОЛЕННОСТИ АЗОВСКОГО МОРЯ

Л.А.Кучай

Проблема обработки наблюдений и их анализа в современных исследованиях весьма актуальна. Интерес представляет получение модели, обладающей максимальной простотой, минимальным числом параметров, и при этом адекватно описывающей наблюдения.

Цель предлагаемой работы – построение модели временного ряда наблюдений S_t , значения которого представляют собой среднегодовую величину солености Азовского моря (в ‰) за период с 1912 по 1969 г. (данные лаборатории гидрологии и гидрохимии (АзНИИРХа)).

При выборе подхода для получения модели S_t были использованы статистические методы анализа временных рядов, в которых наблюдения зависимы, и характер этой зависимости интересен сам по себе.

Процесс построения модели состоит из следующих этапов /2/:

- 1) процесс идентификации (выбор класса модели);
- 2) подгонка идентифицированной модели к временному ряду (использование эмпирических данных для оценки параметров модели);
- 3) проверка модели для выявления неадекватности ее и выработки подходящих изменений.

Особенностью выбранного подхода анализа временных рядов является возможность исследования некоторых нестационарных процессов, а именно процессов со стационарными приращениями n -го порядка (время дискретное) /1/. Такие процессы, в частности, удовлетворяют разностной схеме:

$$W_t = \nabla^n S_t \quad (t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

где S_t - исследуемый временной ряд;

∇ - разностной оператор

($\nabla S_t = S_t - S_{t-1}$, $\nabla^2 S_t = \nabla S_t - \nabla S_{t-1}$ и т.д.);

n - порядок оператора ;

W_t - новый временной ряд, полученный в результате действия оператора ∇^n на исследуемый ряд.

Так как целью анализа временного ряда S_t является прогноз, существенно также и то, что подогапанная статистическая модель позволит определить дисперсию ошибок прогноза и вычислить пределы, в которых с заданной вероятностью будут лежать будущие значения ряда.

Идентификация. Методы идентификации, предложенные в работах /1/ и /2/, используют в качестве основного инструмента автокорреляционную функцию процесса. Автокорреляционная функция процесса, находящегося в статистическом равновесии, имеет тенденцию к затуханию с увеличением задержки. Отсутствие затухания выборочной автокорреляционной функции истолковывается в том смысле, что процесс ведет себя нестационарно, хотя возможно, что ряд ∇S_t , или разности более высокого порядка будут стационарными процессами.

В табл. I представлены значения выборочных автокорреляционных функций процессов. $S_t, \nabla S_t, \nabla^2 S_t$.

Т а б л и ц а I

Значения выборочных автокорреляций процессов $S_t, \nabla S_t, \nabla^2 S_t$.

k	r_k		
	S_t	∇S_t	$\nabla^2 S_t$
I	0,868	0,183	-0,451
2	0,682	0,121	-0,055
3	0,453	-0,036	-0,081
4	0,238	-0,094	-0,032
5	0,091	-0,063	0,093
6	-0,023	-0,203	-0,013
7	-0,054	-0,280	-0,160
8	-0,016	-0,114	0,031
9	0,065	0,011	0,027
10	0,133	0,089	0,085
11	0,168	0,017	-0,056
12	0,192	0,038	0,033

Медленный спад выборочных автокорреляций процесса S_t делает необходимым исследование процессов ∇S_t и $\nabla^2 S_t$ и их корреляционных функций.

Для ряда $\nabla^2 S_t$ автокорреляции малы уже для $k \geq 2$. Это указывает на то, что этот временной ряд может быть описан как процесс скользящего среднего первого порядка [2], который представляет собой линейную систему, где входом служит последовательность независимых случайных величин a_t с фиксированным распределением (обычно нормальным с нулевым средним и дисперсией σ_a^2), а выходом — исследуемый ряд. В общем случае оператор системы выражает текущее значение выходного процесса как линейную комбинацию конечного числа величин a_t , т.е.

$$\nabla^2 S_t = a_t - \sum_{i=1}^q \theta_i a_{t-i},$$

где q — порядок процесса скользящего среднего;
 θ_i — параметры системы.

В рассматриваемом случае $q = 1$ и, следовательно, ряд $\nabla^2 S_t$ идентифицируется моделью

$$\nabla^2 S_t = a_t - \theta a_{t-1}. \quad (1)$$

Оценка параметра модели. Раскрывая оператор ∇^2 модели (1), получим

$$S_t - 2S_{t-1} + S_{t-2} = a_t - \theta a_{t-1},$$

т.е.

$$S_t = 2S_{t-1} - S_{t-2} + a_t - \theta a_{t-1}. \quad (2)$$

Если ищется прогноз значения $S_{t+\ell}$, $\ell \geq 1$, говорят, что прогноз делается в момент t с упреждением ℓ . Из формулы (2) следует, что

$$S_{t+\ell} = 2S_{t+\ell-1} - S_{t+\ell-2} + a_{t+\ell} - \theta a_{t+\ell-1}. \quad (3)$$

Сделанный в работе [2] вывод о том, что прогноз с минимальной среднеквадратической ошибкой в момент t с упреждением ℓ есть условное математическое ожидание $S_{t+\ell}$ в момент t , дает возможность использовать модель в качестве рекуррентной формулы для прогнозирования будущих значений ряда.

Если рассматривать $S_{t+\ell}$ как функцию ℓ при фиксированном t , то $\hat{S}_t(\ell)$ — прогнозирующая функция для момента t :

$$\hat{S}_t(1) = 2S_t - S_{t-1} - \theta a_t \quad \text{для } \ell = 1, \quad (4)$$

$$\hat{S}_t(\ell) = 2\hat{S}_t(\ell-1) - \hat{S}_t(\ell-2) \quad \text{для } \ell \geq 2. \quad (5)$$

При этом последовательность a_t , которая генерирует рассматриваемый процесс S_t , является рядом остаточных ошибок при прогнозировании на шаг вперед /2/, т.е.

$$a_t = S_t - \hat{S}_{t-1}. \quad (I).$$

Этот важный вывод используется для оценки параметра θ выбранной модели, так как совершенно очевидно, что для различных значений θ модель (I) аппроксимирует рассматриваемый ряд наблюдений S_t с различной точностью, и оптимальным будет то значение параметра θ , при котором величина $P(\theta)$ станет минимальной

$$P(\theta) = \sum_{t=1}^m a_t^2(\theta), \quad (6)$$

где N - количество членов рассматриваемого ряда;

n - порядок разностного оператора модели (I) (в рассматриваемом случае $N = 20$, $n = 2$).

Т а б л и ц а 2

θ	$P(\theta)$
0,3	14,26
0,35	13,86
0,4	13,50
0,45	13,19
0,5	12,91
0,55	12,67
0,6	12,49
0,65	12,44
0,7	12,70
0,75	13,54
0,8	15,24
0,85	17,55

В табл.2 представлены значения величины $P(\theta)$ в зависимости от значения θ . Минимальное значение $P(\theta)$ достигается для $\theta = 0,65$

Проверка модели в данной работе основана на анализе остаточных ошибок a_t . Для адекватной модели по мере увеличения длины ряда процесс a_t становится все ближе к белому шуму. Следовательно, последовательные значения a_t должны быть некоррелированы. При изучении автокорреляционной функции $r_k(a)$ воспользуемся общим критерием согласия /2/, который заключается

в том, что если подгоняемая модель удовлетворительна, то величина

$$Q = m \sum_{k=1}^R r_k^2(a)$$

распределена приближенно как $\chi^2 (R-1)$. В табл.3 приведены значения $r_k(a)$ для параметров $\theta = 0,65$ и $\theta = 0,9$, причем последний приведен для сравнения результатов подгонки модели.

Т а б л и ц а 3

Выборочные автокорреляции $a_t(\theta)$

k	$r_k(a)$	
	$\theta = 0,65$	$\theta = 0,9$
I	0,011	0,17
2	-0,06	0,039
3	-0,134	-0,076
4	0,113	-0,11
5	-0,05	-0,057
6	-0,11	-0,169
7	-0,31	-0,339
8	-0,029	-0,083
9	0,037	0,004
10	0,097	0,09
11	-0,02	0,029
12	0,093	0,136
13	-0,031	0,042
14	0,123	0,169
15	0,224	0,253
16	0,201	0,189
17	-0,044	-0,057
18	-0,258	0,273
19	-0,132	-0,192
20	-0,076	-0,155
Q	20,32	27,8

Величины Q сравниваем с таблицей χ^2 с 19 степенями свободы. 90%- и 9%-ные квантили для χ^2 равны соответственно 27,2 и 30,1.

Несмотря на сильное различие параметров $\theta = 0,65$ и $\theta = 0,9$, последний почти укладывается в норму при проверке адекватности модели. Это вызывает сомнения и требует дополнительной проверки.

Если бы процесс a_t был белым шумом, то график его проинтегрированного спектра имел бы разброс относительно прямой, соединяющей точки (0;0) и (0,5; 1). Из-за неадекватности мо-

дели ряд a_t становится неслучайным и его проинтегрированный спектр систематически отклоняется от ожидаемой прямой.

Несмещенная оценка проинтегрированного спектра есть /2/:

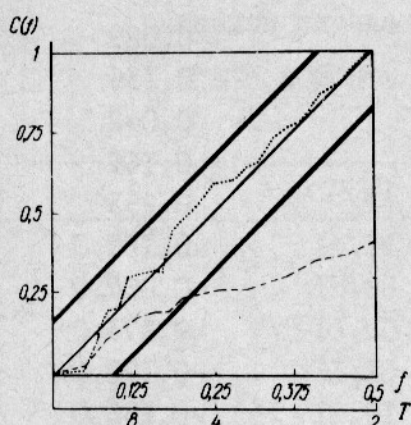
$$C(fj) = \sum_{i=1}^j J(f_i) / m \sigma_a^2,$$

где σ_a^2 - дисперсия процесса a ;

$$J(f_i) = \left[\left(\sum_{t=1}^m a_t \cos 2\pi f_i t \right)^2 + \left(\sum_{t=1}^m a_t \sin 2\pi f_i t \right)^2 \right];$$

$f_i = \frac{i}{m}$ - частота.

Отклонение полученного спектра от ожидаемого для белого шума оценивается при помощи критерия Колмогорова. На рисунке приведены проинтегрированные спектры процессов a_t для $\theta = 0,65$ (точечная линия) и $\theta = 0,9$ (пунктирная линия). Эта дополнительная проверка показывает, что процесс a_t для $\theta = 0,9$ не обладает свойствами белого шума, и что оценка параметра θ была произведена верно.



Прогнозирование. Наиболее удобной формой модели, используемой при прогнозировании, являются рекуррентные формулы (4)-(5). Табл.4 представляет собой наглядную схему вычислений прогнозов по этим формулам. Доверительные интервалы, приведенные в схеме, строятся исходя из предположения, что a_t подчиняется нормальному закону распределения /2/.

Существует еще одна форма модели (I), которая может быть использована при прогнозировании, так как дает возможность выразить значение S_{t+l} как бесконечно взвешенную сумму предыдущих наблюдений и импульса a_{t+l} т.е.

$$S_{t+l} = \sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j S_{t-j+l} + a_{t+l}. \quad (7)$$

Веса α_j можно получить из обращенной формы модели (I) /2/.

В табл.5 представлены веса α_j для $\theta = 0,65$.

Т а б л и ц а 4

Схема вычисления прогнозов

t	Момент начала прогно- за	S_t	a_t	Время упреждения ρ					
				1	2	3	4	5	6
				Доверительные интервалы					
				50%					
				$\pm 0,57$	$\pm 0,82$	$\pm 1,08$	$\pm 1,37$	$\pm 1,67$	$\pm 1,99$
				95%					
				$\pm 1,66$	$\pm 2,38$	$\pm 3,15$	$\pm 3,98$	$\pm 4,86$	$\pm 5,79$
1946		9,9							
1947	Н	10,4							
1948		10,5	+0,4	10,9					
1949		11,3			11,2				
1950		11,6				11,5			
1951		11,9					11,8		
1952		12,1						12,8	
1953	Н	12,4							12,4
1954		11,8	+0,9	12,7					
1955		12,3			12,43				
1956		11,9				12,1			
1957		11,1					11,8		

Т а б л и ц а 5

Веса α_j для модели (7)

j	1	2	3	4	5
α_j	1,37	-0,137	-0,086	-0,054	-0,034
j	6	7	8	9	
α_i	-0,022	-0,140	-0,008	-0,005	-0,0

В табл.6 приведены значения прогнозов ряда S_t , просчитанные по весам α_j с 1971 по 1974 г. Здесь же для сравнения приведены значения S_t .

Т а б л и ц а 6

Прогнозы S_t , рассчитанные с помощью весов α_j

Год	Прогноз S_t	Измерение S_t
1971	11,83	11,8
1972	12,20	12,3
1973	12,57	12,6
1974	12,87	12,9

З а к л ю ч е н и е

Приведенная модель является лишь начальным этапом в использовании статистического подхода для прогнозирования процесса S_t , однако она, безусловно, полезна для дальнейших исследований в этом направлении.

Список использованной литературы

1. Г.Дженкис, Д.Ваттс. Спектральный анализ и его приложение. М., "Мир", 1971, с.
2. Дж.Бокс, Г.Дженкис. Анализ временных рядов, прогноз и управление. М., "Мир", 1974, с.

A statistical approach to the problem
of constructing forecasting functions
of salinity in the Azov Sea.

L.A.Kuchai

S u m m a r y

The problem of modelling a time series is discussed. A parametric model with a single parameter representing the mean annual salinity in the Azov Sea is suggested. It may forecast the basic time series one or two years in advance. The adequacy of the model is checked up using the data of actual observations.

УДК 639.053.1

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ВОСПРОИЗВОДСТВА
ПРОХОДНЫХ РЫБ АЗОВСКО-КУБАНСКОГО РАЙОНА

Ю.М.Гаргопа, С.В.Козлитина

Бассейн Кубани и территории, зависимые от него в водохозяйственном отношении, отличаются, с одной стороны, ограниченными ресурсами речных вод, а, с другой, — быстрыми темпами развития производительных сил.

При планируемом развитии орошаемого земледелия, на нужды которого идет 80% безвозвратных изъятий из бассейна, водные ресурсы Кубани через 5–6 лет в средневодные годы будут исчерпаны, а при стоке на 75% превышающих обеспеченности будут испытывать дефицит. Чтобы его устранить, даже при минимальном варианте развития орошения, потребуется перебрасывать из Волги к 1985 г. — 2 км³, к 1990 г. — 3 км³ и к 2000 г. — около 6 км³ речных вод.

Прогрессирующая напряженность водохозяйственного баланса в бассейне Кубани на фоне осолонения Азовского моря вызывает необходимость научного обоснования требований к водным ресурсам реки для рыб, наиболее ценных видов. Причем актуальность этой проблемы возрастает в связи с зарегулированием стока Кубани Краснодарским водохранилищем. Решить ее можно лишь при помощи установления количественных зависимостей эффективности естественного воспроизводства рыб ценных видов от абиотических и биотических факторов среды, и в первую очередь таких, которые поддаются регулированию.

Длительных и надежных характеристик абиотических и особенно биотических факторов нет, поэтому нами использовались косвенные показатели. Например, для оценки условий жизни рыб в море брались не ареалы обитания, а соленость воды, которая в конечном счете и определяет площади нагула молоди и взрослых рыб. Чтобы определить влияние водного и термического режимов на воспроизводство рыбных запасов использовали данные

о речном стоке, температуре воздуха и воды на различных стадиях онтогенеза.

Масштабы естественного воспроизводства устанавливали по промысловому возврату поколений кубанской севрюги (1917-1956) ее суммарным запасам, количеству в них взрослых особей (1923-1964 гг.) и уловам в период до лимитирования промысла (1928-1957 гг.) (данные Е.Г.Бойко и Э.В.Макарова). Эффективность размножения рыба и шемаи определяли по материалам Аверкиева о суммарных и отдельных для каждой из этих рыб улова (за 1927-1957 гг.), причем не только по Азовско-Кубанскому району, но и по Азовскому морю в целом.

При исследованиях количественных зависимостей естественно-го воспроизводства кубанской севрюги от условий обитания и размножения с помощью ЭВМ "Наири-2" и "Минск-22" основными из них были - водный режим на нерестилищах ($r = 0,60-0,79$) в период размножения; соленость воды в море ($r = -0,62 - -0,82$) во время ската и нагула молоди; термический режим зимы ($r = -0,51 - -0,64$) и весны ($r = -0,67$), предшествующих нересту; сток Кубани через устья ($r = 0,39 - 0,57$) во время хода производителей и ската молоди.

В многоводные годы расширяется площадь и глубина нерестилищ, увеличиваются скорости течения, что способствует рассеиванию икринок севрюги, хорошей аэрации, препятствует заилению кладок икры. Повышенная мутности воды ($r = 0,70 - 0,79$) препятствует выеданию икры и молоди хищной и сорной рыбой. Вследствие повышенного стока Кубани через устья расширяются опресненные зоны в море, что создает благоприятные условия для нереста и ската производителей, а также для выживания и нагула молоди.

Коэффициенты корреляции между промысловым возвратом и количеством самок, самцов, общим числом производителей кубанской севрюги, выловленных на местах нереста в 1928-1949 гг., оказались отрицательными и равными соответственно $-0,56$; $-0,77$ и $-0,80$. При высокой численности производителей и относительно малых нерестовых площадях нерестилища перенасыщаются икрой, вследствие чего она гибнет.

Зависимость величин промыслового возврата (1930-1956 гг.), уловов 1930-1941, 1946-1957 гг., суммарных (1930-1941, 1946-1957) запасов и количества взрослых особей (1930-1941,

1946-1964 гг.) кубанской севрюги от абиотических факторов может быть представлена уравнениями множественной корреляции, первое из которых имеет следующий вид:

$$Y = 52,4420452 X_1 - 3,9520871 X_2 - 0,0278850 X_3 - \\ - 1,2881836 X_4 - 28,0045320 X_5 + 1,2219384 X_6 + 338,6124839,$$

где Y - промысловый возврат поколений кубанской севрюги, тыс.шт.;

X_1 - сток Кубани у станицы Темжбекской в период нереста (май-август), км³;

X_2 - сток Кубани в море через устья Протоки, Петруш. рукава, Пересыпское гирло в период хода производителей и ската молоди севрюги (апрель-август), км³;

X_3 - сумма среднемесячных температур воздуха по данным ГМС Приморско-Ахтарска за зиму (декабрь-февраль), предшествующую нересту, °С;

X_4 - сумма среднемесячных температур воды в реке Кубани у г.Краснодара в период нереста (май-август), °С;

X_5 - среднегодовая соленость собственно Азовского моря, ‰;

X_6 - сумма среднемесячных температур воды в Кубани у г.Краснодара весной (март-апрель), предшествующей нересту, °С.

Коэффициенты множественной корреляции вполне удовлетворительны и равны для уловов 0,71, промыслового возврата 0,77 и запасов кубанской севрюги 0,89. Полученные уравнения достаточно хорошо аппроксимируют процесс естественного воспроизводства севрюги и могут быть использованы для установления оптимальных величин обводнения нерестилищ, попусков из Краснодарского водохранилища для привлечения производителей, ската молоди и необходимых для ее выживания и нагула опресненных зон.

"Схемой комплексного использования и охраны водных ресурсов Азовского моря" предусмотрен ежегодный вылов кубанской севрюги в 9 тыс.ц. Из расчетов следует, что при солености Азовского моря 9,5-10,5 ‰, ожидаемой после перекрытия Керченского пролива, при средних климатических условиях и при нормальных условиях миграций производителей и ската молоди, чтобы получить такой улов, необходимо подавать на нерестилища в мае-августе в среднем 2,94 км³ при колебаниях от 2,64 до 3,24 км³.

Суммарный сток Кубани в море за апрель-август через устья Протоки, Петрушина рукава и Пересыпское гирло должен составлять около 6 км^3 (от $5,6$ до $6,5 \text{ км}^3$). При осолонении Азовского моря до $13,5\text{‰}$ и более сток, необходимый для получения нужного промыслового возврата кубанской севрюги, превысит естественную водность реки у г.Кропоткина 1% , а у Краснодара 36% обеспеченности.

Полученные с помощью математического моделирования процесса естественного воспроизводства севрюги оптимальные объемы пусков на нерестилища среднего течения реки и через ее устья в море близки к водному режиму, характерному для самых урожайных для этого вида рыб лет. Так, в 1928-1930 и 1943 гг., исключительно эффективных для воспроизводства кубанской севрюги, сток Кубани у станицы Темихбекской составлял в период размножения около 3 км^3 , а в море через устья во время хода производителей и ската молоди поступало в среднем $6,3 \text{ км}^3$ речной воды.

Зависимость естественного воспроизводства рыбца и шемаи от абиотических факторов несколько иная, чем у осетровых, иногда диаметрально противоположная. Наибольшее значение для воспроизводства рыбца и шемаи имеет водность нерестовых рек и Кубани в период размножения ($r = -0,66 \pm 0,71$ и $r = -0,63 \pm 0,80$ соответственно) и во время хода производителей ($r = -0,27 \pm 0,49$). После суровых зим эффективность нереста этих проходных рыб возрастает ($r = -0,37 \pm 0,50$). Зависимость между температурой воды в нерестовых реках в мае-июле и последующими уловами рыбца и шемаи положительна (соответственно $r = 0,54 \pm 0,58$ и $r = 0,55 \pm 0,85$). Влияние солености воды в море на воспроизводство рыбца и шемаи для периода 1927-1941 гг., когда сток левобережных притоков Кубани еще не был зарегулирован, менее значительно ($r = -0,37 \pm 0,38$).

Продвижение производителей рыбца и шемаи в Кубань и ее притоки задерживается паводками, вызывающими помутнение воды. Особенно чувствительна к чистоте воды шемая. Коэффициенты корреляции между ее уловами и стоком Кубани в октябре-декабре, в год, предшествующий появлению поколений, формирующих запасы, равны минус $0,62 \pm 0,82$. Паводки на реках, повышающие мутность воды и вызывающие обвалы и перекачивание гальки и валунов, прерывают нерест - способствуют заиливанию икринок и гибели

личинок. Летом во время паводков часть неокрепшей еще молоди сносится в низовья нерестовых рек, затем в Кубань и море, где при высокой солености молодь, не достигшая четырехмесячного возраста, может погибнуть. Поэтому многоводные годы, для которых характерны многочисленные паводки, неурожайны, что обуславливает понижение запасов и уловов рыба и шемаи /2,4/.

Выявление количественных зависимостей колебаний уловов рыба и шемаи от абиотических факторов дало возможность получить на ЭВМ уравнения, описывающие процесс естественного воспроизводства этих видов рыб. Коэффициенты множественной корреляции относительно высоки (0,78-0,83) и уравнения удовлетворительно моделируют особенности формирования уловов рыба и шемаи, как для суммарных величин так и для каждого вида рыб. Одно из этих уравнений, рассчитанное для уловов шемаи, наиболее требовательной к среде обитания, имеет следующий вид:

$$Y = 0,116 X_1 - 0,494 X_2 - 0,548 X_3 + 0,135 X_4 + 0,029 X_5 - 0,012,$$

где Y — уловы шемаи в Азовско-Кубанском районе, тыс.ц;

X_1 — средний сток нерестовых рек в мае-июле за второй и третий годы перед уловами, км³;

X_2 — средний сток Кубани в устьях в период хода производителей шемаи (октябрь-март) за второй и третий годы перед уловами, км³;

X_3 — среднегодовая соленость собственно Азовского моря за второй и третий годы перед уловами, ‰;

X_4 и X_5 — сумма среднемесячных температур воздуха по г.Приморско-Ахтарску в период нереста (май-июль) и зимой (декабрь-февраль) за второй и третий годы перед уловами шемаи, °С.

Решение этого и других уравнений в расчете на средние климатические условия показывает, что получение максимальных запасов и уловов рыба и шемаи возможно при объемах стока в периоды размножения и миграций производителей, близких к объему стока нерестовых рек и Кубани 80-90% обеспеченности.

Полученные выводы подтверждаются тем, что наиболее урожайными поколения рыба и шемаи, обеспечившие максимальные уловы в 1932 и 1938 гг., были при суммарном стоке нерестовых рек в Кубань, равным в период размножения около 1,8 км³. Суммарные

расходы воды по устьям Кубани в сентябре-декабре года, предшествующего появлению поколений, обеспечивших высокие промысловые уловы, изменялись от 80 до 198 м³/сек. При этом в период массового хода производителей рыба и шемаи водность Кубани на замыкающих створах снижалась до 80-90 м³/сек. Такие расходы воды, соответствующие естественному стоку Кубани у г.Краснодара 99% обеспеченности, могут считаться наиболее благоприятными для миграций производителей рыба и шемаи к местам нереста.

З а к л ю ч е н и е

Таким образом, полученный с помощью математического моделирования процесса естественного воспроизводства проходных рыб оптимальный объем попусков из Краснодарского водохранилища через Пересыпское гирло, Петрушин рукав и устье Протоки, необходимый для создания благоприятных для севрюги, рыба и шемаи условий обитания в реках и море, равен около 6,9 км³.

Список использованной литературы

1. Аверкиев Ф.В. Сборник статистических сведений об уловах рыбы и нерыбных объектов в Азовско-Черноморском бассейне за 1929-1959 гг. Труды АзНИИРХ, т. I, вып. I, 1960, с. 3-91.
2. Гаргопа Ю.М. Зависимость уловов проходных и полупроходных рыб Азовско-Кубанского района от абиотических факторов. "Вопросы изучения и освоения Азовского моря и его побережий", 1974, с. 46-47.
3. Мусатова Г.Н. Осетровые рыбы реки Кубани и их воспроизводство. г.Краснодар, 1973, с. 3-III.
4. Суханова Е.Р. Размножение кубанских рыба и шемаи и биология их молоди в речной период жизни. Труды зоологического института АН СССР, т. XXVI, 1959, с. 44-95.

Modelling of natural reproduction of
anadromous fish from the Azov Sea -
Kuban River basin

Yu.M. Gargopa
S.V. Kozlitina

S u m m a r y

The processing of data at the computer has resulted in obtaining several equations of multiple correlation which approximate satisfactorily the relationship among natural reproduction of stellate sturgeon, vimba, shemaya and the Kuban runoff, temperature of air and water, salinity of the Azov Sea observed at various stages of ontogenesis. To reach a satisfactory level of reproduction of sturgeon it is necessary to supply the spawning grounds situated in the middle part of the Kuban River with water in the amount of about 3 km^3 in May-August; the river discharge in the estuaries should average 6 km^3 in April-August and the flow rate in the estuaries should not exceed $90 \text{ m}^3/\text{sec.}$ during the spawning run in September-December. On the whole, the optimum river discharge volume needed for stellate sturgeon, vimba and shemaya in the downstream part of the Kuban River and pre-estuary area is equal to 6.9 km^3 .

УДК 639.2/3+517

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
ПРИ ОБОСНОВАНИИ ТРЕБОВАНИЙ РЫБНОГО ХОЗЯЙСТВА
К ВОДНЫМ РЕСУРСАМ НИЖНЕГО ДОНА

В.Г.Дубинина, С.В.Козлитина

Интенсивное развитие различных отраслей народного хозяйства в бассейне Азовского моря и резкое увеличение водопотребления в связи с этим существенно влияет на гидрологический режим водоемов и состояние водных ресурсов. Объем безвозвратных изъятий стока Дона и Кубани в современных условиях превышает 11 км^3 , что составляет более 25% полного годового объема стока в Азовское море. Вследствие увеличения изъятий стока рек, зарегулирования рек водохранилищами и гидроузлами ухудшились условия размножения рыб и их жизни в море, миграций производителей к местам нереста и уменьшились площади нерестилищ, что в свою очередь снизило уровень естественного воспроизводства проходных и полупроходных рыб.

Рациональное использование водных ресурсов бассейна Азовского моря в значительной мере определяется размерами водопотребления отдельных отраслей хозяйства и прежде всего их требованиями к объему и режиму попусков из водохранилищ. Решение вопроса усложняется тем, что интересы предприятий-водопотребителей не только не совпадают, но и находятся в противоречии.

В данной работе сделана попытка применить математические модели для обоснования требований рыбного хозяйства к водным ресурсам Нижнего Дона.

Биологическим тест-объектом служили запасы судака и леща-представителей наиболее массовых популяций ценных рыб бассейна.

Цель первой из поставленных задач - получить и исследовать вероятности формирования максимального, минимального и среднего запаса судака при различных значениях среднегодовой солености моря, годового и весеннего стока Дона. Математически

аппаратом служил метод статистических испытаний Монте-Карло. Все расчеты выполнялись на ЭВМ "Наири-2".

Уровни запасов судака (исходя из динамики его численности в период 1925-1973 гг. и кривой обеспеченности) были приняты равными 1400, 930 и 430 тыс.ц, соответствующими 25, 50 и 75% обеспеченности. Методом многомерного регрессионного анализа была найдена зависимость запасов судака от абиотических факторов, значение которых в процессе воспроизводства было доказано специальными исследованиями /1,2,5-9/. В данную модель был введен и биотический фактор - запасы судака в предыдущий период, так как прослеживается явно выраженная приемственность, проявляющаяся в высоком коэффициенте корреляции (0,92).

Было установлено, что речной сток непосредственно с запасами полупроходных рыб коррелирует слабо. Коэффициент корреляции (r) между запасом судака и суммарным годовым стоком рек Дона и Кубани равен 0,12, а между запасом и весенним стоком Дона - 0,32. Связь же запасов с соленостью моря достаточно велика ($r = 0,75$), поэтому решено было учесть влияние стока на запасы через соленость и выразить это зависимость

$$S_i = f(S_{i-1}, Q_{i-1}^{год}, Q_i^{вес}), \quad (1)$$

где S_i и S_{i-1} - среднегодовая соленость Азовского моря соответственно текущего и предыдущего года;
 $Q_{i-1}^{год}$ - среднегодовой сток Дона за предыдущий период;
 $Q_i^{вес}$ - весенний сток Дона текущего года.

Ошибка уравнения - 2,3%, коэффициент корреляции - 0,94.

При построении моделей выбирали показатели среды, в наибольшей мере определяющие выживаемость молоди полупроходных рыб. Поскольку в стаде судака преобладают трех- и четырехлетки, то в модель вводились гидрометеорологические характеристики, отражающие эффективность нереста и условия выживаемости молоди в море в первый год жизни поколений трехлетков судака.

Для дальнейших исследований использовалось уравнение связи

$$y_i = f(S_i, t_{i-4}^{X-XI}, t_{i-3}^{зим.}, C_{V_{i-3}}, W_{i-3}, y_{i-1}), \quad (2)$$

где y_i и y_{i-1} — запасы судака соответственно текущего и предыдущего года;

S_i — соленость текущего года, рассчитывается по формуле (I);

t_{i-4}^{x-xII} — средняя температура воды в море осенью в предзимний нагул производителей;

$t_{i-3}^{зим.}$ — средняя температура воздуха зимой в год нереста;

C_{Vi-3} — коэффициенты вариации весенних температур в год нереста;

W_{i-3} — число дней с ветром более 8 м/сек в год нереста.

Средняя ошибка уравнения — 20,4%, коэффициент корреляции — 0,94.

Затем зависимости (I) и (2) были использованы для определения вероятностей формирования заданного уровня запасов судака при различных значениях среднегодовой солености моря и стока Дона.

Алгоритм задачи следующий. Запас предыдущего года, входящий в формулу (2), принят постоянным и равным 100 тыс.ц. Соленость S_i рассчитывается по формуле (I) для фиксированных значений стока и солености предыдущего года. Гидрометеорологические факторы определяются с помощью датчика случайных чисел с нормальным законом распределения и заданными параметрами (математическим ожиданием и дисперсией).

Для определения вероятностей получения соответствующей величины запаса при фиксированной солености вычисляется 500 значений Y (N) и частоты появления (m_i) $Y \geq 1400$, $430 < Y < 1400$ и $Y < 430$ тыс.ц. Вероятность определяется по формуле:

$$P(Y \geq y_i) = \frac{m_i}{N}.$$

Во всех расчетах использованы одни и те же последовательности случайных чисел. Поэтому запасы судака колеблются только за счет изменения стока и солености.

Из данных, представленных в табл. I, следует, что при исходном запасае судака 100 тыс.ц и оптимальной среднегодовой солености (10,6‰), даже при годовом стоке до 30 км³ и весеннем до 20 км³, вероятность получения запаса на следующий год на уровне среднегодового равна нулю.

Т а б л и ц а I

Вероятности получения заданных запасов судака (тыс.ц)
в зависимости от солености моря и водного режима Дона

Весен- ний сток, км ³	Годовой сток, км ³								
	20			25			30		
	$P_i(y < 480)$	$P_i(y > 480)$	сред- ний запас	$P_i(y < 480)$	$P_i(y > 480)$	сред- ний запас	$P_i(y < 480)$	$P_i(y > 480)$	сред- ний запас
<u>Соленость 10,6⁰/оо</u>									
5	0,86	0,14	342	0,81	0,19	360	0,76	0,24	377
12	0,70	0,30	391	0,61	0,39	402	0,52	0,48	427
14	0,64	0,36	405	0,55	0,45	423	0,44	0,56	441
20	0,42	0,58	447	0,34	0,66	465	0,25	0,75	483
<u>Соленость 11⁰/оо</u>									
5	0,97	0,03	281	0,96	0,04	299	0,93	0,07	315
12	0,89	0,11	330	0,84	0,16	348	0,78	0,22	366
14	0,85	0,15	344	0,80	0,20	362	0,74	0,26	380
20	0,72	0,28	386	0,64	0,36	404	0,55	0,45	422
<u>Соленость 12⁰/оо</u>									
5	1,0	0,0	129	1,0	0,0	145	1,0	0,0	165
12	1,0	0,0	178	1,0	0,0	196	1,0	0,0	214
14	1,0	0,0	192	1,0	0,0	210	0,99	0,01	228
20	0,99	0,01	234	0,99	0,01	252	0,98	0,02	270
<u>Соленость 13⁰/оо</u>									
5	1,0	0,0	0	1,0	0,0	0	1,0	0,0	0
12	1,0	0,0	26	1,0	0,0	44	1,0	0,0	62
14	1,0	0,0	40	1,0	0,0	58	1,0	0,0	76
20	1,0	0,0	82	1,0	0,0	100	1,0	0,0	118

При оптимальной солености моря, годовом стоке 25 и весен-
нем 5 км³ величина запаса увеличивается по сравнению с пред-
дущей (100 тыс.ц) более чем в трие и достигает в среднем
360 тыс.ц, а при весеннем стоке 14 и 20 км³ - соответственно
420 и 465 тыс.ц.

При повышении солености вероятность формирования запасов
судака более 430 тыс.ц резко падает. Так, например, при соле-
ности моря 10,6⁰/оо, годовом стоке 25 км³ и весеннем 14 км³
она равна 0,45, при той же воде и солености 11⁰/оо - 0,20, а
при солености 12-13⁰/оо - нулю.

При средней солености моря $13^0/00$, весеннем стоке 5 км^3 и годовом – от 20 до 30 км^3 величина запаса судака практически падает до 0. При возрастании весеннего стока до 20 км^3 и том же годовом стоке запасы можно поддерживать на исходном уровне (100 тыс.ц). Итак, при сложившемся современном солевом режиме моря ($13^0/00$) запасы судака на следующий год в зависимости от водного режима могут только снижаться или оставаться на уровне исходных.

Цель второй задачи – исследовать колебания запасов судака и леща в зависимости от повторяемости стока Дона и среднегодовой солености моря.

Для решения этой задачи были использованы эмпирические модели:

$$\text{для судака} \quad y_i = f(y_{i-1}, S_i) \quad (3)$$

(коэффициент корреляции – 0,94, ошибка уравнения – 20,5%);

$$\text{для леща} \quad z_i = f(z_{i-1}, S_i) \quad (4)$$

где z_i и z_{i-1} – запасы леща текущего и предыдущего года (коэффициент корреляции – 0,98, ошибка уравнения – 10,3%).

Весенний и годовые стоки принимают постоянными в течение ряда лет. Соленость, рассчитываемая по уравнению (1), так же как и запасы рыб величина не постоянная, поэтому каждое последующее значение вычислялось через предыдущее. Таким образом, можно наблюдать, как в многолетнем аспекте меняются запасы и соленость моря, если сток Дона имеет заданные значения (весенний 5, 12 и 14 км^3 , годовой – 20, 25 и 27 км^3).

Результаты выборки из табуляграммы представлены в табл. 2

При начальной солености моря $13^0/00$ и весеннем стоке 5 км^3 даже при годовом стоке 27 км^3 соленость моря снижается только до $11,4^0/00$. Оптимизация солевого режима моря ($10,6^0/00$) достигается при весеннем стоке 12 км^3 , причем при годовом стоке 25 км^3 через 15 лет, а при годовом стоке 27 км^3 – через 10 лет. При весеннем же стоке 14 км^3 оптимальная соленость наступает при годовом стоке 20 и 27 км^3 соответственно через 16 и 6 лет.

Т а б л и ц а 2

Изменение солености (‰), ареалов (тыс. км²),
запасов судака и леща (тыс. ц) от водного режима

Расчетный период, годы	5 км ³				12 км ³				14 км ³			
	S	F ₀₋₇	У	z	S	F ₀₋₇	У	z	S	F ₀₋₇	У	z
Исходная соленость 10,6‰/00												
Годовой сток 20 км ³												
I	10,91	3,78	298	326	10,67	4,12	343	354	10,60	4,22	356	362
5	11,57	2,80	452	350	10,81	3,92	794	598	10,60	4,22	892	670
10	11,81	2,42	317	216	10,87	3,85	918	718	10,60	4,22	1090	862
15	11,87	2,33	228	110	10,88	3,83	937	763	10,60	4,22	1139	950
20	11,89	2,30	192	51	10,88	3,83	938	781	10,60	4,22	1151	990
Годовой сток 25 км ³												
I	10,82	3,91	314	336	10,58	4,24	360	364	10,51	4,34	372	372
5	11,29	3,23	577	442	10,54	4,30	920	690	10,32	4,58	1018	760
10	11,47	2,96	538	401	10,52	4,32	1139	902	10,25	4,66	1310	1046
15	11,51	2,90	488	350	10,52	4,33	1197	1003	10,23	4,68	1399	1189
20	11,52	2,88	466	319					10,23	4,68	1425	1258
Годовой сток 27 км ³												
I	10,79	3,96	321	340	10,54	4,29	366	368	10,47	4,38	379	376
5	11,33	3,39	626	474	10,42	4,44	970	726	10,21	4,71	1068	797
10	11,36	3,18	593	446	10,38	4,50	1227	976	10,11	4,82	1399	1120
15	11,37	3,12	576	426	10,37	4,51	1301	1099	10,09	4,85	1503	1285
20	11,37	3,11	570	416	10,37	4,52	1322	1156	10,08	4,85	1535	1365

Продолжение таблицы 2

Расчетный период, годы	5 км ³				12 км ³				14 км ³			
	S	F ₀₋₇	y	z	S	F ₀₋₇	y	z	S	F ₀₋₇	y	z
Исходная соленость 13 ⁰ /00												
Годовой сток 20 км ³												
I	12,73	0,93	106 ^x /	216 ^x /	12,49	1,34	9	145	12,42	1,45	22	153
5	12,17	1,85	152 ^x /	168 ^x /	11,41	3,05	246	154	11,19	3,38	344	225
10	11,96	2,19	211 ^x /	163 ^x /	11,02	3,64	645	404	10,75	4,02	817	548
15	11,91	2,27	245 ^x /	168 ^x /	10,92	3,78	835	592	10,63	4,17	1037	779
20	11,90	2,29	260 ^x /	173 ^x /	10,89	3,81	904	696	10,61	4,21	1117	905
25	11,89	2,29	265 ^x /	176 ^x /	10,89	3,82	927	748	10,60	4,22	1144	967
30	11,89	2,29	267 ^x /	177 ^x /	10,89	3,82	934	773	10,60	4,22	1150	990
Годовой сток 25 км ³												
I	12,64	1,08	0	127	12,40	1,48	26	155	12,33	1,60	38	163
5	11,89	2,30	29	0	11,13	3,47	372	245	10,92	3,78	470	316
10	11,61	2,74	265	87	10,67	4,13	866	589	10,40	4,48	1038	732
15	11,55	2,84	387	179	10,55	4,28	1095	832	10,27	4,64	1300	1018
20	11,53	2,87	433	234	10,52	4,32	1178	964	10,24	4,67	1391	1173
25	11,52	2,87	448	262	10,52	4,33	1206	1030	10,23	4,68	1422	1250
30	11,52	2,88	453	276	10,51	4,33	1214	1062	10,23	4,68	1432	1286

Продолжение таблицы 2

Расчетный период, годы	5 км ³				12 км ³				14 км ³			
	S	F ₀₋₇	y	z	S	F ₀₋₇	y	z	S	F ₀₋₇	y	z
Годовой сток 27 км ³												
I	12,61	1,14	0	130	12,36	1,54	32	159	12,29	1,66	45	167
5	11,78	2,48	80	33	11,02	3,63	422	281	10,80	3,94	520	352
10	11,47	2,95	353	161	10,53	4,31	954	662	10,26	4,65	1126	806
15	11,40	3,06	491	275	10,41	4,47	1199	928	10,12	4,81	1401	1114
20	11,38	3,09	542	342	10,38	4,50	1288	1072	10,09	4,84	1501	1280
25	11,38	3,10	559	375	10,37	4,51	1317	1145	10,08	4,85	1533	1362
30	11,37	3,10	565	392	10,37	4,52	1326	1177	10,08	4,86	1543	1402

х/ Данные получены по степенной зависимости.

Для поддержания оптимальной солености необходимо подавать в море ежегодно 14 км^3 воды весной и 20 км^3 в течение года, или 12 и 25 км^3 соответственно. Таким образом, увеличение весеннего стока на 1 км^3 эквивалентно увеличению годового стока на 2 км^3 .

Для молоди судака, которой благоприятна соленость до 9‰ , оптимальными принимались ареалы в среднем $5,6 \text{ тыс. км}^2$; для молоди леща, которой благоприятна соленость 7‰ , — $4,2 \text{ тыс. км}^2$ /3/.

Расчет проводился для площадей с соленостью $0-7\text{‰}$ (F_{0-7}). Исследовалось уравнение вида

$$F_{0-7} = -42,9I + \frac{849,8}{S_i} - \frac{3712,9}{S_i^2}. \quad (5)$$

Коэффициент корреляции — $0,991$; S_i рассчитывалось по зависимости (I).

Поскольку определяющим фактором в формировании зон обитания молоди полупроходных рыб является соленость, то закономерности ее изменений закономерны и для ареалов, что подтверждается данными табл.2.

Изменение солености на 1‰ влечет за собой увеличение или уменьшение площадей нагула на 1200 км^2 .

На величину ареала в большей степени, чем годовой, влияет весенний сток Дона, уменьшение которого на 1 км^3 приводит к сокращению ареалов на 105 км^2 . (уменьшение на 1 км^3 годового стока — на 30 км^2).

При создавшемся солевом режиме моря (13‰) зоны обитания молоди не достигают оптимальных величин в течение 5 лет, даже при реализации требуемых рыбохозяйственных попусков (весеннего — 14 км^3 , годового — 27 км^3), хотя именно в этот период происходит наибольший прирост площадей.

Установленные закономерности характерны и для площадей с соленостью $0-9$ и $0-11\text{‰}$.

Приведенные выше модели позволили количественно оценить изменения популяции полупроходных рыб от среднегодовой солености моря и водного режима Дона.

Первоначальные запасы были приняты на уровне современных (судака — 100 и леща — 250 тыс. ц). Были использованы как ли-

нейные, так и степенные модели. Линейные лучше аппроксимируют эмпирические ряды запасов полупроходных рыб, но в условиях повышенной солености ($13^0/00$), постоянном весеннем стоке 5 км^3 и годовом — 20 км^3 экстраполяция приводит к отрицательным значениям. В этом случае использовали степенную зависимость. Ошибки уравнений — 19,4% (для судака) и 12% (для леща).

При исходной солености моря $13^0/00$, весеннем стоке 5 км^3 запасы полупроходных рыб не достигают среднемноголетних значений даже при годовом стоке 27 км^3 , причем биомасса судака увеличивается по сравнению с исходными в 3,5 раза только на 10-й год, а биомасса леща за этот период не достигает даже первоначальных значений; при повышении весеннего стока до 14 км^3 запасы судака возрастают в 11, а леща — в 3 раза, что объясняется более значительным приростом зон обитания судака. Согласно данным А.М.Бронфмана /4/, в период естественного режима стока ареалы обитания судака составляли 93,6% от общей акватории моря, а леща — всего 33%. К 1972 г. (при средней солености моря $12,3^0/00$) они уменьшились до 14,3 и 10,6% соответственно), т.е. зоны обитания судака сократились почти в семь, а леща в три раза. При повышении же весеннего стока, как уже было показано выше, зоны с оптимальной соленостью резко увеличиваются для судака и менее значительно — для леща.

При оптимизации солевого режима благоприятные условия для увеличения популяции полупроходных рыб создаются при весеннем стоке не менее 12 км^3 .

Наибольшую роль в формировании запасов полупроходных рыб играет весенний сток: его повышение на 1 км^3 увеличивает запасы судака и леща на 9 и 11% (увеличение годового — на 5 и 6% соответственно).

Данные, представленные в табл.2, подтверждают ранее высказанное суждение /3/ о том, что соленость является основным экологическим фактором в формировании популяции полупроходных рыб. Уменьшение или увеличение весеннего и годового стока на 1 км^3 приводит к колебаниям запасов полупроходных рыб на 40 и 80 тыс.ц, тогда как трансформация солености на $1^0/00$ изменяет запасы на 230–400 тыс.ц.

В ы в о д ы

1. При сложившейся современной солености моря (13⁰/оо) для ее снижения, создания необходимых зон обитания и приведения численности популяции полупроходных рыб к среднегодовым значениям, требуются в течение шести лет весенние попуски объемом 14 км³ (при годовом стоке Дона 27 км³ и при общем материковом стоке в Азовское море — не менее 43 км³).

2. Для поддержания оптимального солевого режима и дальнейшего увеличения запасов полупроходных рыб необходимо подавать в море ежегодно 14 км³ донской воды весной и 20 км³ в течение года или 12 и 25 км³ соответственно, при общем материковом стоке в Азовское море не менее 39 км³.

В условиях современного и перспективного изъятия речного стока, подача такого количества воды в Азовское море возможна лишь при переброске стока в объеме, полностью компенсирующем безвозвратное изъятие (порядка 30 км³ на 2000 год), решить эту проблему можно также регулированием водообмена Черного и Азовского морей.

3. Трансформация весеннего стока на 1 км³ эквивалентна изменению годового стока на 2 км³, т.е. колебания весеннего и годового стока на 1 км³ приводит к изменению запасов на 80 и 40 тыс.ц соответственно.

Варьирование биомассы полупроходных рыб в основном обусловлено соленостью моря, изменение которой на 1⁰/оо влечет за собой увеличение или уменьшение запасов на 230–400 тыс.ц.

Список использованной литературы

1. Б о й к о Е.Г. Эффективность естественного размножения и основные пути воспроизводства судака Азовского моря. Труды ВНИРО, 1955, т. XXXI, вып. 2, с. 108–137.
2. Б о й к о Е.Г., К о з л и т и н а С.В. Основные закономерности колебаний запаса, продукции и уловов азовского судака. Труды ВНИРО, 197, т. , с. .
3. Б р о н ф м а н А.М., Д у б и н и н а В.Г., С п и ч а к М.К. Количественная оценка некоторых экологических следствий антропогенной деятельности в Азовском бассейне. Тезисы докл. конф. "Рыбохозяйственные исследования в бассейне Азовского моря", Ростов-на-Дону, 1972, с. 27–28.

4. Б р о н ф м а н А.М. Соленость Азовского моря и ее предстоящие изменения. Изв.Сев.-Кавк.научн.центра Высшей школы, 1973, вып.1, Ростов-на-Дону.
5. Г о р о д н и ч и й А.Е. Данные по биологии молоди ранних стадий судака и леща в Таганрогском заливе. Труды АзчерНИРО, 1955, вып.16, с.265-177.
6. Г о р о д н и ч и й А.Е. Основные факторы, определяющие численность ценных полупроходных рыб Дона. "Вопросы ихтиологии", 1971, т.II, вып.3(68), с.471-477.
7. Д у б и н и н а В.Г. О влиянии термического режима на урожайность судака. Сб.работ РИМО, 1968, вып.8, с.155-163.
8. Д у б и н и н а В.Г. Гидрологические основы увеличения масштабов естественного воспроизводства рыб в Азово-Донском районе. Труды АзНИИРХ, 1972, вып.10, с.41-51.

Application of mathematical models to
substantiate requirements of fisheries
to water resources in the downstream
part of the Don River

V.G.Dubinina
S.V.Kozlitina

S u m m a r y

Transformation of the spring discharge by 1 km^3 is equivalent to variation in the annual discharge by 2 km^3 , that is fluctuations in the spring and annual discharge by 1 km^3 lead to changes in the fish stocks by 3000 tons and 4000 tons, respectively. Variations in the biomass of semi-anadromous species of fish are due, on the main, to fluctuations in salinity. A 1‰-change in salinity results in an increase or decrease in the stocks by 23000-40000 tons.

To lower the present level of salinity (13‰) and to create suitable conditions allowing for increasing the populations of semi-anadromous species to the long-term mean level it is necessary that the volume of spring flushes should be 14 km^3 , the annual runoff of the Don should be equal to 21 km^3 and total river discharge in the Azov Sea should amount at least to 43 km^3 .

To sustain the optimum saline regime and to increase the stocks of semi-anadromous species it is necessary to discharge 14 km^3 of Don water in spring and 20 km^3 throughout a year or 12 km^3 and 25 km^3 respectively, and maintain the total river runoff to the Azov Sea in the amount of 39 km^3 which could be implemented if some additional volume of water, say 30 km^3 , was transferred from elsewhere.

ИМИТАЦИОННАЯ СИСТЕМА "АЗОВСКОЕ МОРЕ"

УДК 577.4:517.949.2(262.54)

ИМИТАЦИОННАЯ СИСТЕМА "АЗОВСКОЕ МОРЕ"

А.Б.Горстко
(НИИ и ПМ СКНЦ ВШ)

Для прогнозирования последствий антропогенной деятельности для экосистемы Азовского моря в настоящее время необходим мощный математический аппарат.

Достаточно правдоподобная модель экосистемы, используемая для прогноза, должна:

1) строиться по блочному принципу (принцип расщепления), что дает возможность верифицировать каждый блок до его включения в общую модель;

2) предусматривать возможность учета и использования результатов различных естественно-научных исследований;

3) допускать учет большого числа переменных состояния, их функций (зачастую нелинейных) и ограничений;

4) предусматривать учет вероятностного характера многих параметров;

5) реализовываться в виде комплекса программ на ЭВМ.

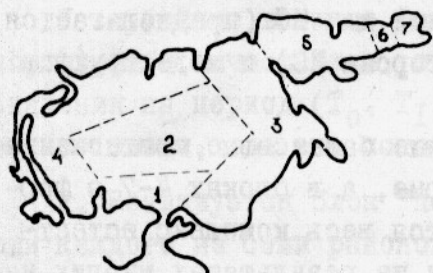
Всеим этим требованиям удовлетворяет имитационная система "Азовское море"^{х/}.

Будем считать Азовское море разделенным на семь районов (рис.1). Состояние экосистемы в каждом районе характеризуется вектором состояния, ингредиенты которого представляют собой концентрации различных веществ в воде, биомассы популяций и т.п. Предполагается, что внутри каждого района имеет место однородность по всем ингредиентам (условия в устьях рек и зоне Керченского пролива моделируются отдельно и являются для ИС экзогенными факторами). Размерность вектора состояния равна 120, причем распределение компонент следующее:

х/ ИС разрабатывается в НИИ механики и прикладной математики Северо-Кавказского центра Высшей школы.

- I-20 - концентрации химических элементов;
- 2I-22 - биомассы бактерий;
- 23-34 - биомассы основных видов фитопланктона;
- 35-46 - биомассы основных видов зоопланктона;
- 47-6I - биомассы основных видов бентоса;
- 62-II3 - биомассы основных видов рыб с учетом их возрастных групп;
- II4-I20 - резерв.

Ингредиенты с течением времени, которое предполагается дискретным и меняется в ИС шагом в 5 суток, изменяются в физических, химических, биологических и прочих процессах. В связи с этим целесообразно в ИС выделить отдельные частные модели, описывающие достаточно близкие процессы и явления. Назовем эти модели блоками и перечислим их:



- 1) "перемешивание";
- 2) "биогенные элементы";
- 3) "загрязняющие вещества";
- 4) "фитопланктон";
- 5) "зоопланктон";
- 6) "бентос";
- 7) "рыба" х/.

В блоке "перемешивание" по заданным внешним условиям (скорости и направлению ветра, водообмену с Черным морем, стоку рек Дона и Кубани) вычисляются объемы воды, перетекающие за соответствующую пятидневку между районами моря. Это перетекание определяет изменение ингредиентов с номерами I-46.

Блок "биогенные элементы" описывает круговорот азота, фосфора, кремния с учетом распада, переноса, изъятия и потребления. Температура и солнечная активность являются для этого блока определяющими факторами.

Блок "загрязняющие вещества" определяет изменения в концентрации за пятидневку с учетом распада и поступления новых порций загрязняющих веществ. Определяющие факторы здесь те же, что и в предыдущем блоке.

х/ Этот блок представляет собой набор из восьми блоков - по одному для каждого из основных видов рыб.

В блоках "фитопланктон", "зоопланктон", "бентос" и "рыба" учитываются питание, дыхание, отмирание, размножение, миграции. Кроме того, для блока "рыба" учитывается промышленное воздействие, состоящее в изъятии соответствующей части популяций.

Уже отмечалось, что моделируемые в блоках процессы происходят тем или иным способом, с той или иной интенсивностью под воздействием различных факторов, из которых в ИС учитываются следующие:

- 1) объем стока Дона;
- 2) объем стока Кубани;
- 3) водообмен с Черным морем;
- 4) солнечная активность;
- 5) скорость и направление ветра;
- 6) температура воды.

Все эти факторы являются внешними для ИС (предполагается, что они не подвержены влиянию со стороны ИС) и моделируются отдельно.

В блоках I-3 используются обычные балансовые соотношения в конечной или дифференциальной форме, а в блоках 4-7 в форме моделирующих алгоритмов содержится весь комплекс естественно-научных сведений, базирующихся на результатах многих наблюдений, который определяет динамику соответствующего объекта в зависимости от тех или иных условий на протяжении всего жизненного цикла. И балансовые соотношения, и моделирующие алгоритмы реализуются в виде программы на ЭВМ.

Опишем процесс функционирования ИС. Пусть в момент времени T_0 известен вектор состояния экосистемы x_0 . Реализация одного временного такта ИС дает возможность вычислить вектор состояния x_1 в момент $T_0 + 5$ суток. Она осуществляется по одной из следующих двух схем - последовательное протекание процессов (А) и последовательно-параллельное протекание процессов (В).

Последовательное протекание процессов (А)

I. В первую очередь моделируются внешние факторы для промежутка времени (T_0, T_1) , где $T_1 = T_0 + 5$ суток, те из них, которые предполагаются случайными, - путем экстраполяции соответствующих временных рядов. Например, пусть имеется ряд наблюдений некоторой случайной величины $\{S(t_i)\}$ в моменты $t_1, t_2, \dots, t_N = T_0$. Аппроксимируем эти величины с помощью полинома

$$x(t) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot t^i + \sum_{j=0}^m b_j \cos(2\pi f_j t + y_j),$$

где $x(t)$ — значение полинома в момент ;
 a_i — коэффициенты аппроксимирующего полинома;
 n — степень полинома;
 f_j — амплитуда косинусоидальной гармоник с частотой f_j и фазой y_j .

Коэффициенты полинома $x(t)$ выбираются из условия минимума функционала

$$F = \sum_{i=1}^N \{S(t_i) - x(t_i)\}^2,$$

зная полином $x(t)$ можно аппроксимировать искомую величину $S(t_i) = S(T_{N+1})$ значением $x(t_{N+1})$.

Неслучайные внешние факторы (например, водообмен с Черным морем) либо вычисляются, либо в модель вводятся их прогнозные значения на период (T_0, T_1) . Далее, внешние факторы вводятся во все блоки, где они используются.

2. Реализуется блок "перемешивание", в результате чего для каждого из семи районов моря изменяются первые 46 компонент вектора состояния.

3. Поочередно в каждом районе уже измененный вектор состояния x_0 преобразуется с помощью всех остальных блоков. Для этого прежде всего вводится следующее упорядочение блоков во времени: "биогенные элементы" < "загрязняющие вещества" < "фитопланктон" < "зоопланктон" < "бентос" < "рыба". Затем поочередно над вектором состояния выполняются преобразования, предписанные каждым блоком для периода $[T_0, T_1]$. Полученный в результате вектор x_1 является вектором состояния системы в момент T_1 . Порядок обмена информацией между блоками, важный для понимания многократного функционирования ИС, приведен на рис.2.

Описанная схема не лишена недостатков. Во всех блоках имеются процессы, которые происходят в промежутке времени T_0, T_1 одновременно. Чтобы преодолеть трудности их совместного рассмотрения и введено упорядочение блоков. В результате в ИС взаимодействуют ингредиенты, относящиеся к различным моментам времени. Если шаг по времени достаточно мал (например, порядка 5 суток), то эта неточность, по-видимому, не превос-

ходит порядка ошибки измерения величин ингредиентов. Большой же шаг недопустим.

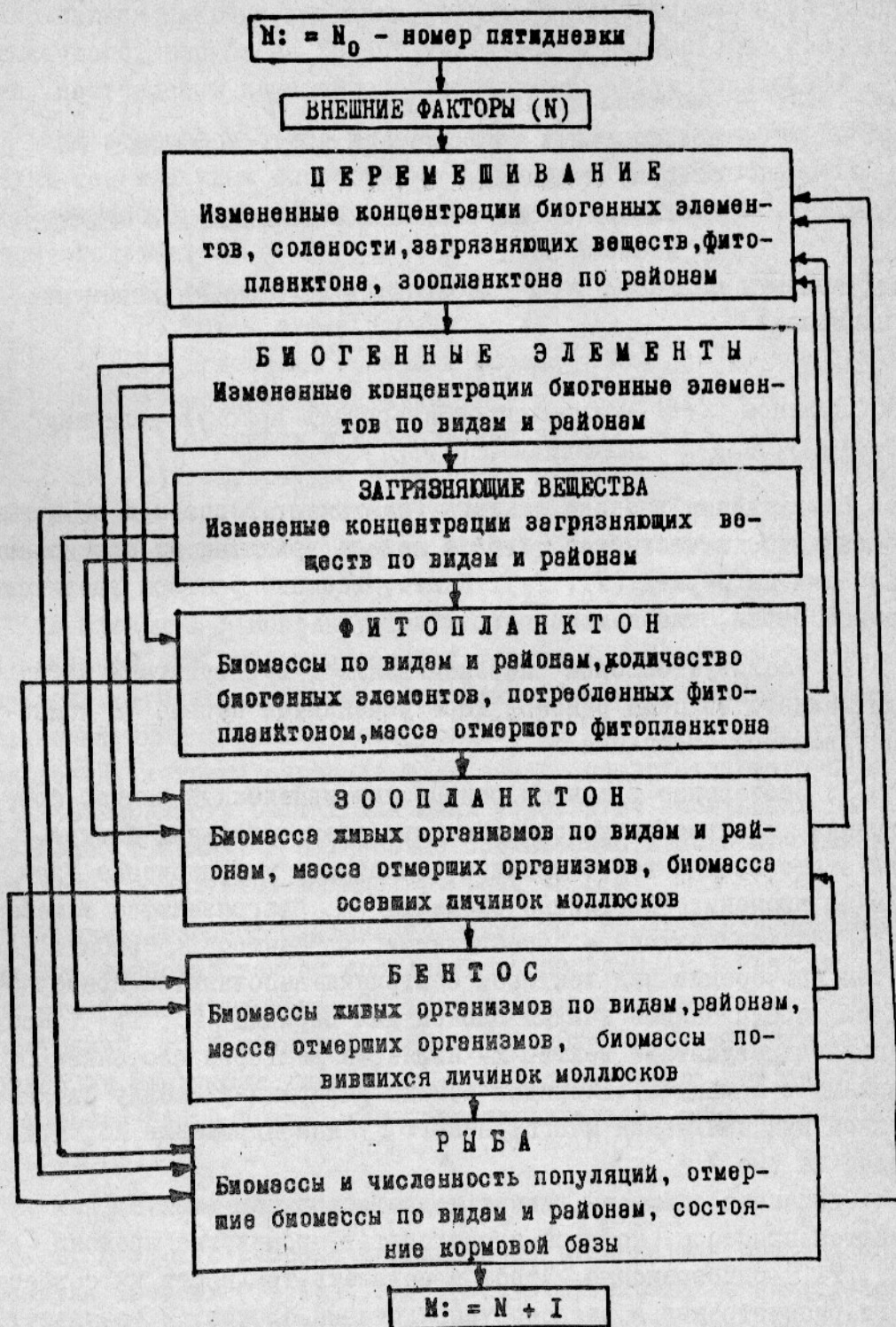


Рис.2. Порядок обмена информацией между блоками имитационной системы

Последовательно-параллельное протекание процессов (Б)

1. Так же как в А.

2. Так же как в А.

3. В каждом блоке все моделируемые процессы делятся на два класса — одновременные и последовательные. Для промежутка времени $[T_0, T_I]$ один за другим реализуются последовательные процессы всех блоков, приходящиеся на эту пятидневку, в результате чего определяется измененный вектор $\hat{x}_0$, который преобразуется в x_I с помощью одновременно протекающих процессов $Z_1, \dots, Z_r$, относящихся к различным блокам. В каждом из этих процессов отдельные ингредиенты потребляются, другие же могут производиться, причем, вообще говоря, известны не точные количества потребленных и произведенных ингредиентов, а возможные границы изменения этих величин, зависящие от различных факторов.

$$\begin{matrix} T_0 \\ x_{T_0} \\ x_{T_0} \\ x_m \end{matrix} \begin{pmatrix} z_1 \dots z_j \dots z_r \dots \\ \dots [\underline{a}_{ij}(\phi_{T_0}), \bar{a}_{ij}(\phi_{T_0})] \dots \\ \vdots \end{pmatrix},$$

где ϕ_{T_0} — вектор факторов в момент T_0 ;

$\bar{a}_{ij}$ и $\underline{a}_{ij}$ — соответственно верхняя и нижняя границы.

Трудность моделирования здесь состоит в том, чтобы определить интенсивности $P_1 \dots P_r$ происходящих процессов. Она может быть преодолена с помощью следующего алгоритма:

1) моделируем реализацию вектора ϕ_{T_0} ;

2) определяем величины $\underline{a}_{ij}(\phi_{T_0})$ и $\bar{a}_{ij}(\phi_{T_0})$;

3) предполагая величину $\underline{a}_{ij}(\phi_{T_0})$ случайной (с тем или иным законом распределения в $[\underline{a}_{ij}(\phi_{T_0}), \bar{a}_{ij}(\phi_{T_0})]$ находим ее реализацию при помощи метода Монте-Карло;

4) определяем границы возможных изменений $x_{T_0}^i : \underline{x}_{T_0}^i$ и $x_{T_0}^i$;

5) в качестве начальных значений искомых интенсивностей P_1, P_2, P_r выбираем соответствующие компоненты вектора x_{T_0} ;

6) в матрице (a_{ij}) отмечаем положительные и отрицательные элементы, после чего определяем величины

$$\Delta_i = \sum_j a_{ij} \cdot x_{T_0}^{kj} + x_{T_0}^{ki} - \sum_j \bar{a}_{ij} \cdot x_{T_0}^{kj}$$

(для действительно реализуемых величин $P_i \Delta_i \geq 0$).

7) формируем векторы "условий жизни" для каждого ингредиента $(u_{i1}, u_{i2}, \theta_i^1, \dots, \theta_i^s)$

$$u_{i2} = \frac{\sum \bar{a}_{ij} \cdot x_{T_0}^{kj}}{\sum (\bar{a}_{ij}) \cdot x_{T_0}^{kj}},$$

где
$$u_{i1} = \frac{\sum a_{ij}^+ \cdot x_{T_0}^{kj}}{\sum (\bar{a}_{ij}^+) \cdot x_{T_0}^{kj}},$$

θ_i^k - экспертная оценка k -ой компоненты вектора для i -го ингредиента.

8) упорядочиваем ингредиенты по "условиям жизни" и тем самым устанавливаем предпочтения в развитии для родственных видов, а также тенденции к росту или сокращению для каждого ингредиента;

9) выбираем "ШАГ" изменения P_i ;

10) улучшаем значения P_i с учетом 4), 5), 6), 7), 8), 9);

11) отыскиваем "зоны неопределенности" для интенсивностей каждого процесса (повторение этапов 5)-10);

12) выбираем действительно реализуемые величины P_i из "зон неопределенности" либо как соответствующие средние значения, либо с помощью случайного выбора;

13) формируем вектор x_{T_1} .

Многократное разыгрывание элементов матрицы позволяет получить множество $\{x_{T_1}\}$ возможных состояний в момент T_1 .

При таком подходе к моделированию имеет смысл сопоставить траектории реальной системы, не одну траекторию модели, а их семейство. Изучение статистических закономерностей этого семейства траекторий для оценки различных управляющих воздействий на систему - основная часть работы ИС "Азовское море".

Приведенный алгоритм нуждается в некоторых пояснениях. Прежде всего, он не может быть строго обоснован. По сути - это имитация происходящих в действительности процессов питания - отмирания. Однако в связи с тем, что эти процессы описываются на популяционном, а не на организменном уровне, возникает необходимость в использовании такой итерационной процедуры (п.п.4)-10) для определения их возможных интенсивно-

стей, которая бы не противоречила имеющимся биологическим представлениям.

Наиболее серьезная верификация и уточнение могут быть получены при испытании его на реальных данных.

Список использованной литературы

1. В а р ш а в с к и й В.И. Коллективное поведение автоматов. М., "Наука", 1973, 404 с.
2. М е н ш у т к и н В.В. Математическое моделирование популяций и сообществ водных животных. Л., "Наука", 1971, 195 с.
3. S y s t e m s analysis and simulation in ecology. vol.I, II, Ed. B. Patten. Acad. Press, 1971, p.1100.
4. T a i t, R.V. Elements of marine ecology, London, Butterworths, 1973, p.272.

The simulation system AZOV SEA.

A.B.Gostko.

S u m m a r y

Principles of the simulation system AZOV SEA are described. The functioning of the system is worked out for two variants.

УДК 551.465.15(262.54)

О ДИНАМИКЕ ВОДНЫХ МАСС АЗОВСКОГО МОРЯ

Ф.А.Сурют
НИИМ и ПМ СКНН ВШ

Предлагаемый ниже алгоритм представляет собой блок имитационной системы "Азовское море", описанной в статье А.Б.Горстко данного сборника. Устройство описываемого блока связано с потребностями в информации других блоков имитационной системы. В имитационной системе Азовское море разбито на семь районов. Величины каждого из изучаемых показателей — гидрометеорологические факторы, концентрации химических веществ, биомассы различных видов планктонных организмов и рыбных популяций — относятся к каждому району в отдельности, т.е. представляют собой средние величины этих показателей для каждого из представленных районов.

Разделение моря на районы вызвало необходимость моделирования перераспределения компонент вектора состояния по районам моря за выбранный в имитационной системе временной шаг — 5 суток. Поскольку районы моря сообщаются, происходит водообмен между соседними районами, и вместе с водными массами переносятся растворенные и взвешенные в воде вещества. Помимо этого, те компоненты вектора состояния имитационной системы, которые обладают способностью передвигаться (все компоненты, представляющие рыбные популяции, а также некоторые виды зоопланктонных и бентосных организмов), сами могут мигрировать из одного района в другой, более благоприятный в кормовом отношении или по другим причинам.

Миграции живых организмов учитываются в блоках, описывающих их жизнедеятельность. Однако перемещение многих живых организмов в большей мере определяется переносом водных масс, чем их собственной способностью к передвижению. В связи с этим описываемый блок, названный условно "Перемешивание" устроен как алгоритм, преобразующий на основе балансовых со-

отношений закономерности перемещения водных масс в закономерности перераспределения по районам моря, за выбранный временной шаг, растворенных и взвешенных в воде веществ и планктонных организмов.

Концентрация веществ по районам изменяется под воздействием морских течений, а также диффузии, вызывающей перенос этих веществ в направлении, противоположном градиенту их концентрации. Течения в Азовском море определяются в свою очередь ветровой деятельностью, а также величинами составляющих водного баланса — стоками Дона и Кубани, и водообменом Азовского моря с Черным морем и с заливом Сиваш /2/.

Задача может решаться при помощи расчета стационарных ветровых течений моря в каждый из временных интервалов при помощи уравнений гидродинамики для мелководного моря с использованием сеточного метода /1,3,4/. На основании полученного поля скоростей концентрации можно рассчитать по уравнениям турбулентной диффузии. Однако достаточно грубое районирование моря и осреднение значений концентраций исследуемых ингредиентов в каждом из выбранных районов позволяют использовать при построении алгоритма более простые представления о характере динамики водных масс Азовского моря.

Предполагается, что за выбранный временной шаг водообмен может осуществляться только между соседними районами, т.е. районами, имеющими общую границу. Если для общего для всей модели временного шага (5 суток) это предположение не справедливо, т.е. возможность выбора более мелкого временного шага именно для данного блока, и последующей стыковки блока с другими.

Входные параметры в блок — это матрица концентраций интересующего нас набора ингредиентов в каждом из районов моря, а также в стоках Дона, Кубани и в предпроливной зоне Черного моря. Кроме того, входными параметрами является скорость и направление ветра, а также величины стока Дона и Кубани. Поскольку измерения показателей сравнимы с величиной погрешности, водообмен Азовского моря с заливом Сиваш в модели не рассматривался. Выходом в подмодели является матрица концентраций выбранного набора веществ в следующий момент времени. Введем необходимые обозначения:

x_{ij} — концентрация i -го вещества в j -ом районе моря в момент времени t . $t = 0, 1, 2, \dots$;

$W_i(t)$ - проекция средней за временной интервал скорости ветра (t - номер интервала) на направление ВСВ - ЗЮЗ;

$W(t)$ - показатель, характеризующий среднюю силу ветра за временной интервал (например средний модуль скорости ветра);

$SD(t), SK(t)$ - стоки реки Дон и Кубань за интервал времени с номером .

Формально работу блока можно описать схемой I.

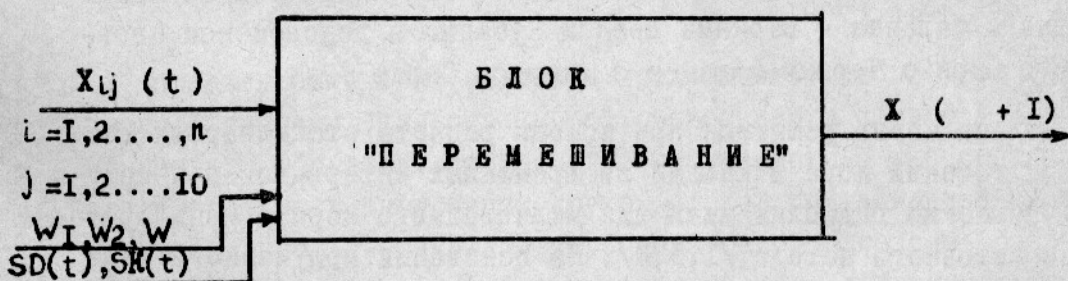


Схема работ блока "Перемешивание"

В основе алгоритма, преобразующего входные параметры блока в выходные, лежат балансовые соотношения для массы каждого из веществ, вносимой и выносимой морскими течениями и стоками рек в каждый из семи районов моря.

В связи с тем, что в формировании течений Азовского моря основную роль играют так называемые сгонно-нагонные явления, вызванные ветровой деятельностью [2], а также стоки рек и водообмен с Черным морем, предполагается, что с данными характеристиками ветровой деятельности однозначно связано некоторое отклонение поверхности Азовского моря от горизонтального положения.

Таким образом, алгоритм преобразует данные о ветровой деятельности за выбранный временной шаг в некоторое осредненное расположение водной поверхности Азовского моря, определяющее осредненные объемы каждого из семи районов моря. Счет здесь ведется по формулам

$$V_i(t+1) = V_{i_0} + \Delta H_i(t+1) \cdot S_i; \quad i = 1, 2, \dots, 7,$$

где $V_i(t+1)$ - объем i -го района в момент времени $t+1$;
 V_{i_0} - объем i -го района при горизонтальном расположении поверхности моря;

$\Delta H_i(t+1)$ - изменение глубины i -го района, вызванное ветровой деятельностью;

S_i - площадь i -го района.

Изменение глубин $\Delta H_i(t+1)$ каждого из районов вычисляется по скорости и направлению ветра, осредненным за интервал времени $(t, t+1)$.

Выбор зависимости $\Delta H_i(t+1)$ от характеристик ветровой деятельности определился следующими гипотезами: поверхность Азовского моря считается плоскостью, наклоненной под тем или иным углом к горизонту в зависимости от силы и направления ветра; за неподвижную ось этой плоской поверхности моря выбрана так называемая "узловая линия", проходящая от косы Бердянской к мысу Агуевскому /2, 5/; зависимость $\Delta H_i(t+1)$ от силы ветра в направлении, перпендикулярном осевой линии - монотонная ограниченная функция.

В машинной реализации алгоритма использовалась зависимость

$$\Delta H_i(t+1) = k_{1i} \arctg \frac{W_i}{k_2},$$

удовлетворяющая указанным требованиям. Константы k_{1i} и k_2 подбирались из сравнения расчетных и наблюдаемых отклонений уровня, причем величины k_{1i} выбирались пропорциональными расстоянию района с номером i до "узловой линии" /2/.

Следующий шаг работы подмодели состоит в определении величин V_{ij} объемов воды, перетекающих из i -го района в j -ый. При этом $V_{ij} = 0$ в том случае, если i -ый и j -ый районы не имеют общей границы. Предполагается, что V_{ij} состоит из двух слагаемых $V_{ij} = V_{ij}^{(1)} + V_{ij}^{(2)}$, $V_{ij}^{(1)}$ - составляющая, характеризующая водообмен между соседними районами, наличествующий даже в отсутствие ветра и стоков реки и связанный лишь с взаимопроникновением водных масс на границе районов. При большей W - средней силе ветра за пятидневку - эта величина, естественно, должна быть больше, кроме того, поскольку речь идет о взаимопроникновении, то полагаем

$$V_{ij}^{(1)}(W) = V_{ji}^{(1)}(W),$$

т.е. соседние районы обмениваются равными объемами воды. Зависимость $V_{ij}^{(1)}(W)$ выбирается монотонной и ограниченной. Второе слагаемое $V_{ij}^{(2)}$ - это уже величина перетока из i -го района в

j -ый, определяемая стоками рек и тем, что объем каждого из районов в момент $(t + 1)$ должен быть равен вычисленному выше значению $V_j(t + 1)$. При расчете используются простые балансовые соотношения. Например:

$$V_{76}^{(2)} = \begin{cases} V_7(t) + QD(t+1) - V_7(t+1) & \text{(величина не отрицательна)} \\ 0 & \text{(величина отрицательна)} \end{cases}$$

Теперь уже, наоборот, либо $V_{ij}^{(2)} = 0$, либо $V_{ji}^{(2)} = 0$. Здесь же вычисляется величина V_{18} оттока части вод Азовского моря в Черное и V_{81} притока черноморских вод.

Заключительный этап работы подмодели – вычисление новых концентраций $x_{ij}(t+1)$ всех рассматриваемых веществ. При этом используются все те же балансовые соотношения с учетом вычисленных значений V_{jk} , т.е.

$$x_{ij}(t+1) = \frac{x_{ij}(t) \cdot V_j(t) + \sum_k x_{ik}(t) \cdot V_{kj} - \sum_k x_{ik}(t) \cdot V_{jk}}{V_j(t+1)}$$

В числителе этой формулы подсчитано общее количество i -го вещества в j -ом районе в $(t + 1)$ момент с учетом поступления из соседних районов, и убыли в соседние районы, а в знаменателе – объем j -го района в момент $(t + 1)$. На этом работа блока заканчивается и вычисленные значения $x_{ij}(t + 1)$ используются другими блоками.

Таким образом, в блоке имеется большой набор коэффициентов и параметров эмпирических зависимостей, значения которых нельзя измерить непосредственно. Эти величины подбираются путем многократного "проигрывания" блока на известном по результатам измерений материале таким образом, чтобы результаты расчетов давали возможно меньшее расхождение с наблюдаемыми величинами концентраций веществ по району моря. Такая работа была проделана по результатам измерений солености отдельных районов Азовского моря. Проверка работы блока по независимому ряду данных показала удовлетворительное совпадение расчетных и фактических значений солености.

Поскольку зависимость между исходными значениями $x_{ij}(t)$ и результатами расчетов блока $x_{ij}(t + 1)$ является линейной, есть возможность оценить погрешность ее работы в случае недостаточно достоверных исходных данных. Одним из интересных

применений этой модели может служить расчет динамики концентраций различных веществ в Азовском море при создании Керченского гидроузла.

Список используемой литературы

1. Г и д р о м е т е о р о л о г и ч е с к и й справочник Азовского моря. Гидрометеиздат, Л., 1962, 527 с.
2. Ж и л я е в А.П. Расчет колебаний уровня Азовского моря. "Океанология", 1972, т.ХП, вып.І, с.
3. М о с к а л е н к о Л.В. Расчет стационарных ветровых течений в Черном море. "Океанология", 1975, т.ХУ, вып.2, с.
4. Т о л м а з и н Д.М., Ш н а й д м а н В.А. О динамике стационарных течений Азовского моря. "Океанология", 1971, т.ХІ, вып.6, с.
5. Ф е л ь з е н б а у м А.И. Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений. АН СССР, М., 1960, 112 с.

On the dynamics of water masses of the Azov Sea.

F.A.Surkov

S u m m a r y

The simulation model of the re-distribution of dissolved and suspended matter in mid-water over the sea area is based on assumptions allowing for avoiding application of the approximating method of solving hydrodynamical problems. At the same time the model includes effects of components of the water balance of the Azov Sea and wind activity over its surface on the dynamics of water masses. The tentative estimates of the salinity regime in various area of the Sea have yielded satisfactory results. The model may be used for the analysis of the content of various substances in the Azov Sea and it may also be suitable to study new conditions in case the Kerch hydropower scheme is constructed.

УДК 551.465.63:519.242.37(262.54)

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СОЛЕННОСТИ АЗОВСКОГО МОРЯ

А.М.Бронфман:
(АзНИИРХ)

Ф.А.Сурков
(НИИМ и ПМ СКНЦ ВШ)

В ближайшее время в бассейне Азовского моря планируются крупные водохозяйственные мероприятия (безвозвратное изъятие материкового стока в объеме до 30 км^3 , переброска части стока из смежных речных бассейнов, регулирование водообмена через Керченский пролив); поэтому необходим прогноз различных параметров его экосистемы, в первую очередь солёности, фактора, регулирующего физико-химические и продукционные процессы практически на всех уровнях трофической цепи.

Метод, предложенный В.С.Самойленко /5/, основанный на анализе установившегося солевого баланса, долгое время служил основой расчетов солёности моря для различных вариантов антропогенного сокращения стока рек. Первая попытка прогноза солёности Азовского моря для условий неуставившегося баланса была предпринята А.И.Симоновым, Н.А.Родионовым и Б.М.Затучной /6/; этот метод в дальнейшем усовершенствовался /1,2,8/.

В настоящее время, однако, балансовые расчеты дали несколько завышенные результаты, что, очевидно, связано с несовершенством учета водообмена через Керченский пролив, являющегося основным элементом солевого баланса моря. При расчетах Н.А.Родионовым для условий безвозвратного изъятия стока $12 \text{ км}^3/\text{год}$ была получена максимальная солёность, тогда как фактическое безвозвратное водопотребление, достигшее в современный период $11,5 \text{ км}^3$ и совпавшее с глубокой депрессией стока 1972-1974 гг., повысило среднюю солёность Азовского моря лишь до $12,9\text{‰}$.

В предлагаемой работе использован метод множественного регрессионного анализа, широко применяемый в практике прогнозирования различных природных процессов или явлений /3,4,7/.

Исследования были начаты с наиболее общей модели, включающей в себя практически все известные факторы, прямо, либо косвенно участвующих в формировании величины солености

$$S_i = f(S_{i-1}, Q_i, Q_{i-1}, Q_{i-2}, Q_i^{oc}, Q_i^{чм}, Q_i^{аз}, Q_i^{учл}, H_i, W_i, t_i^{\delta_{3л}}),$$

где Q — суммарный сток рек в Азовское море;

$Q^{oc}, Q^{учл}$ — среднегодовые объемы атмосферных осадков, выпадающих на поверхность моря, и испарения с его водного зеркала;

$Q^{аз}, Q^{чм}$ — годовой сток азовской воды в Черное море и приток черноморской воды в Азовское;

H — средний годовой уровень моря;

W — средняя годовая скорость ветра над акваторией моря (по данным МГС Таганрог, Приморск-Ахтарск, Бердянск, Мысовое);

$t^{\delta_{3л}}$ — средняя температура воздуха летом (по тем же МГС);

i — номер года.

Для получения прогностических уравнений достаточно высокого качества желательно, чтобы входящие в модель предикторы удовлетворяли следующим условиям:

- 1) вносили достаточно значимый вклад в формирование прогнозируемого явления;
- 2) были слабо коррелированы между собой;
- 3) имели нормальные законы распределения вероятностей.

Гипотеза о нормальности законов распределения исследуемой функции S_i и ее аргументов проверялась на основе оценки величины выборочных асимметрии A и эксцесса E

$$A = \frac{m_3}{\sqrt{m_2^3}}, \quad E = \frac{m_4}{m_2^2} - 3,$$

где K -й центральный момент распределения.

Величины A и E распределены асимптотически нормально, однако при сравнительно коротких рядах наблюдений их целесообразно заменить более эффективными оценками

$$\tilde{A} = \frac{\sqrt{n(n-1)}}{n-2} A \quad \text{и} \quad \tilde{E} = \frac{n-1}{(n-2)(n-3)} [(n+1)E + 6],$$

где n — длина статистического ряда.

Дисперсии $\tilde{A}$ и $\tilde{E}$ вычислялись по формулам

$$\sigma_{\tilde{A}}^2 = \frac{6n(n-1)}{(n-2)(n+1)(n+3)}; \quad \sigma_{\tilde{E}}^2 = \frac{24n(n-1)}{(n-3)(n-2)(n+3)(n+5)};$$

Как следует из таблиц стандартного нормального распределения Гаусса, гипотеза о нормальности распределения вероятностей исследуемых факторов может быть принята при условии, если

$$\left| \frac{\tilde{A}}{\sigma_{\tilde{A}}} \right| < t_{кр.}; \quad \left| \frac{\tilde{E}}{\sigma_{\tilde{E}}} \right| < t_{кр.};$$

где $t_{кр.}$ - критические значения, равные для 1% уровня значимости 2,57 и для 5% - 1,96.

Из данных табл. I следует, что гипотеза о нормальности распределения подтверждается для всех избранных факторов даже на 5% уровне значимости.

Т а б л и ц а I

Значения нормированных выборочных коэффициентов асимметрии и эксцесса для основных факторов исследуемой модели

Фактор	$\frac{A}{\sigma_A}$	$\frac{E}{\sigma_E}$
S_i	-0,807	-0,627
S_{i-1}	-0,337	-0,881
Q_i	-1,376	-0,559
Q_{i-1}	-1,428	-0,524
Q_{i-2}	-1,452	-0,569
Q_i^{oc}	-1,050	-1,215
$Q_i^{учп}$	-0,448	-0,240
Q_i^{Az}	-1,050	-0,141
$Q_i^{чм}$	-0,986	-0,206
U_i	-0,468	-0,628
W_i	-0,097	-0,486
$t_i^{\delta_{3n}}$	-0,474	-0,191

Корреляционные оценки тесноты связи параметров исследуемой модели, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о том, что из состава аргументов модели целесообразно исключить Q_i^{Az} , $Q_i^{чм}$, обнаруживших чрезвычайно тесную корреляционную связь между собой ($r = -0,999$) и величиной Q_i ($r = -0,944$ и $r = -0,941$).

Все расчеты, связанные с построением модели солёности Азовского моря, выполнялись на ЭВМ БЭСМ-4, причем программа машинного расчета предполагала последовательное выполнение следующих процедур.

I. Оценку значимости вклада каждого из предикторов в формирование величины S_i при помощи F -критерия Фишера, вычисляемого из уравнения

$$F_x = \frac{\hat{\alpha}_x^2}{(b^{-1})_{xx} \hat{\sigma}^2},$$

где $\hat{\alpha}_x$ - соответствующий коэффициент регрессии при переменной;
 x - номер фактора (от I до K);
 $\hat{\sigma}^{-1}$ - обратная матрица ковариации предикторов;
 $\hat{\sigma}^2$ - средняя квадратическая ошибка приближения расчетного значения S_i к фактическому.

2. Сопоставление полученных результатов и исключение из дальнейших расчетов незначимых предикторов ($F'_x < F_{кр.}$).

3. Расчет регрессионных коэффициентов α , коэффициентов множественной корреляции R , относительной ошибки аппроксимации f и значимости полученной модели по F -статистике Фишера

$$F = \frac{R^2 (n-k-1)}{k(1-R^2)}.$$

На каждом этапе расчетов эти процедуры оставались неизменными, ЭВМ лишь исключала незначимые факторы, осуществляя в дальнейшем указанные выше операции для сокращенного количества предикторов.

Таким образом, программа работы машины предполагала последовательное автоматическое улучшение исходной модели до некоторого граничного условия, которое заключалось в прекращении дальнейших расчетов при получении набора предикторов с $F_x > F_{кр.}$

Результаты расчетов первого этапа, показали, что из состава предикторов должны быть исключены: средняя скорость ветра W_i , средний уровень моря U_i и средняя летняя температура воздуха $t_i^{лет}$, которые оказались статистически незначимыми в приближении S_i . Таким образом, исходная модель была упрощена до вида

$$S_i = f(S_{i-1}, Q_i, Q_{i-1}, Q_i^{oc}, Q_i^{учп}).$$

На втором и третьем этапах (табл.3) из состава предикторов были последовательно удалены $Q_i^{учп}$ ($F_x = 0,03$) и Q_i^{oc} ($F_x = 0,42$) и на заключительном этапе расчета испытывалась модель

$$S_i = f(S_{i-1}, Q_i, Q_{i-1}),$$

полностью удовлетворяющая всем трем указанным условиям, обеспечивающим достаточно высокое качество регрессии.

Т а б л и ц а 2

Матрица взаимной корреляции параметров исследуемой модели

Параметры	S_i	S_{i-1}	Q_i	Q_{i-1}	Q_{i-2}	Q_i^{oc}	$Q_i^{чм}$	$Q_i^{учн}$	Q_i^{A3}	$-U_i$	W_i	$t^{взн}$
S	I	0,870	-0,322	-0,464	-0,304	0,073	0,32I	0,322	-0,325	-0,305	2-0,172	0,117
S_{i-1}		I	-0,078	-0,344	-0,414	+0,052	0,050	0,245	-0,052	-0,37I	-0,234	0,202
Q_i			I	-0,005	-0,0795	0,196	-0,94I	-0,266	0,944	-0,256	0,073	0,062
Q_{i-1}				I	-0,009	-0,225	-0,02I	-0,290	0,0196	0,490	0,170	-0,202
Q_{i-2}					I	-0,229	0,153	-0,026	-0,148	0,167	0,282	-0,189
Q_i^{oc}						I	-0,372	-0,019	0,366	-0,307	0,173	-0,043
$Q_i^{чм}$							I	0,423	-0,9997	0,352	-0,033	-0,0311
$Q_i^{учн}$								I	-0,478	0,237	0,123	0,28I
Q_i^{A3}									I	-0,350	0,035	0,036
$-U_i$										I	0,453	-0,115
W_i											I	-0,156
$t^{взн}$												I

Т а б л и ц а 3

Результаты машинного исследования модели для средней
солёности Азовского моря

II этап			III этап			IV этап		
Фактор	Коэффициент регрессии	F - критерий	Фактор	Коэффициент регрессии	F - критерий	Фактор	Коэффициент регрессии	F - критерий
S_{i-1}	0,771	128,08	S_{i-1}	0,769	134,69	S_{i-1}	0,771	136,67
Q_i	20,022	16,27	Q_i	-0,022	17,51	Q_i	0,022	17,40
Q_{i-1}	-0,015	6,90	Q_{i-1}	-0,015	7,28	Q_{i-1}	-0,015	8,61
Q_i^{oc}	0,011	0,40	Q_i^{oc}	0,011	0,42			
$Q_i^{учн}$	0,005	0,04						
α_0	3,913			3,747			3,928	
R	0,821			0,863			0,932	
F	41,950			53,880			72,840	
γ	< 1%			< 1%			< 1%	
f	4,03%			3,71%			2,61%	

В аналитическом выражении последняя модель имеет вид

$$S_i = 3,928 + 0,771 S_{i-1} - 0,022 Q_i - 0,015 Q_{i-1}.$$

Согласно приведенным в табл.3 оценочным критериям, модель обладает достаточно высоким качеством: коэффициент множественной корреляции R равен 0,932, F - статистика Фишера - 72,8. Судя по сопоставлению величин F со значениями стандартных таблиц квантилей распределения Фишера, значимость регрессии (γ) составляет менее 1%, т.е. гипотеза о правильности аналитического выражения исследуемой модели подтверждается с вероятностью выше 99%.

Достаточно высокое качество аппроксимации подтверждается также при сопоставлении расчетных и фактических значений средней годовой солёности Азовского моря для периода 1926-1974 гг. Средняя относительная ошибка аппроксимации (f) составляет 2,61%, максимальная - не превышает 7,69%.

Поскольку полученное уравнение для S_i формировалось на основе эмпирического ряда 1926-1970 гг., результаты сопоставления расчетных и фактических величин солёности за 1971-1974 гг. могут рассматриваться как проверка по независимому ряду на-

блюдений. Абсолютная ошибка расчета для 1973, 1971 и 1974 г. составила лишь 0,1% , для 1972 г. - 0,2% . Поскольку период 1971-1974 гг. характеризовался резким увеличением солености вод моря от 11,7⁰/оо (1970 г.) до 12,9⁰/оо (1974 г., можно полагать, что рассматриваемая нами модель дает достоверные результаты и на "критических участках" гидрологического режима моря.

Были проведены также испытания модели для получения полиномиального выражения связи $S_i = f(S_{i-1}, Q_i, Q_{i-1})$.

При исследовании различных многочленов степени не выше 4, наилучшие результаты показало уравнение

$$S_i = 1,796 + 0,881S_{i-1} - 0,798 \cdot 10^{-4}(Q_i - 35,578)^3 - 0,011 Q_{i-1},$$

для которого $R = 0,934$, $f = 2,73\%$.

Поскольку в отношении точности прогноза последнее уравнение не имеет существенных преимуществ, в будущем соленость Азовского моря целесообразно рассчитывать при помощи полученного ранее линейного выражения для S_i .

Настоящая модель не является структурной частью общей имитационной модели Азовского моря. Данные о солености различных районов моря в заданные интервалы времени формируются в ней подмоделью /см.9/. Однако на данном этапе работы величины солености, генерируемые указанным блоком, не гарантированы от существенных ошибок, связанных с недостаточностью информации по многим параметрам. Поэтому полученное регрессионное уравнение предполагается использовать в качестве элемента, осуществляющего функцию контроля.

Список использованной литературы

1. Бронфман А. М. Современный гидролого-гидрохимический режим Азовского моря и возможные его применения. Труды АзНИИРХ, 1970, вып.10, Ростов-на-Дону, с.20-40.
2. Б р о н ф м а н А.М. Соленость Азовского моря и ее предстоящие изменения. Изв. Северо-Кавказского научного центра высшей школы, сер.естеств.наук, 1973, № 1, с.19-24.
3. К а ч м а р е к З. Модели гидрологических прогнозов. "Водные ресурсы", 1973, № 3, с.3-16.

4. Р о ж д е с т в е н с к и й А.В., Ч е б о т а р е в А.И. Статистические модели в гидрологии. Л., Гидрометеиздат, 1974, 432 с.
5. С а м о й л е н к о В.С. Ближайшее будущее Азовского моря. Труды ГОИН, 1947, вып.3 (15), с.21-42.
6. С и м о н о в А.И., Р о д и о н о в Н.А., З а т у ч - н а я Б.М. Расчет будущей солености Азовского моря и Северного Каспия. "Метеорология и гидрология", 1966, № 4, с.12-16.
7. С н а й д е р В.М. Некоторые возможности исследования многомерного статистического анализа в гидрологических исследованиях. Сб. "Электронно-выч.машины в гидрологии", Л., Гидрометеиздат, 1965, с.III-127.
8. С о в р е м е н н ы й и перспективный водный и солевой баланс южных морей СССР, Л., Гидрометеиздат, 1972, 236с.

A statistical model of salinity in the Azov Sea.

A.M.Bronfman,
F.A.Surkov

S u m m a r y

The statistical analysis of hydrometeorologic factors affecting the salinity in the Azov Sea is shown. The most important factors are considered on a statistical basis. A linear model of salinity is constructed with a high degree of validity. The application of the model in various fields is discussed.

УДК 543.34:517.949.8(262.54)

К МОДЕЛИРОВАНИЮ КРУГОВОРОТА АЗОТА
В АЗОВСКОМ МОРЕА.М.Бронфман В.Г.Ильичев
(АзНИИРХ) (НИИМ и ИМ СКНЦ ВШ)

Соединения азота — одна из незаменимых геохимических субстанций — определяют биологическую продуктивность водоемов. В процессе биогенеза азот проходит сложный цикл последовательных превращений с промежуточными продуктами в виде минеральных соединений — аммония, нитритов и нитратов, представляющих собой материальную основу фотосинтеза. Продолжительность полного цикла азота в водоеме определяет формирование продуктивности водоема, исходное же количество связанного азота играет в этом процессе второстепенную роль. Так, по расчетам И.К.Шеломова и А.Я.Алдакимовой /7/, на базе поступающих в Азовское море минеральных соединений азота может быть синтезировано лишь около 3–4% фактически наблюдаемого в море количества органического вещества. Остальная его часть формируется в результате многократного использования промежуточных продуктов распада. По нашим расчетам, выполненным по методу В.Г.Дацко /5/, в среднем для 1952–1973 гг. в течение года в Азовском море завершается около четырех циклов азота; при благоприятном сочетании гидрометеорологических и биохимических условий их число возрастает до 8.

В предлагаемой работе предпринята попытка создать один из транзитных блоков общей имитационной модели Азовского моря, задача которого выдать в последующие блоки информацию о количестве образующегося в процессе круговорота азота его органических и минеральных форм. Из-за недостаточности эмпирических данных не были исследованы анаэробные превращения аминокислот, NO_2 и NO_3 в свободный азот, а также его фиксацию из атмосферы. Цикл рассматривался в следующей последовательности:

остатки животных и растительных организмов $\longrightarrow$
 $\longrightarrow$ белковоподобные азотсодержащие соединения $\longrightarrow NH_4 \longrightarrow$
 $\longrightarrow$ (белки, аминокислоты) $\longrightarrow NO_2 \longrightarrow NO_3$.

Двения круговорота азота будем обозначать соответственно X_1, X_2, X_3, X_4 и X_5 . Входом в модель является X_1 , информация по которому поступает из соответствующих блоков общей имитационной модели моря, выходом — $X_2, \dots, X_5$. Все расчеты проводились для семи характерных районов Азовского моря, временной шаг счета выбран равным 5 суткам.

Структура и функции общей имитационной модели предполагают, что в рассматриваемый блок, кроме численной информации по X_1 , поступает также информация по следующим факторам: температуре вод моря, содержанию в них кислорода, объему материкового стока и атмосферных осадков, расходам азовского и черноморского потоков через Керченский пролив. Первые два фактора регулируют скорость геохимических циклов в море, остальные являются элементами его баланса. В расчетах приток азота через Керченский пролив принимался равным произведению расхода черноморского потока и средней многолетней концентрации $N_{\text{орг.}}$ и $N_{\text{мин.}}$ в Черном море, равной соответственно 250 и 100 мг/м³ /5/, сток азота в Черное море — равным произведению расхода азовского течения на концентрацию интересующих нас градиентов, полученных для предпроливного района в результате расчета за предшествующую пятидневку. Концентрация азота в атмосферных осадках считалась равной 140 мг/м³ /4, 6/. Количество связанного азота, поступающего в рассматриваемые районы моря с материалом абразии берегов, принималось постоянным. При этом с некоторой погрешностью допускалось, что в атмосферных осадках азот в основном представлен в виде NH_4 , а в абразионном материале — органическими соединениями почвенного гумуса. В этой связи указанные компоненты соответственно включались в X_3 и X_2 .

Для более полного представления о цикле азота необходима также количественная информация о двухстороннем его обмене в системе "вода-грунт". По аналогии с Рижским заливом Балтийского моря /2/ примем, что в донные осадки ежегодно переходит около 10% от запаса валового азота в пелагиали. Для избранного нами шага времени это составляет 0,14%. Подобная оценка, конечно, является сугубо приближенной, поскольку обмен в системе "вода-грунт" явление двухстороннее и направление и интенсивность миграции зависят от конкретных гидрометеорологических ситуаций /1/.

Чтобы хотя бы частично дифференцировать этот процесс было принято, что донные отложения адсорбируют биогенные элементы при концентрации кислорода выше 4 мг/л. При более низких его концентрациях миграция азота в направлении "пелагиаль - дно" считалась равной нулю. Подобная оценка несовершенна; уточнить эту часть модели - одна из важнейших задач дальнейших исследований.

Как уже отмечалось, учет балансовых компонентов не может обосновать расчет фактического содержания в море исследуемых азотсодержащих соединений. Необходимо учитывать также внутренний круговорот азота с разделением его превращений на отдельных участках цикла. По сути дела, задача сводится к построению системы дифференциальных уравнений, описывающих кинетику процесса, и к расчету входящих в них коэффициентов перехода.

Учитывая замкнутость рассматриваемой системы:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -k_1 x_1 \\ \dot{x}_2 = k_1 x_1 - k_2 x_2 \\ \dot{x}_3 = k_2 x_2 - k_3 x_3 \\ \dot{x}_4 = k_3 x_3 - k_4 x_4 \\ \dot{x}_5 = k_4 x_4 \end{cases} \quad (I)$$

Входящие в состав приведенных уравнений коэффициенты k_i в основном зависят от температуры T и содержания кислорода q , величина которых определяет скорость круговорота азота в море. Дополняя формулу Крога /3/, учитывающую только термический фактор, запишем

$$k_i(T, q) = (k_0)_i \cdot q \cdot 2^{\frac{T-10}{10}} \quad (2)$$

где $(k_0)_i$ - скорость реакции при $T = 10^\circ$.

Указанный способ оценки k_i , с определенными допущениями, пригоден для расчета k_2, k_3, k_4 . Однако для описания перехода к такому многокомпонентному продукту, каким являются белковоподобные азотсодержащие соединения, т.е. для $X_1 \rightarrow X_2$, необходимо несколько уточнить приведенную выше зависимость

Согласно /3/ распад органического вещества ($L_{\text{орг.}}$) до минеральных продуктов описывается уравнением

$$\frac{d}{dt} L_{opz} = -k \cdot L_{opz} \cdot \left(1 - e^{-\frac{q}{q_0}}\right), \quad (3)$$

где q — константа, характеризующая зависимость скорости разложения от недостатка кислорода ($q_0 = 0,3 \text{ мгO}_2$);

k — константа разложения, равная $k_0 \cdot 2^{\frac{T-10}{10}}$, ($k_0 = 0,1$).

Допуская, что переход от X_1 к X_2 осуществляется по уравнению (3) и, считая, что значения $(k_0)_i$ неизвестны, запишем систему (I) в виде

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = -(k_0)_1 \cdot X_1 \cdot 2^{\frac{T-10}{10}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{q}{q_0}}\right) \\ \dot{X}_2 = (k_0)_1 \cdot X_1 \cdot 2^{\frac{T-10}{10}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{q}{q_0}}\right) - (k_0)_2 \cdot q \cdot 2^{\frac{T-10}{10}} \cdot X_2 \\ \dot{X}_3 = q \cdot 2^{\frac{T-10}{10}} \cdot [(k_0)_2 X_2 - (k_0)_3 X_3] \\ \dot{X}_4 = q \cdot 2^{\frac{T-10}{10}} \cdot [(k_0)_3 X_3 - (k_0)_4 X_4] \\ \dot{X}_5 = (k_0)_4 \cdot q \cdot 2^{\frac{T-10}{10}} \cdot X_4 \end{cases} \quad (4)$$

Величины $(k_0)_i$ могут быть найдены при условии, что известны вектор $\bar{X}(0)$, т.е. содержание исследуемых ингредиентов в какой-то фиксированный начальный период времени, и $\bar{X}(\tau)$ — то же в конце этого периода. За начало отсчета принимали значения

$\bar{X}(0)$, зафиксированные в соответствующих районах Азовского моря в начале июля. Результаты, полученные в начале августа, рассматривали как $\bar{X}(\tau)$. Таким образом, полученные количественные характеристики внутреннего круговорота азота относятся к лету. Их значения для остальных сезонов рассчитываются так же.

Коэффициент $(k_0)_1$ для лета 1971 г., рассчитанный ЭВМ БЭСМ-4, равен 0,0033. Учитывается, однако, что расчет был произведен для интервала, равного одному месяцу, а переход от планктонного детрита к белкам и аминокислотам при температуре воды около 20° завершается обычно в течение 4–5 суток, действительная величина $(k_0)_1$ ориентировочно может быть принята равной 0,018. Величина коэффициентов

$$(K_0)_2 = 0,522, (K_0)_3 = 0,114 \text{ и } (K_0)_4 = 119,5.$$

Естественно, что приведенные значения $(k_o)_i$ могут рассматриваться лишь как первое приближение к действительности. Дальнейшее совершенствование блока, описывающего динамику фитопланктона, позволит получать биомассы и объемы потребления минеральных соединений азота с дискретным шагом, равным 5 суткам. Введение в рассматриваемый блок указанной информации позволит уточнить значения переходных коэффициентов.

Машинный расчет $(k_o)_i$ выполнялся методом последовательных приближений, причем коэффициенты, которые позволяют получить значения X_i , близкие к действительно наблюдающимся в момент τ , считались истинными и в неизменном виде принимались для дальнейших расчетов. Блок-схема подбора $(k_o)_i$ представлена на рис.1, где b_i — конечный вектор рассматриваемой системы (в данном случае ее состояние в начале августа); ε_i — первоначальное, заведомо малое значение $(k_o)_i$, от которого начинается его приближение; δ — заданная точность приближения $X_i(\tau)$ и b_i ; n и m — верхняя и нижняя границы интервала для $(k_o)_i$. Величину n при $S = 0$ вычисляли по блоку 1, дальнейший расчет $(k_o)_i$ осуществлялся по блоку 2 (условие $S = 1$).

Зная численные значения $(k_o)_i$ можно перейти к расчету вектора азота $\bar{X}_2(t)$ для любого заданного района моря (k) в момент t , расчет представлен на рис.2, в котором $\bar{v}_2(t)$ — вектор, включающий: а) внешние поступления азота с речным стоком, атмосферными осадками, абразией берегов; б) — обмен через Керченский пролив и в) информацию о массе отмерших организмов и фитопланктона, выдаваемую другими блоками имитационной модели Азовского моря. Переход азота в донные отложения при условии содержания кислорода CO_2 более 4 мл/л может быть оценен коэффициентом $K = 0,1$. При CO_2 менее 4 мл/л обмен в системе "вода-грунт" считался равным нулю.

Предлагаемый подход и способ расчета концентрации отдельных продуктов круговорота азота в Азовском море был испытан на примере лета 1971 г. и показал удовлетворительные результаты. Решение же задачи для всего годового цикла делает необходимым выполнение специальных гидрохимических наблюдений, позволяющих получить $(k_o)_i$ для остальных периодов года.

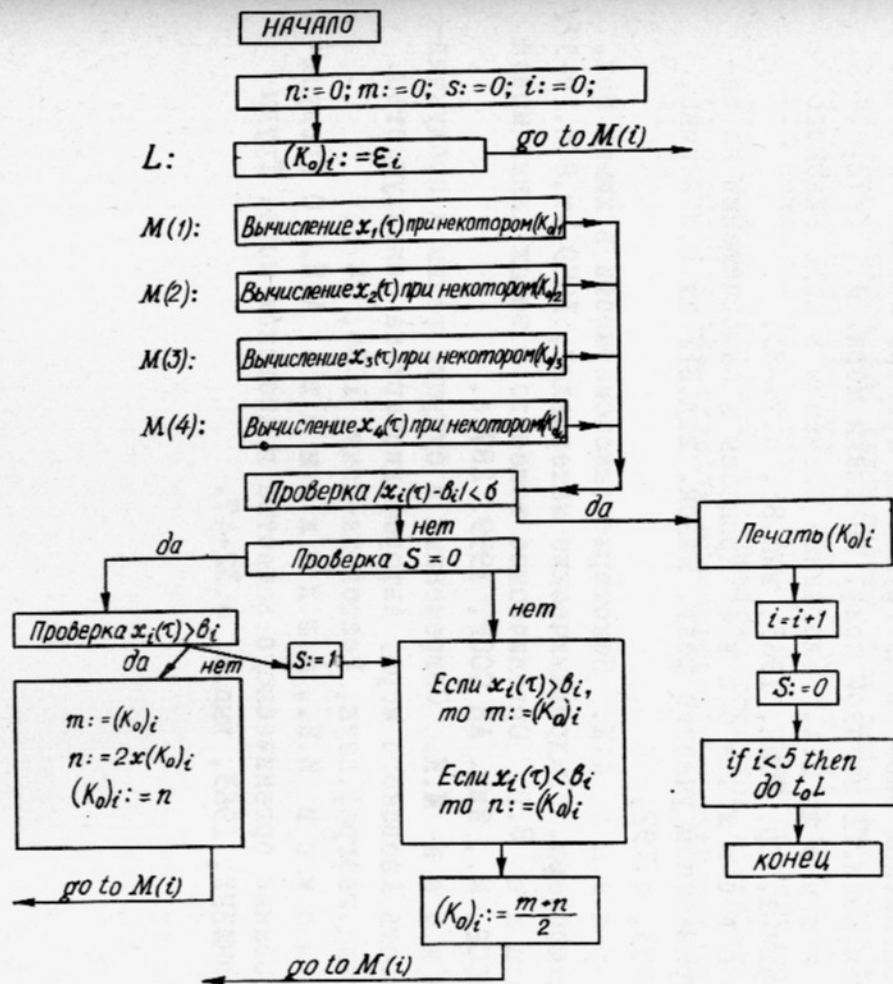


Рис.1

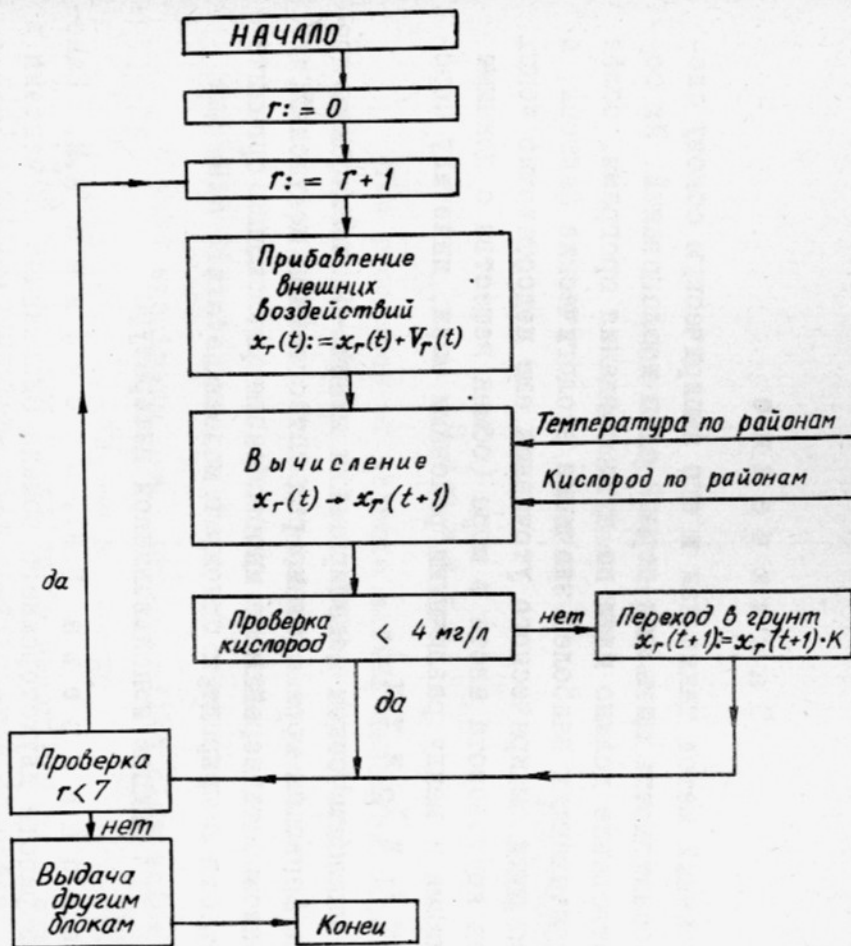


Рис.2

З а к л ю ч е н и е

Описанный метод также как и его эмпирическую основу следует рассматривать лишь как первый этап исследований. Их совершенствование должно идти по пути создания программ, более полно учитывающих наиболее значимые экологические факторы, а также по пути эмпирического уточнения еще недостаточно ясных моментов круговорота азота в море (обмен вещества с донными отложениями и между различными районами моря, кинетику переходов от X_1 к X_2 и т.д.).

При математическом моделировании химико-биологических процессов в Азовском море сделано ряд естественных допущений, что дает возможность перейти от многообразия разложения органических веществ в природе к одному в модели.

Список использованной литературы

1. А л е к с а н д р о в а З.В., Б р о н ф м а н А.М. Закономерности двухстороннего обмена биогенными элементами в контактном слое "вода-грунт" на примере Азовского моря. Тез.докл.УІ научной конф. по химии моря. М., 1972, с.4-6.
2. А у н и н ь ш Э.А. Биогенные элементы в воде Рижского залива. Тр. ГОИН, 1963, вып.83, с.74-83.
3. Б и о л о г и ч е с к и е процессы и самоочищение на загрязненном участке реки. Минск, изд.БГУ им.В.Л.Ленина, 1973, с.192.
4. Г и р е н к о А.Х. Некоторые закономерности в химии вод, атмосферы. "Гидрохимические материалы", 1959, т.8, с.19-37.
5. Д а ц к о В.Г. Органическое вещество в водах южных морей СССР. М., Изд. АН СССР, 1959, 287 с.
6. С п и ч а к М.К. Современный и будущий режим и продуктивность Азовского моря. Автореф.диссерт.на соиск.уч.степ. канд.географ.наук, Ростов-на-Дону, 1964, 24 с.
7. Ш е л о м о в И.К., А л д а к и м о в а А.Я. О продуцировании органического вещества в Азовском море. Труды АзНИИРХ, 1963, вып.6, с.32-47.

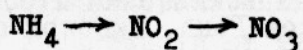
To modelling the turnover of nitrogen
in the Azov Sea.

A.M. Bronfman,
V.G. Ilyichev

S u m m a r y

The processes of organic matter decomposition are very complicated in the Azov Sea. From a practical point of view it is impossible to follow ways of emergence of such mineral forms of nitrogen as ammonia, nitrites, nirates. The following main disintegration chain of organic matter is compiled:

Dead specimens $\rightarrow$ protein-like clay acids $\rightarrow$



The multi-stage reaction is described by a system of differential equations with coefficients dependent upon the oxygen content and temperature. The model includes also such environmental factors as an inflow of nitrogen with atmospheric precipitation, river runoff etc. Some parameters of the model, e.g. constants of chemical reaction rates are obtained by comparing the results of computations with actual observations.

УДК 581.526.32:551.465.8:517.925(26.04+262.54)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ТРАНСФОРМАЦИИ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ
ТАГАНРОГСКОГО ЗАЛИВАЮ.А.Домбровский, Е.А.Чернус
(НИИМ и ПМ СКНЦ ВШ)

Таганрогский залив – водоем чрезвычайно высокой рыбопродуктивности. В нем сосредоточены основные запасы ценных промысловых рыб Азовского моря, что обусловлено низкой соленостью залива, большой концентрацией биогенных веществ, которые приносятся со стоком Дона, высокой скоростью продуцирования органического вещества.

В предлагаемой работе делается попытка построить математическую модель, описывающую процессы синтеза органического вещества фитопланктоном и последующей трансформации биогенных веществ.

Описание модели. На первом этапе моделирования предполагается, что основным биогенным веществом, лимитирующим развитие фитопланктона, является азот. Круговорот биогенных веществ состоит из трех основных процессов: продуцирования фитопланктоном органического вещества из неорганического, отмирания и распада живых организмов и минерализации органических веществ. Из факторов, существенно влияющих на скорость протекания этих процессов, важнейшими являются температура (T) и соленость (S) водоема. Считается, что содержание азота сбалансировано, т.е. выход азота из системы компенсируется его поступлением. Влияние инсоляции на фотосинтез не учитывается вследствие ее обильности в Таганрогском заливе. Введем следующие обозначения:

X_1 – средняя удельная биомасса фитопланктона (мг/м^3) Таганрогского залива в пересчете на азот;

X_2 и X_3 – средние концентрации органического и минерального азота (мг/м^3).

Среднее содержание азота в сухом веществе фитопланктона было принято равным 5% /2/.

Моделью служит система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = k_1(T) \varphi(x_1, x_3) - k_2(S) x_1, \\ \dot{x}_2 = k_2(S) x_1 - k_3(T) x_2, \\ \dot{x}_3 = k_3(T) x_2 - k_1(T) \varphi(x_1, x_3) \end{cases}, \quad (I)$$

где $\varphi(x_1, x_3)$ – скорость продуцирования фитопланктоном органического вещества, которая предполагается зависящей от плотности самого фитопланктона и концентрации минеральных веществ;

$k_1(T)$ – коэффициент продуцирования, зависящий от температуры;

$k_2(S)$ – коэффициент смертности фитопланктона, зависящий от солености;

$k_3(T)$ – скорость минерализации органического вещества в зависимости от температуры.

В модели использовались различные конкретные виды функций

а) $\varphi(x_1, x_3) = 1 - e^{-\alpha \frac{x_3}{x_1}}$ /4/;

б) $\varphi(x_1, x_3) = x_1 \min\{k, \dot{x}_3 R\}$ /5 и 7/,

где R – максимальная удельная скорость фотосинтеза.

Виды зависимостей коэффициентов от внешних факторов выбирались на основании качественной и количественной информации о влиянии внешних факторов на интенсивности соответствующих процессов, функциональную зависимость предполагали кусочно-линейной (рис.1) /6/.

Таким образом, полностью описана общая структура модели. Следующий этап моделирования, – выбор правильной величины параметров, обеспечивающих адекватность модели реальному объекту, – обычно называют идентификацией модели. При идентификации были использованы данные по динамике фитопланктона и биогенных веществ за 1952–1973 гг., представленные сотрудниками АХНИИРХ А.Я.Алдакимовой и Г.Д.Макаровой.

Описанная модель реализована на ЭВМ БЭСМ-4. Интегрирование производилось методом Эйлера на временном интервале 7 месяцев – с апреля по октябрь. Решения системы, т.е. расчетная динамика фитопланктона и биогенных веществ, получены в виде графиков с пятидневным шагом (рис.2).

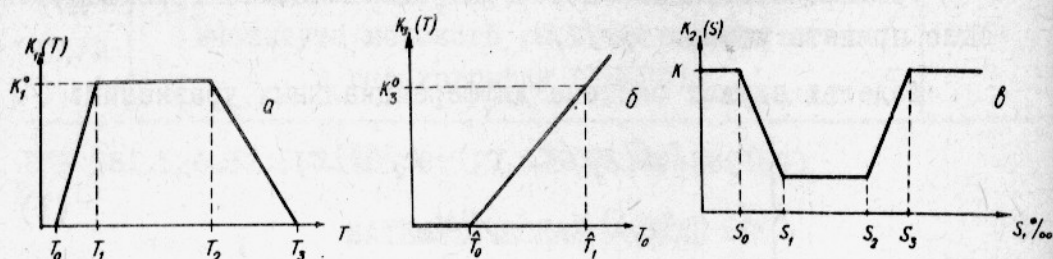


Рис. I. Зависимости:

а - коэффициента продуцирования от температуры воды (T_0, T_3) - температурный интервал, в котором происходит развитие фитопланктона, $[T_1, T_2]$ - интервал оптимальных температурных условий); б - скорости минерализации органического вещества от температуры (T_0 - температура, при которой начинается минерализация, T_1 - температура, при которой скорость минерализации достигает величины K_3^0 , при расчетах принято $T_0 = 0^\circ$; $T_1 = 10^\circ$);

в - коэффициента смертности фитопланктона от солености ($[S_0, S_3]$ - интервал солености, в котором возможно развитие фитопланктона, $[S_1, S_2]$ - интервал оптимальной дл. фитопланктона солености)

Качественное исследование поведения траектории системы (I)

Для проверки адекватности модели, а также для выбора правильных величин параметров системы, необходимо знать, как ведут себя решения системы уравнений при постоянных значениях коэффициентов.

Исследование осуществляется при некоторых естественных ограничениях на вид функции $\varphi(x_1, x_3) : \varphi(x_1, x_3) = x_1 f(x_1, x_3)$, причем, $f(x_1, x_3)$ возрастает по x_3 и является невозрастающей функцией x_1 (функции (а) и (б) входят в этот класс); $f(x_1, 0) = 0$.

Фазовым пространством сист.м (I) является положительный квадрант: $x_1, x_2, x_3 \geq 0$. Вначале изучается поведение траекторий системы

$$(I') \quad \begin{cases} \dot{x}_1 = k_1 x_1 f(x_1, x_3) - k_2 x_1 = P(x_1, x_3) \\ \dot{x}_3 = -k_1 x_1 f(x_1, x_3) + k_3 (C - x_1 - x_3) = Q(x_1, x_3) \end{cases} \quad (I')$$

полученной из (I) исключением переменной x_2 с помощью первого интеграла системы:

$$x_1 + x_2 + x_3 = C.$$

Фазовая картина решений (I') является проекцией на плоскость x_2, x_3 траекторий системы (I), лежащих в плоскости $x_1 + x_2 + x_3 = C$. В системе не может возникнуть периодических колебаний, так как (I) не имеет замкнутых траекторий, и вообще в области $x_1 + x_3 \leq C$ нет замкнутых контуров, целиком составленных из траекторий (I') (критерий Дюлака /1/).

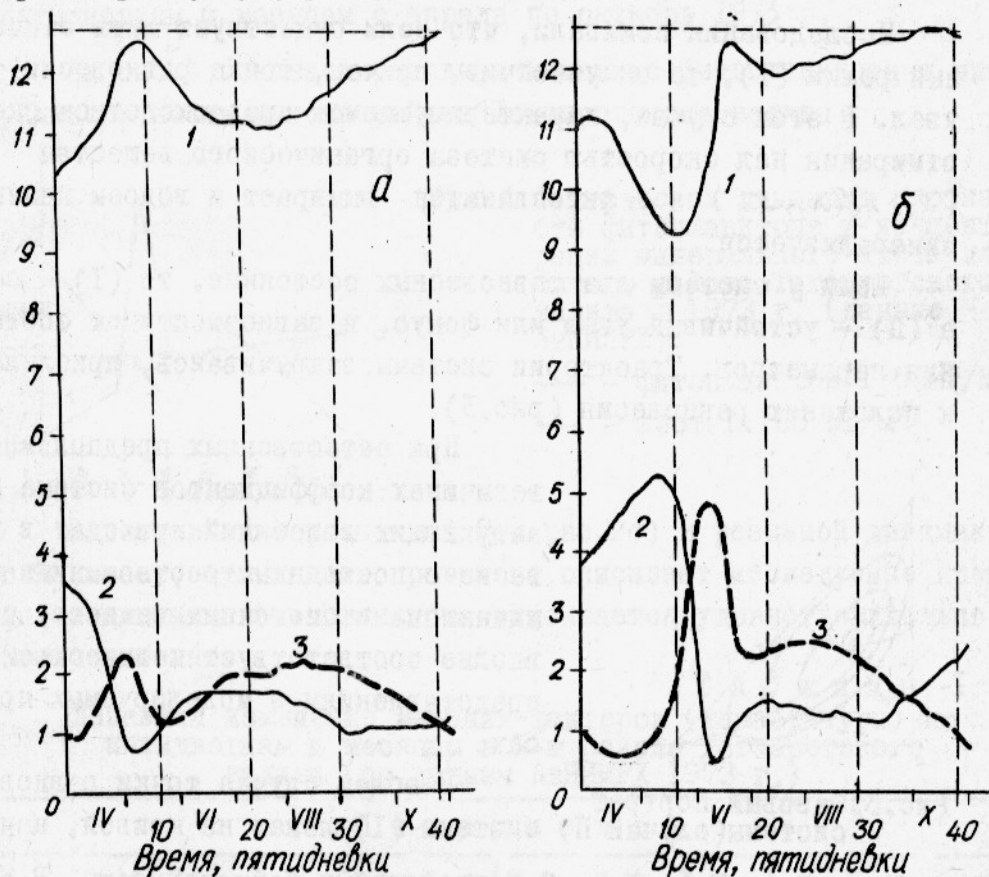


Рис.2. Расчет динамики фитопланктона и биогенных веществ:

а - для условий характерного года по модели с параметрами:

$$K_1^0 = 10 \frac{1}{5 \text{ дн.}}; K_2^0 = 3 \frac{1}{5 \text{ дн.}}; K_3^0 = 0,05 \frac{1}{5 \text{ дн.}};$$

$$T_0 = 4^\circ; T_1 = 12^\circ; T_2 = 20^\circ; T_3 = 30^\circ; S_0 = 0\%; S_1 = 2\%; S_2 = 6\%; S_3 = 9\%.$$

б - для условий 1973г. по модели с параметрами:

$$K_1^0 = 10 \frac{1}{5 \text{ дн.}}; K_2^0 = 3 \frac{1}{5 \text{ дн.}}; K_3^0 = 0,05 \frac{1}{5 \text{ дн.}};$$

$$T_0 = 5^\circ; T_1 = 17^\circ; T_2 = 27^\circ; T_3 = 30^\circ; S_0 = 2\%; S_1 = 9\%; S_2 = 12\%; S_3 = 17\%.$$

I - органический, 2 - минеральный азот, 3 - фитопланктон

Система имеет не более двух стационарных решений:

(I) $x_1 = 0, x_3 = c$ и (II) — (x_1^*, x_3^*) , которое находят из

$$\begin{cases} f(x_1, x_3) = \frac{k_2}{k_1} \\ x_3 = \frac{ck_3 - x_1(k_2 + k_3)}{k_3} \end{cases} \quad (2)$$

(I) существует всегда, а (II) — лишь при таких K_1 и K_2 , при которых $k_1 f(x_1, x_3) > k_2$ в некоторой окрестности точки $(0, c)$ на плоскости x_1, x_3 .

Исследования показали, что если существует лишь стационарный режим (I), то он устойчив, причем, точка равновесия — типа узел. В этом случае, характеризующемся превосходством скорости отмирания над скоростью синтеза органического вещества ($k_2 > k_1 f(x_1, x_3)$), фитопланктон вымирает и водоем полностью минерализуется.

Если у системы два равновесных состояния, то (I) — седло, а (II) — устойчивый узел или фокус, в зависимости от соотношения параметров. Траектории системы, закручиваясь, приближаются к положению равновесия (рис.3).

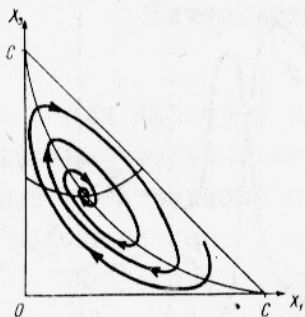


Рис.3. Фазовый портрет

системы (случай II) системы (I) лежат на кривой, начинающейся в $x_1 = x_2 = x_3 = 0$ и уходящей в бесконечность. В случаях функций Ивлева и Вольтерра-Полетаева эта линия — прямая.

Поведение решений используемой для моделирования реальных процессов систем дифференциальных уравнений не должно качественно меняться при малых изменениях параметров и функций, входящих в систему. Для рассматриваемой модели эти условия выполнены.

Результаты расчетов по модели

Для проверки правильности работы модели была рассчитана динамика фитопланктона и биогенных веществ по данным о температуре и солености характерного года (см.рис.2). На графике динамики фитопланктона четко выделяются два максимума: острый весенний (конец апреля) и растянутый летний (июль, август).

Затем на модели были симитированы конкретные условия по пятидневкам и месяцам с апреля по октябрь 1973 г.

На рис.4 показана реальная динамика фитопланктона и минерального азота пятого района Таганрогского залива.

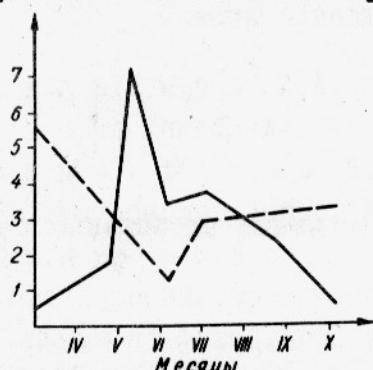


Рис.4. Фактическая динамика плотности фитопланктона и концентраций минерального азота для пятого района Таганрогского залива в 1973 г. (данные АЗНИИРХ):

— — фитопланктон I:50мг/м³;
 --- — азот I:100 мг/м³

Сопоставление расчетной (см.рис.2б) и реальной динамики показывает, что модель правильно описывает исследуемые процессы, а динамика фитопланктона описывается удовлетворительно и количественно.

Т а б л и ц а I
 Динамика изменения внешних факторов (температуры) по пятидневкам и месяцам в 5-м районе Таганрогского залива (по данным АЗНИИРХ 1973 г.)

П я т и д н е в к и											
I-я	2-я	3-я	4-я	5-я	6-я	I-я	2-я	3-я	4-я	5-я	6-я
А п р е л ь						М а й					
6,9	7,8	8,4	9,4	10,5	11,5	12,6	13,7	14,8	15,9	17,0	18
Среднее за апрель 10,90						Среднее за май 10,95					
И ю н ь						И ю л ь					
19,1	20,1	21,2	22,7	22,2	22,8	23,4	23,8	23,3	24,0	23,7	23,6
Среднее за июнь 11,0						Среднее за июль 11,29					
А в г у с т						С е н т я б р ь					
22,6	22,2	21,7	21,0	20,5	19,6	18,9	18,2	17,7	16,8	16,1	15,4
Среднее за август 11,81						Среднее за сентябрь 11,50					
О к т я б р ь											
14,6	13,8	13,0	12,2	11,2	10,2						
Среднее за октябрь 11,19											

Исследование зависимости средней биомассы фитопланктона и концентрации биогенных веществ от внешних факторов. Исследование чувствительности решений по коэффициентам

При помощи модели можно проследить изменения средних величин плотности фитопланктона и концентраций биогенных веществ при изменении уровня солености залива, а также зависимость этих величин от температурных условий. Для вычисления средних значений учитывается, что средние значения решений за большое время совпадают с точками равновесия системы, которые вычисляются по следующим формулам

$$\begin{cases} \bar{x}_1 = \frac{Ck_1 - k_2}{k_1} \cdot \frac{k_3}{k_2 + k_3} \\ \bar{x}_2 = \frac{Ck_1 - k_2}{k_1} \cdot \frac{k_2}{k_2 + k_3} \\ \bar{x}_3 = \frac{k_2}{k_1} \end{cases}$$

Зависимость указанных средних значений от солености показана на рис.5.

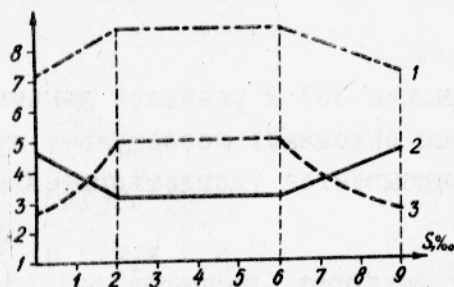


Рис.5. Рассчитанная по модели зависимость плотности фитопланктона от солености Таганрогского залива:
1 — органический;
2 — минеральный азот;
3 — фитопланктон

Важной характеристикой модели является чувствительность решений системы к изменению ее параметров, т.е. данные о том, насколько изменится динамика системы при вариациях ее коэффициентов (табл.2), которые показывают, что система довольно устойчива к вариациям коэффициентов.

Таблица 2
Изменение средних значений решений (в %) при изменении коэффициентов на 5%

Средние значения	Параметры			
	k_1	k_2	k_3	C
$\bar{x}_1$	2	6	5	7
$\bar{x}_2$	2	2	0	7
$\bar{x}_3$	5	5	0	0

З а к л ю ч е н и е

Использование для расчетов даже простейшей модели дает качественно верные и удовлетворительные с количественной точки зрения результаты.

Модель допускает усложнения и уточнения. Так, в модели может быть учтено поступление биогенных веществ со стоком Дона, выплывание их из залива и оседание на дно.

При увеличении размерности системы можно учесть также разнообразие видов фитопланктона и типов биогенных веществ.

Список использованной литературы

1. А н д р о н о в И.А., В и т т А.А., Х а й к и н С.Э. Теория колебаний. М., Физматгиз, 1959, 627 с.
2. В и н о г р а д о в В.П. Химический состав планктона. Труды биол.лабор. АН СССР, 1930, т.1, 5 с.
3. В и н о г р а д о в а З.А. К познанию химического состава кормовых организмов и рыб Черного моря. Труды Совещания по физиологии рыб, 1958, 4 с.
4. И в л е в В.С. Экспериментальная экология питания рыб. М., Пищепромиздат, 1955, 329 с.
5. П о л е т а е в И.А. Модели Вольтерра "хищник - жертва" и некоторые их обобщения с использованием принципа Либиха. (Общ.Биол.), 1973, т.XXXIV, № 1, 8 с.
6. S y s t e m s analysis and simulation in ecology. Ed.B. Paten, Acad. Press, 1971.
7. V o l t e r r a, V. Leçons sur la theorie mathematique de la lutte pour la vie, Paris, 1931.

A mathematical model of transformation
of biogenic elements in the Bay of Taganrog

Yu.A.Dombrovsky

E.A.Chernus

S u m m a r y

A mathematical model of transformation of biogenic elements in the Bay of Taganrog is described. It is assumed that the turnover of biogenic elements includes three main processes: production of organic matter from inorganic matter, mortality and decomposition of live specimens and mineralization of organic matter. Transformation of nitrogen in the turnover is described with a system of differential equations. The relationship of the process intensity with temperature and salinity is expressed by coefficients of the equations which are assumed to be functions of environmental factors. The model is identified and computations made indicate that it describes qualitatively properly processes investigated. Besides, it depicts qualitatively and quantitatively the dynamics of phytoplankton.

УДК 581.526.32:517.949.2(262.54)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ДИНАМИКИ ФИТОПЛАНКТОННЫХ СООБЩЕСТВ
АЗОВСКОГО МОРЯ

А.Я.Алдакимова

(АзНИИРХ)

Ф.А.Сурков, В.Л.Шустова

(НИИМ и ПМ СКНЦ ВШ)

Фитопланктонные сообщества Азовского моря – единственные производители органического вещества, располагающиеся в начале трофической цепи биоценоза, во многом определяют состояние кормовой базы и, следовательно, жизнеспособности популяций промысловых рыб. Блок "фитопланктон" описывает динамику развития фитопланктонных организмов во всей модели экологической системы Азовского моря и является одним из блоков имитационной системы (ИС) "Азовское море", поэтому математический аппарат, использованный в данном блоке индуцируется математическим аппаратом и задачами модели всей экосистемы Азовского моря (выбранным шагом модели, последовательным моделированием процесса, работой других блоков и т.п.).

Среди абиотических факторов, определяющих течение продукционных процессов в Азовском море, основные – режимы биогенных веществ и температура. Режим биогенных веществ лимитирует синтез органического вещества, температура воды обуславливает сезонную периодичность, ускоряет или замедляет обмен веществ, скорость минерализации органического вещества.

В модели Азовское море разделено на семь районов и динамика биомасс различных видов фитопланктона рассматривается в каждом из этих районов. Поскольку видовой состав фитопланктона Азовского моря многообразен и изменяется по сезонам в зависимости от тех или иных условий внешней среды, в блоке фитопланктон рассматривается с детализацией по видам и подвидам. Поэтому моделирующий алгоритм состоит из двух этапов – на пер-

вом формируем вектор состояния, а на втором рассматриваем его динамику. Принцип формирования вектора состояния таков. Имеется множество $\{x_N\}$, состоящее из N видов фитопланктона. В блоке, ввиду ограниченности памяти машины, рассматривается лишь 20 видов, которые выбираются из элементов множества $\{x_N\}$ сравнением биомассы данного вида фитопланктона с его так называемой критической биомассой $M_{кр}$ — величиной, позволяющей оценить удельный вес биомассы данного вида в общей биомассе фитопланктона.

В начале работы блока "фитопланктон" в вектор состояния включаются те виды фитопланктона, начало сезонного развития которых соответствует данному моменту времени. Если в процессе счета биомасса какого-либо вида становится меньше $M_{кр}$, например, из-за того, что этот вид прекратил сезонное развитие, то нет необходимости рассматривать этот вид в следующий момент времени. Поэтому он исключается из набора $x_1, x_2, \dots, x_{20}$, а его место занимает вид, сезонное развитие которого началось.

Такой путь позволяет прогнозировать развитие фитопланктона и появление новых видов в Азовском море (например, в годы осолонения). Далее, при рассмотрении конкретного района, осуществляется выбор видов фитопланктона, доминирующих в данном районе, что определяется соленостью района; если соленость района не попадает в (S^1, S^2) — интервал солености, при которой развивается данный вид, то этот вид из рассмотрения в этом районе исключается.

Выбор интервала солености, при которой развивается каждый из видов фитопланктона, основан на результатах натурных съемок в Азовском море.

Предположим, что вектор состояния $x = (x_1, x_2, \dots, x_{20})$, $x_1, x_2, \dots, x_{20} \in x_N$ сформировали и перейдем к рассмотрению его динамики. Взаимосвязи факторов, определяющих развитие фитопланктона, соответствуют схеме (рис. I). Развитие фитопланктона определяют температура воды, интенсивность солнечной радиации, приток биогенных элементов, ветер, соленость, количество растворенного кислорода /2,5/.

Величина биомассы фитопланктона изменяется под действием противоположно направленных процессов: новообразования биомассы в результате фотосинтеза, убыли биомассы в результате вые-

дания, трат на обмен и отмирания из-за неблагоприятных условий существования /1,2,4/.

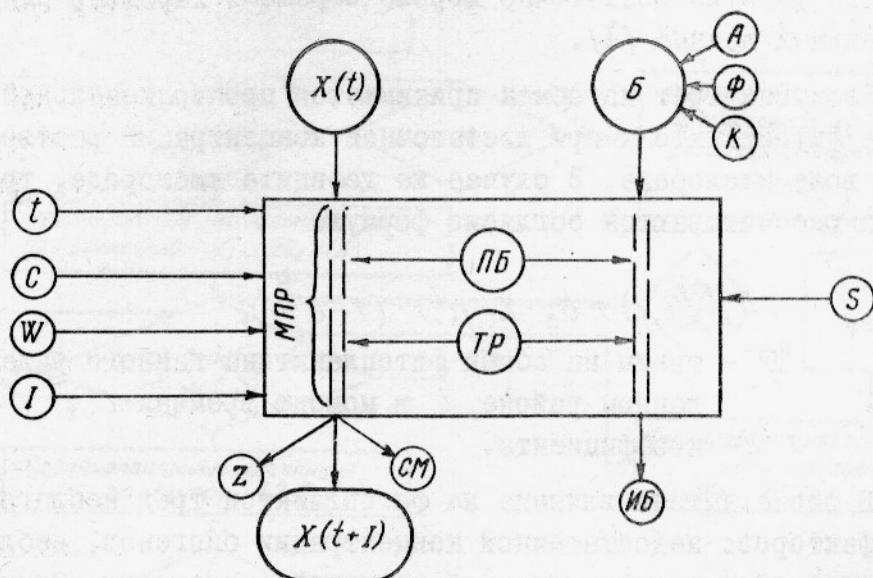


Рис. I. Схема взаимосвязи факторов, определяющих развитие фитопланктона. На схеме:

Входы системы: t - температура воды; C - интенсивность солнечной радиации; W - ветер; $x(t)$ - биомасса фитопланктона в момент времени t ; y - количество растворенного в воде кислорода; S - соленость; Б - биогенные элементы (А - азот, Ф - фосфор, К - кремний);

ТР - траты на обмен; ИБ - изменение биогенов, в результатах потребления их фитопланктоном.

Выходы системы: $x(t + \Delta t)$ - биомасса фитопланктона в момент времени $(t + \Delta t)$; Z - биомасса фитопланктона, которая может быть потреблена; CM - масса отмершего фитопланктона, которая пополнит собой мертвое органическое вещество; ПБ - количество биогенов, потребленное фитопланктоном

В блоке предполагается, что интенсивность фотосинтеза изменяется в зависимости от энергии солнечной радиации в соответствии с формулой

$$МПР(i, j) = a_1 \cdot x_{i, j}(t) \cdot (1 - e^{-\frac{C}{a_2}}),$$

где МПР (i, j) - прирост биомассы фитопланктона данного вида j в данном районе i за интервал времени Δt .

$x(t)$ - биомасса фитопланктона данного вида j в данном районе i ;

C — интенсивность солнечной радиации;
 a_1, a_2 — коэффициенты.

Эта формула достаточно хорошо отражает характер экспериментальных данных /1/.

Величина трат на обмен принимается пропорциональной биомассе фитопланктона при достаточной концентрации растворенного в воде кислорода. В случае же дефицита кислорода, траты на обмен рассчитываются согласно формуле

$$TP(i, j) = a_3 \cdot X_{i, j}(t) \cdot (1 - e^{-\frac{y}{a_4}}),$$

где TP — траты на обмен фитопланктона данного вида j в данном районе i в момент времени t ;
 a_3, a_4 — коэффициенты.

В блоке учтено влияние на фитопланктон трех неблагоприятных факторов: недостаточной концентрации биогенов, неблагоприятной температуры, сильной ветровой активности. Отмирание фитопланктона в каждом из этих случаев рассчитывается по формулам, аппроксимирующим имеющийся эмпирический материал.

Для того чтобы вычислить измененные концентрации биогенных элементов в воде, необходимо оценить их потребление фитопланктоном по соотношению между концентрацией этих элементов в воде и нормальной концентрацией биогенных элементов в веществе фитопланктона /4/. В результате этого потребления изменится как количество биогенов в биомассе j -го вида фитопланктона ($ИБ(i, j)$), так и его содержание в воде ($\Delta ВБ(i)$), что описывается следующими равенствами:

$$ИБ(i, j) = ПБ(i, j) - КБ(i, j) [TP(i, j) + СМ(i, j) + Z(i, j)],$$

$$\Delta ВБ(i) = ВБ(i) - ПБ(i, j),$$

где $ПБ(i, j)$ — потребление биогенов j -м видом фитопланктона в i -м районе;

$КБ(i, j)$ — концентрация биогенов в веществе j -го вида фитопланктона в i -м районе.

Биомасса фитопланктона в момент времени $(t + \Delta t)$ рассчитывается согласно соотношению:

$$x_{i, j}(t + \Delta t) = x_{i, j}(t) + МПР_{i, j}(\Delta t) - СМ(i, j) - Z(i, j) - TP(i, j).$$

Моделирующий алгоритм блока "Фитопланктон" реализован в виде программы на ЭВМ, блок-схема которой приведена на рис.2.

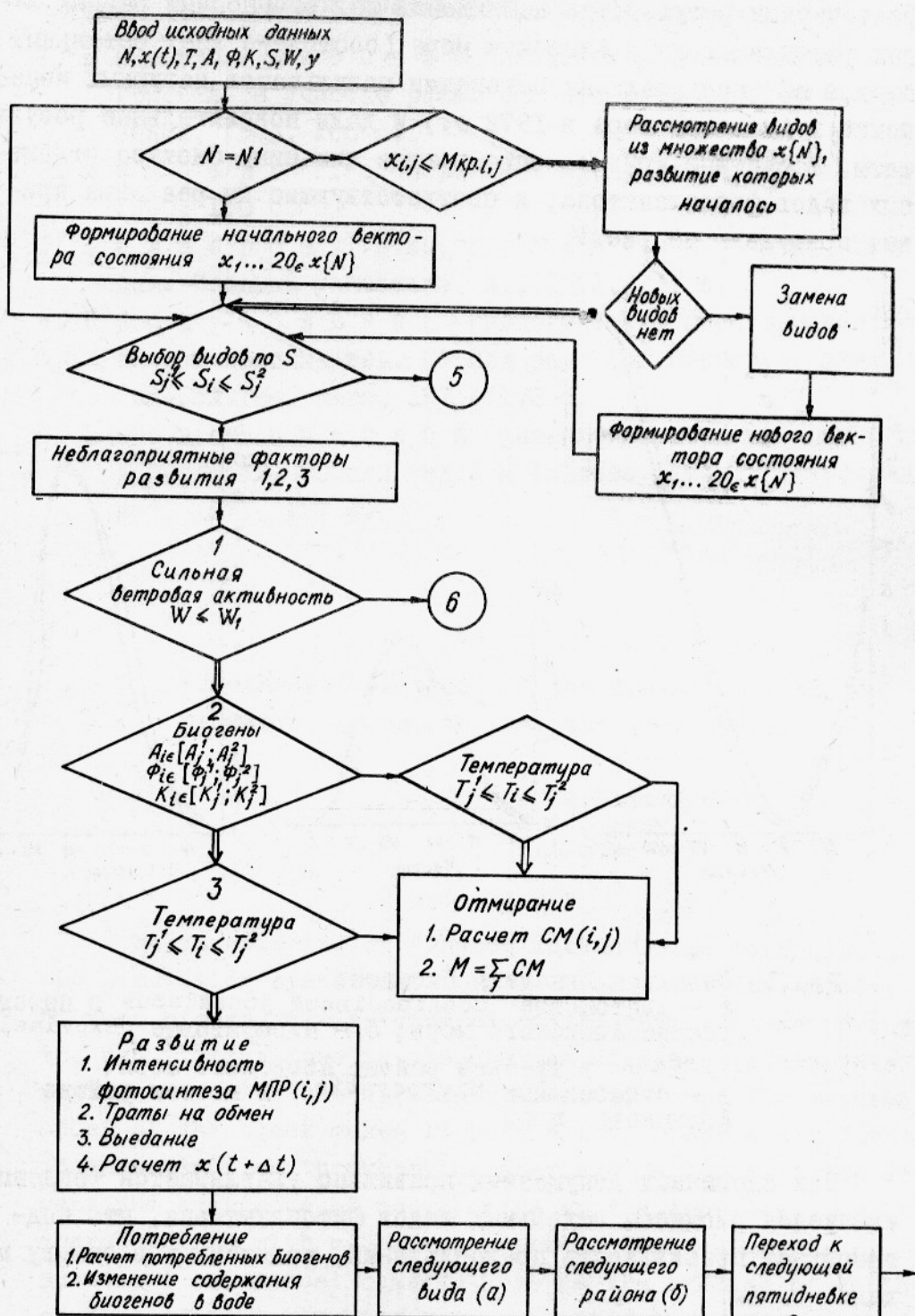


Рис.2. Блок-схема моделирующего алгоритма

Расчеты по программе, составленной для блока "Фитопланктон", производились с исходными данными, соответствующими фактическим результатам наблюдений над биомассами разных видов фитопланктона в Азовском море (состояние всех остальных блоков ИС определяли на основании результатов натурных измерений в Азовском море в 1972 г.) и дали положительные результаты. Расчетные кривые, описывающие динамику биомасс отдельных видов фитопланктона, и соответствующие им реальные кривые приведены на рис.3.

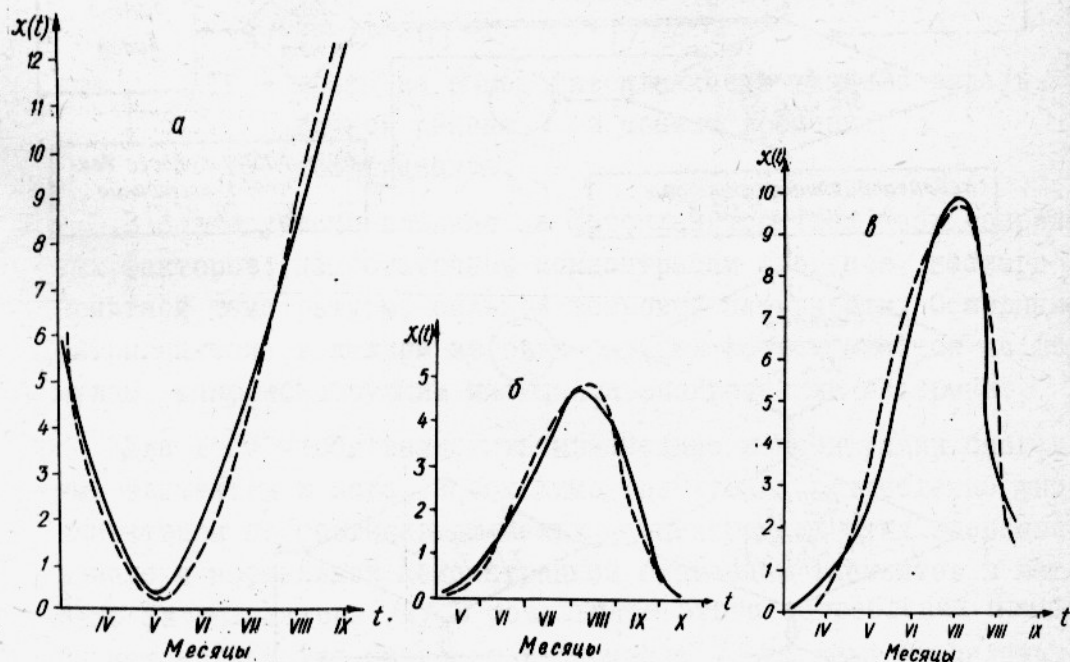


Рис.3. Сезонная динамика биомасс:
а - диатомовые *Coscinodiscus jonesianus* в пятом районе Азовского моря; б - пиропитовые *Euxyiaella cordata* в третьем районе Азовского моря; в - синезеленые *Microcystis* в шестом районе Азовского моря

При сделанных допущениях правильно улавливается тенденция изменения биомассы отдельных видов фитопланктона, что подтверждает правильность предположений, положенных в основу модели.

Список использованной литературы

1. Биологические процессы и самоочищение на загрязненном участке реки. Сб. под ред. Г.Г.Винберга, Минск, 1973, 160 с.
2. Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск, 1960, 130 с.
3. Голлербах М.М., Красавина Л.К. Водоросли. Сводный указатель. Л., 1971, 237 с.
4. Продукционно-биологические исследования экосистем пресных вод. Сб. под ред. Г.Г.Винберга. Минск, Изд-Бел.Гос.ун-та, 1973, 172 с.
5. Экологическая физиология морских планктонных водорослей. Сб. под ред. К.М.Хайлова. Киев, "Наукова думка", 1971, 157 с.

A mathematical model of the dynamics of phytoplankton biocenosis from the Azov Sea.

A.Ya. Aldakimova
F.A. Surkov
V.L. Shustova

S u m m a r y

The functioning of "Phytoplankton", the main block in the simulation system AZOV SEA is described. It computes the biomass of separate species of phytoplankton, dead phytoplankton and fluctuations in the content of biogenic elements in phytoplankton within certain periods of time. The mathematical model of the block makes it possible to observe all fluctuations in phytoplankton throughout a year and to forecast its development and emergence of new species in the Azov Sea, e.g. in years characterized with a higher salinity. The comparison of computations and actual observations on the biomass of various species of phytoplankton have supported the evidence that trends in fluctuations in the biomass are properly detected.

УДК 591.524.1:594:595+1+3:517.949.2(262.54)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ БИОМАССЫ
ЗООПЛАНКТОНА И БЕНТОСАА.Б.Горстко, О.Г.Мордвинкина
(НИИМ и ПМ СКНЦ ВШ)М.Я.Некрасова, Е.И.Студеникина
(АзНИИРХ)

Динамика планктонной и бентической фауны Азовского моря описывается в блоках имитационной системы, называемых, соответственно, "Зоопланктон" и "Бентос". В связи с тем, что при их разработке использовались некоторые общие принципы, остановимся подробнее на рассмотрении одного из блоков, например, "Зоопланктон", указав для другого лишь существенные отличия (рис.1)

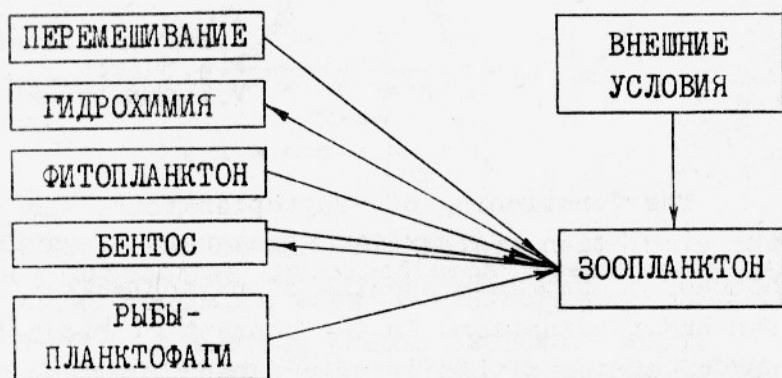


Рис.1. Связь между блоками "Зоопланктон" и "Бентос" с остальными частями ИС "Азовское море"

Поясним приведенные на рисунке связи. Блок "Перемешивание" дает информацию об изменении концентрации зоопланктона, обусловленном водообменом между районами моря. Между блоками "Зоопланктон" и "Гидрохимия" происходит обмен информацией о взвешенных органических частицах (корм для зоопланктона), с

одной стороны, и количеством отмершего зоопланктона, с другой. Сведения о кормовом фитопланктоне поступают из блока "Фитопланктон". Изменение биомассы зоопланктона, вызванное появлением или оседанием личинок бентосных организмов, учитывается взаимодействием с блоком "Бентос"; изменение, вызванное выеданием рыбами, — блоком "Рыбы — планктофаги".

Приведем вкратце сведения о биологических процессах в планктонных сообществах, использование которых позволило построить моделирующий алгоритм для блока "Зоопланктон".

Зоопланктон Азовского моря представлен морским, солоноватоводным реликтовым и пресноводными комплексами. В первом-пятом районах моря обитают преимущественно морские и частично солоноватоводные формы. Распространены веслоногие раки — *Calanipeda aquaedulcis*, *Acartia clausi*, *A. latisetosa*, *Centropages ponticus*. Среди коловраток доминируют *Synchaeta*, из клadoцер — *Podon polyphemoides*. В шестом, седьмом районах развиваются в основном пресноводные и солоноватоводные организмы: *Daphnia longispina*, *Bosmina longirostris*, *Brachionus angularis*, *Acartacyclops vernalis*, *Calanipeda aquae-dulcis* и др.

Сезонное развитие зоопланктона определяется периодичностью размножения кормовых для зоопланктона организмов, колебаниями термического режима и выеданием рыбами. Отмечаются два максимума биомассы — весенний и летний.

Ранневесенний планктон моря представлен в основном коловратками (76% общей массы) из рода *Synchaeta*. Позднее главную роль играют личинки баянуса (до 63% от общей массы). К этому времени относится и начало массового развития копепод (более 20% от общей биомассы). В Таганрогском заливе в этот период в массе развиваются копеподы из рода *Calanipeda* (50% от общей биомассы).

Летом в планктоне моря доминируют копеподы *A. clausi* *Centropages* (до 56% общей биомассы). В Таганрогском заливе летом доминирует клadoцеры, а также *Calanipeda* (соответственно 46 и 34% от общей биомассы).

К осени доля копепод в открытом море снижается до 26%, тогда как количество личинок баянуса и коловраток увеличивается. В заливе состав зоопланктона однороден: 80% составляет *Calanipeda*.

Зимой и в море, и в заливе количество видов невелико с четким доминированием веслоногих раков.

Уровень сезонных пиков и колебания среднегодовых значений биомассы зоопланктона обусловлены комплексом абиотических и биотических факторов.

Выживание большинства животных зависит в основном от пищевых отношений между ними. Основу рациона зоопланктона составляют водоросли и детрит. Из водорослей потребляются мелкие, округлой формы клетки размером до 100 мк. Весной и осенью недостаток мелких водорослей компенсируется детритом (70–80% веса пищевого комка). Летом, когда развитие мелких водорослей достигает максимума, они преобладают в рационе зоопланктона, но роль детрита по-прежнему велика. Потребление животного корма зоопланктоном незначительно и лишь у личинок баянуса и коловраток оно достигает порой 40% рациона.

При хороших условиях для развития зоопланктона биомасса его остается высокой, несмотря на выедание рыбами.

В зоопланктоне Азовского моря доминируют один-два вида животных, четко сменяющих друг друга по сезонам. Это обстоятельство позволило выделить в моделирующем алгоритме блока два этапа.

На первом в зависимости от внешних условий определяется биоценоз – некоторое подмножество из множества видов, характерных в последние годы для Азовского моря. На втором этапе для выбранного биоценоза в соответствии с состоянием других блоков рассчитывается изменение биомасс на соответствующем такте функционирования ИС. Блок-схема программы, реализующей этот алгоритм на ЭВМ, приведена на рис.2.

Перечислим использованные обозначения:

- N – номер пятидневки; i – номер района;
- B_i – вектор биомасс выбранного биоценоза;
- B_{Fito}, B_{Dtr} – векторы биомасс кормового фитопланктона и количество детрита;
- BB_i – биомассы личинок моллюсков;
- KM_i – коэффициент смертности;
- t_i – средняя температура воды i -го района;
- SOL_i – средняя соленость воды i -го района;
- Z – множество рассматриваемых видов зоопланктона;
- Z_i – виды, входящие в биоценоз;

$KB_{ij}(t)$ - коэффициент размножения для i -го вида;

$Q_j(t)$ - траты на энергетический обмен;

R_{jmax}, R_j - максимальные и реальные рационы;

P_j - прирост биомассы за счет питания;

Δ_j - неиспользованная пища.

Вход: $N, B, BFit, BD, BB, t, sol$.

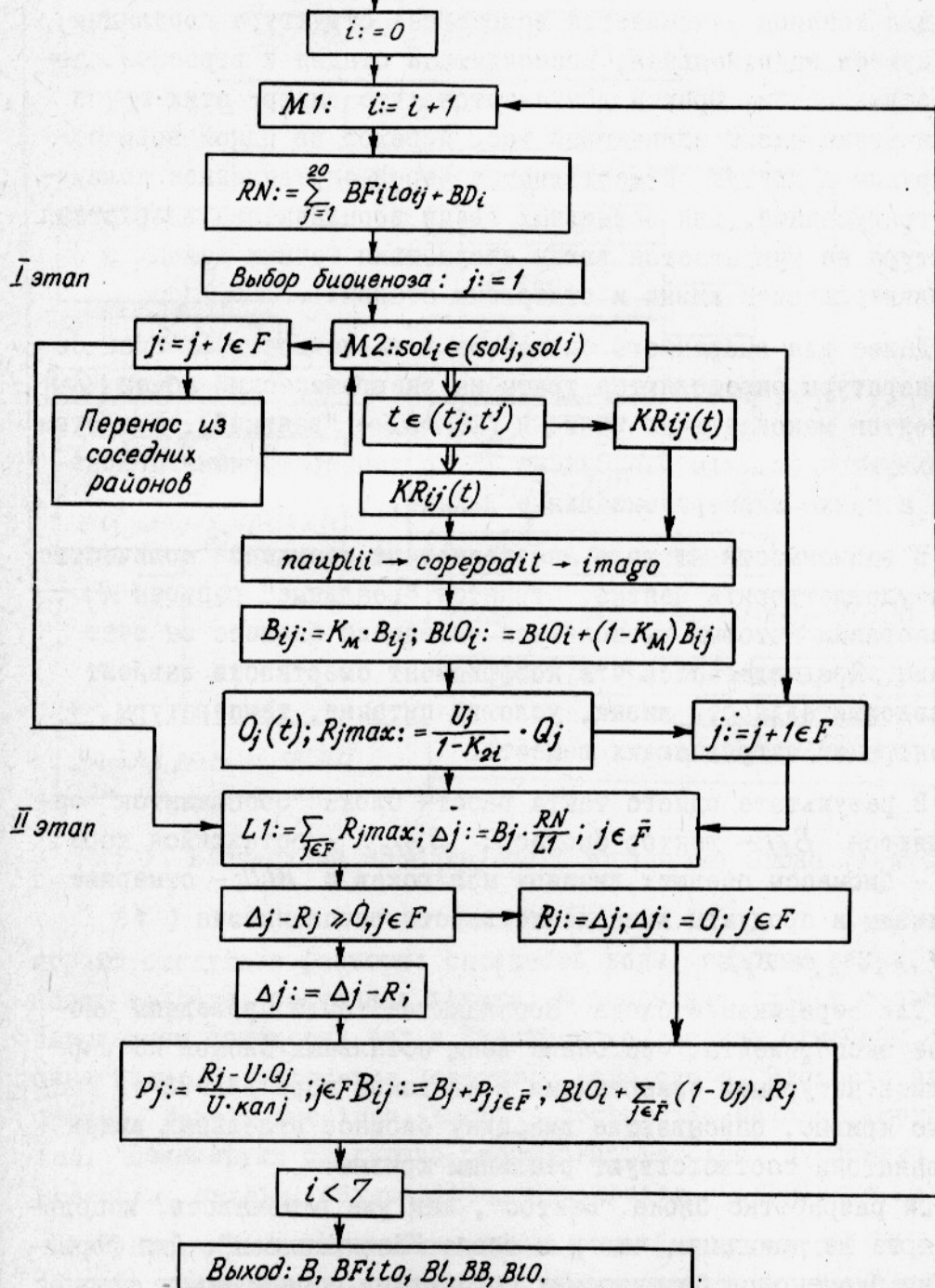


Рис.2. Блок-схема моделирующего алгоритма блока "Зоопланктон"

Основным фактором, обуславливающим присутствие того или иного вида в рассматриваемом районе, является соленость воды.

В зависимости от термических условий и от района выбирается коэффициент $KR_{ij}(t) \geq 0$, определяющий, какую прибавку биомассы даст взрослое поколение доминирующего вида за пятидневку.

Для копепод учитывается возрастная структура популяции; исследуются науплиальная, копеподитная стадия и взрослые, половозрелые особи, причем допускается, что внутри этих групп все животные имеют одинаковый вес. Переход из одной возрастной группы в другую осуществляется через определенное количество градусодней. Для остальных групп зоопланктона возрастная структура не учитывается ввиду отсутствия точных данных о продолжительности жизни и отдельных стадий.

Далее для выбранного биоценоза в зависимости от биомасс и температуры определяются траты на энергетический обмен $\{Q_j\}$ и строятся максимальные рационы (R_{jmax} - "заявки"). При этом используются формулы Л.М.Сущени /5/ с температурными поправками, а также экспериментальные данные.

В зависимости от того, позволяет ли имеющееся количество корма удовлетворить заявки, строятся "реальные" рационы R_j , на основании которых вычисляются изменения биомасс за счет питания. Предполагается что коэффициент смертности зависит от продолжительности жизни, условий питания, температуры, концентрации загрязняющих веществ.

В результате одного такта работы блока "Зоопланктон" определяются B_{ij} - вектор биомасс; $B_{fito i}$ - оставшийся корм; BV_i - биомассы осевших личинок моллюсков и BLO_i - отмершие организмы и продукты жизнедеятельности зоопланктона ($i = 1, \dots, 7; j \in \tilde{Z}_i$).

Для верификации блока "Зоопланктон" были проведены численные эксперименты. Состояние всех остальных блоков ИС определялись натурными измерениями в Азовском море в 1972 г. Расчетные кривые, описывающие динамику биомасс отдельных видов зоопланктона соответствуют реальным кривым.

При разработке блока "Бентос", как уже отмечалось, использованы те же принципы, что и в блоке "Зоопланктон". Для формирования биоценозов бентических организмов определяющую роль

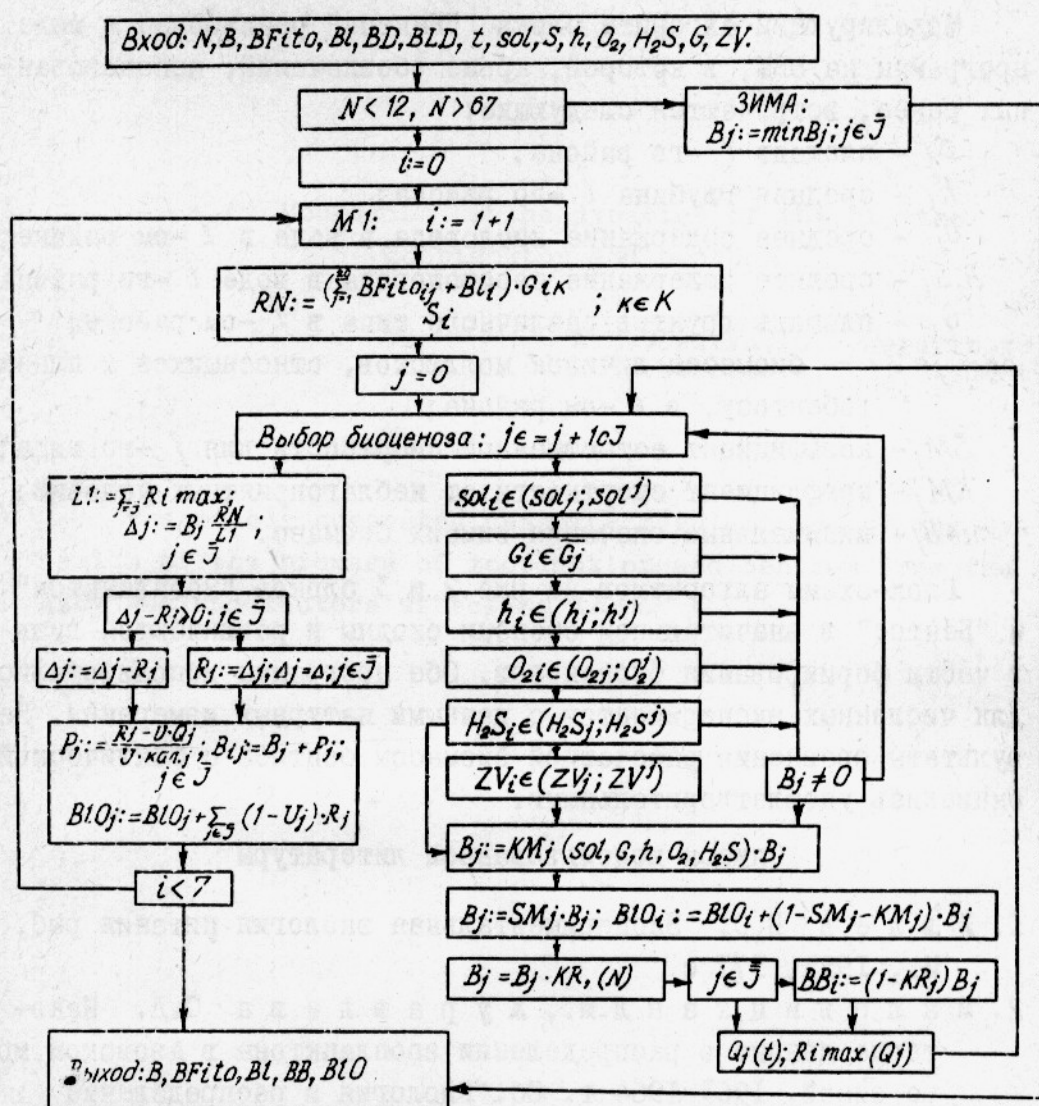


Рис.3. Блок-схема моделирующего алгоритма блока "Бентос"

играют следующие факторы: соленость воды, газовый режим, кормность водоема, состояние грунта. В последние годы в связи с повышением солености вод в Таганрогском заливе отмечены морские виды: *Cerastoderma lamarchi*, *Abra ovata*, *Hydrobia salinasi*, *Nereis succinea*, *Nephtys hombergii*, *Balanus improvisus*. Доминируют следующие биоценозы: *Cardium*, *Syndesmya*, *Hydrobia*, *Nereis*, *Olygochaeta*, *Mytiladter*, *Corbulomya* и др.

В отличие от короткоциклических форм (зоопланктон) внутригодовые сукцессии в сообществах донных животных в меньшей степени определяются факторами среды.

Моделирующий алгоритм блока "Бентос" реализован в виде программы на ЭВМ, в которой, кроме обозначений, использованных ранее, встречаются следующие:

- S_i - площадь i -го района;
- h_i - средняя глубина i -го района;
- O_{2i} - среднее содержание кислорода в воде в i -ом районе;
- H_2S_i - среднее содержание сероводорода в воде i -го района;
- G_i - площадь грунтов различного типа в i -ом районе;
- $BB_{ij}, j \in \tilde{z}_i$ - биомассы личинок моллюсков, относящихся к планктобентосу, в i -ом районе;
- SM_j - коэффициент естественной смертности для j -го вида;
- KM_j - коэффициент смертности от неблагоприятных условий;
- $min B_j$ - минимальные значения зимних биомасс.

Блок-схемы алгоритмов на рис.2 и 3 блоков "Зоопланктон" и "Бентос" в значительной степени сходны и различаются лишь в части формирования биоценозов. Обе программы использовались для численных экспериментов с данными натурных измерений. Результаты сравнения расчетной биомассы бентоса с фактической оказались удовлетворительными.

Список использованной литературы

1. И в л е в В.С. Экспериментальная экология питания рыб. М., 1955, 377 с.
2. М а л о в и ц к а я Л.М., Ж у р а в л е в а С.Д. Некоторые данные о распределении зоопланктона в Азовском море зимой, 1963-1964 г. Сб. "Биология и распределение планктона южных морей". М., 1967, с.83-90.
3. Н е к р а с о в а М.Я. Зообентос Азовского моря после зарегулирования стока Дона. "Зоол.журн", 1972, т.1, вып.6, с.789-797.
4. Н е к р а с о в а М.Я. Продуктивность донной фауны Азовского моря и Таганрогского залива в период зарегулирования стока р.Дон. "Лимнология", 1968, т.3, ч.1, М., "Знание", с.117-120.
5. С у щ е н я Л.М. Интенсивность дыхания ракообразных. Киев, 1964, 256 с.

Modelling of the dynamics of the biomass
zooplankton and benthos

A.B.Gorstko, O.G.Mordvinova,
M.Ye.Nekrasova, E.I.Studenikina

S u m m a r y

The models suggested describe regularities of the dynamics of the biomass of zooplankton and benthos from the Azov Sea and factors affecting them.

УДК 591.524.1:597.517.949.2(262.54)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИЙ АЗОВСКИХ РЫБ
НА ПРИМЕРЕ ХАМСЫ И БЫЧКА-КРУГЛЯКАЛ.В.Абещедарская, Т.А.Ворон,
А.Б.Горстко, Н.С.Задорожная,
В.Ю.Сычева
(НИИМ и ПМ СКНЦ ВШ)
С.П.Воловик, И.Ф.Ковтун
(АзНИИРХ)

Моделирование основных процессов, определяющих динамику биомассы и численности популяций рыб, описывается блоком "Рыба", который является составной частью модели экосистемы Азовского моря. Учитывали представителей ихтиофауны Азовского моря, имеющих наибольшее промысловое значение или играющих существенную роль в экосистеме. Осетровые, судак, лещ, тарань, хамса, тюлька и бычок-кругляк рассматривались отдельно, а остальные были объединены в разряд "Прочие".

Таким образом, блок "Рыба" представлял собой совокупность восьми блоков, каждый из которых отражал основные этапы жизненного цикла популяций указанных рыб (рис.1).

По каждой рыбе исследовались следующие этапы одного годового цикла: зимовка; преднерестовый нагул; нерест - период, определяющий величину нового поколения каждой рыбы; посленерестовый нагул. Таким образом, моделировались все наиболее важные этапы годового цикла рыб.

Рассмотрим моделирование процесса питания, который является общим для всех рыб. Пусть $K = \{ K_1, K_2, \dots, K_p \}$, - вектор, характеризующий состояние кормовой базы на шаге. Компонентами этого вектора являются биомассы тех видов животных и растительных организмов, которые представляют собой основные объекты питания рассматриваемых в модели популяций. Для каждой популяции вектор K упорядочен в соответствии с тем местом, которое занимает этот вид в рационе питания, заданного

вектором $R = \{R_1, R_2, \dots, R_p\}$. Поскольку вектор K описывает состояние всей кормовой базы, в нем возможно равенство нулю некоторых компонент, что означает отсутствие видов, представленных этими компонентами, в рационе питания популяции.

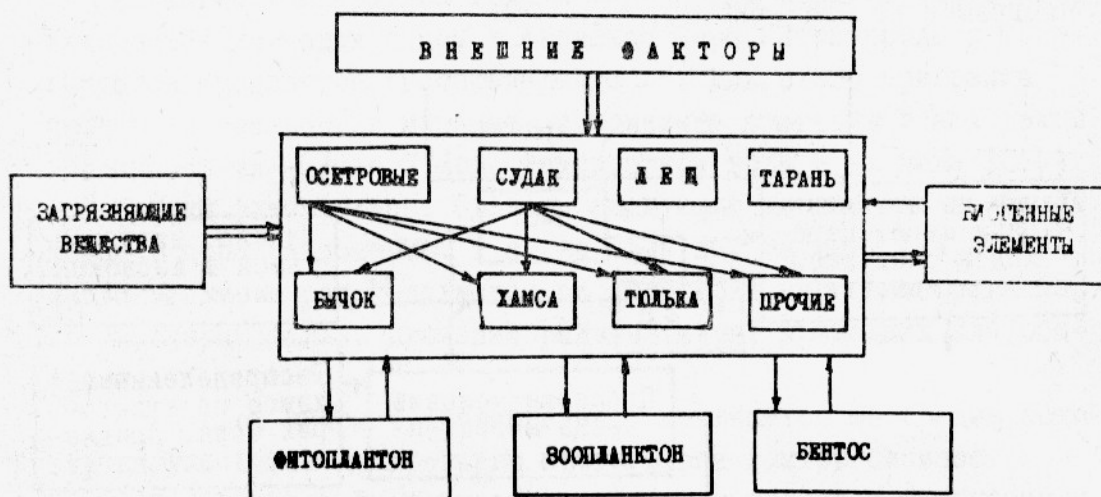


Рис. I. Взаимодействие блока "Рыба" с другими блоками имитационной системы:

—— — трофические связи; == — иные отношения

Обозначим через B и N биомассу и численность популяции. Процесс питания моделируется в процедуре "Корм" по следующему алгоритму. По заявке на i -ый вид корма проверяется возможность ее удовлетворения для всей популяции $q_i = \frac{K_i}{N} - R_i$. Величину q_i назовем невязкой.

1. Если $q_i > 0$, то заявка удовлетворена, при этом фиксируется остаток биомассы этого вида корма. Будем предполагать, что в случае нехватки корма, обладающего более высоким приоритетом, этот остаток потребляется рыбой для восполнения неудовлетворенного спроса.

2. Если $q_i < 0$, то просматривается вектор невязок $A = \{a_1, a_2, \dots, a_{i-1}\}$ и неудовлетворенный спрос ликвидируется за счет видов корма, имеющих положительные невязки q_j .

Если же все $a_j (j = 1, 2, \dots, i-1)$ неположительны (случай 2) или все $a_j (j = 1, 2, \dots, i-1)$ неотрицательны (случай 1), а также, когда $q_i = 0$, следует переход к виду корма $i + 1$.

В результате расчетов по данному алгоритму преобразуются величины B и N получением положительных или отрицательных приращений ΔB и ΔN соответственно.

Моделирующий алгоритм блока "Хамса" реализован в виде программы на ЭВМ (рис.2).

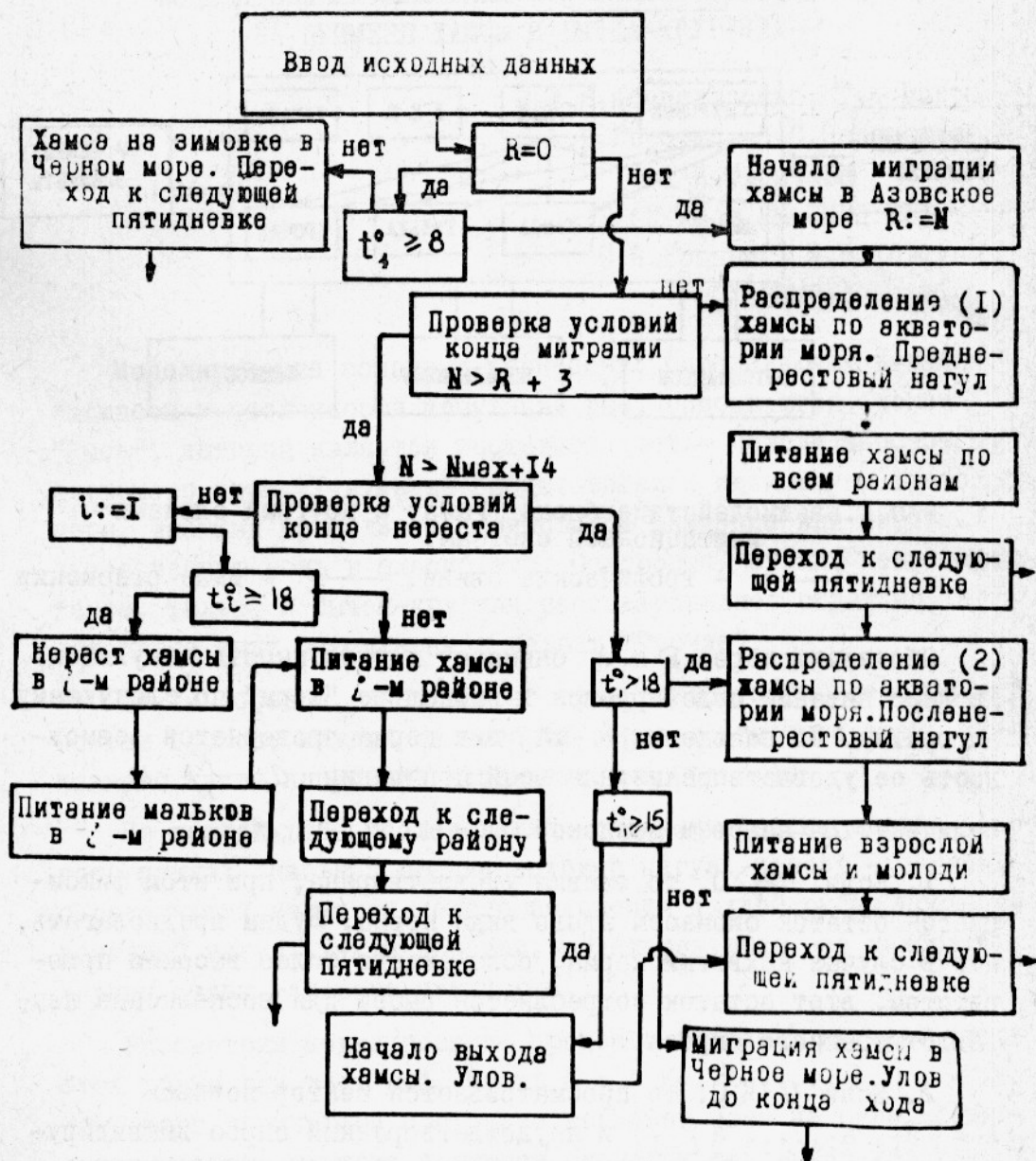


Рис.2. Блок-схема модели "Хамса":

i - номер района ($i = 1, 2, \dots, 7$); N - номер пятидневки; R - счетчик, фиксирующий начало весенней миграции хамсы в Азовском море; t_i^o - температура воды в i -ом районе моря

1. Поскольку хамса не зимует в Азовском море, а появляется в нем после середины апреля, мигрируя из Черного моря, процесс зимовки ее в программе, реализующей моделирующий алгоритм данного блока, не учитывается.

2. Когда температура воды в Керченском проливе равна 8°C , начинается миграция хамсы в Азовское море. Этот процесс моделируется процедурой "Распределение I". Для этого программа проверяет все районы моря на пригодность обитания в них хамсы (соленость их - выше $7^{\circ}/\text{oo}$, температура воды - не ниже 10°C). Эти районы фиксируются. Сделаны следующие допущения: хамса заходит в море равномерно, т.е. за один шаг заходит $1/4$ часть всего стада, и распределяется по акватории моря тоже равномерно, пропорционально площадям районов моря, пригодных для обитания.

С заходом хамсы в Азовское море начинается ее преднерестовый нагул. Для моделирования этого этапа вектор биомасс $B = \{B_1, B_2, \dots, B_7\}$ преобразуется - подвергается описанной выше процедуре "Корм", в результате чего вычисляются измененные биомассы хамсы в каждом районе.

3. Поскольку сигналом к началу нереста в значительной мере является температура воды (обычно до 18°C), то в программе после завершения процедуры "Распределение I" проверяется температура по всем районам обитания и фиксируются те из них, где температура оказывается не меньше 18°C . Также фиксируется номер соответствующей пятидневки ($N_{\text{нач},i}$) - начало нереста хамсы в i -ом районе. Компоненты N_{ji} и B_i векторов численности и биомассы N_j и B преобразуются процедурой "Нерест", в результате чего подсчитывается численность и биомасса нового урожая молоди.

Эффективность нереста, т.е. величина нового урожая, зависит от большого числа факторов. Анализируя данные многолетних наблюдений, можно отметить, что на качество урожая хамсы особенно сильно влияет численность производителей. Зависимость величины нового урожая от числа производителей используется в моделировании процесса нереста при подсчете численности мальков, появившихся на N -м шаге в i -м районе.

$$N_{\text{пол},i}^N = N_{\text{пол},i}^{N-1} + K_1^N \cdot K_2^N \cdot N_{ji}^N \cdot N_{\text{сеч},i},$$

где $N_{\text{мол. } i}$ - численность мальков, появившихся в i -м районе на шаге N :

$N_{\text{сег.}}$ - количество сеголеток в расчете на одного производителя;

K_1 - коэффициент, указывающий долю производителей, участвующих в нересте;

K_2 - коэффициент, характеризующий влияние остальных факторов на изменение векторов $N_{\text{мол.}}$ и $B_{\text{мол.}}$ в процедуре "Нерест".

Известно, что нерест хамсы длится в среднем 2,5 мес., что соответствует примерно 14-ти пятидневкам. Зная значение $N_{\text{нач. } i}$, т.е. номер пятидневки начала нереста в i -ом районе, определяется время окончания нереста в тех районах моря, где он происходил. Это соответствует пятидневке с номером $N_{\text{нач. } i} + 14$. Однако, учитывая тот факт, что размножение хамсы по акватории моря начинается, как правило, не в одно время, процедура "Нерест" работает в программе до шага с номером $N_{\text{max}} + 14$,

где $N_{\text{max}} = \max_i N_{\text{нач. } i}$, $i = 1, 2, \dots, 7$.

Когда номер шага станет больше значения $N_{\text{max}} + 14$, программа рассчитывает численность нового урожая, суммируя количество мальков по всем районам.

4. После нереста хамса распределяется по морю (предполагается, что равномерно). Векторы численностей и биомасс взрослой хамсы и молоди суммируются, определяя ее общий запас. В течение шагов, соответствующих по времени периоду нагула хамсы, эти векторы преобразуются - подвергаются воздействию процедуры "Корм". Распределение и питание хамсы продолжается до того момента, когда температура воды в первом районе превышает 18°C . Сосредоточивается хамса в первом и втором районах при более низкой температуре, что учтено в программе, которая распределяет всю популяцию в соответствующих районах.

Проверяя на каждом шаге температуру воды в первом районе, программа фиксирует начало выхода хамсы в Черное море (при снижении температуры воды в Азовском море до $18-15^{\circ}\text{C}$).

В период осенней миграции ведется промысловый лов хамсы. Известно, что первыми выходят из Азовского моря сеголетки, а после охлаждения воды в проливе (ниже 15°C) мигрируют и взрос-

лые особи. Соответственно, и в программе на каждом шаге определяется численность хамсы, мигрирующей в Черное море, с учетом вылова, а также подсчитывается ее остаток.

Когда этот остаток станет равным нулю, счет прекратится. На выходе мы получим численность нового урожая, величину улова и численность азовской популяции хамсы с учетом улова.

Описанный выше моделирующий алгоритм был использован для численных экспериментов. Исходные данные о численности и биомассе возрастных групп хамсы, а также результаты расчетов приведены ниже.

Численность (числитель, млн.шт.) и биомасса (знаменатель, тыс.ц) поколения хамсы

Август 1971 г.

Возраст	
0+	$\frac{40027}{1076}$
1+	$\frac{10950}{951}$
2+	$\frac{7780}{772}$
3+	$\frac{59}{5}$

Сентябрь 1972 г.

Фактическая	$\frac{39792}{1865}$
Расчетная	$\frac{25247}{1207}$

Отклонения расчетных величин от фактических составляют соответственно 36 и 35%. Такой результат для первого этапа моделирования столь сложной системы вполне удовлетворителен.

Бычок-кругляк — важнейший компонент экосистемы моря, где он является одним из основных утилизаторов продукции бентоса. Кроме того, это важная промысловая рыба, уловы которой достигали 906 тыс.ц., а за последнее десятилетие составляли в среднем 425 тыс.ц.

Основные этапы годового цикла жизни популяции бычка /1-5/ отражены в моделирующем алгоритме (рис.3).

Зимовка. При температуре воды ниже 5°C бычок-кругляк становится пассивным и почти не питается. Зимует он в основном в северной и северо-восточной части центрального района Азовско-

го моря. В связи с этим в модели проверяется температура воды во втором районе для выяснения возможности обитания бычка в предполагаемых районах зимовки.

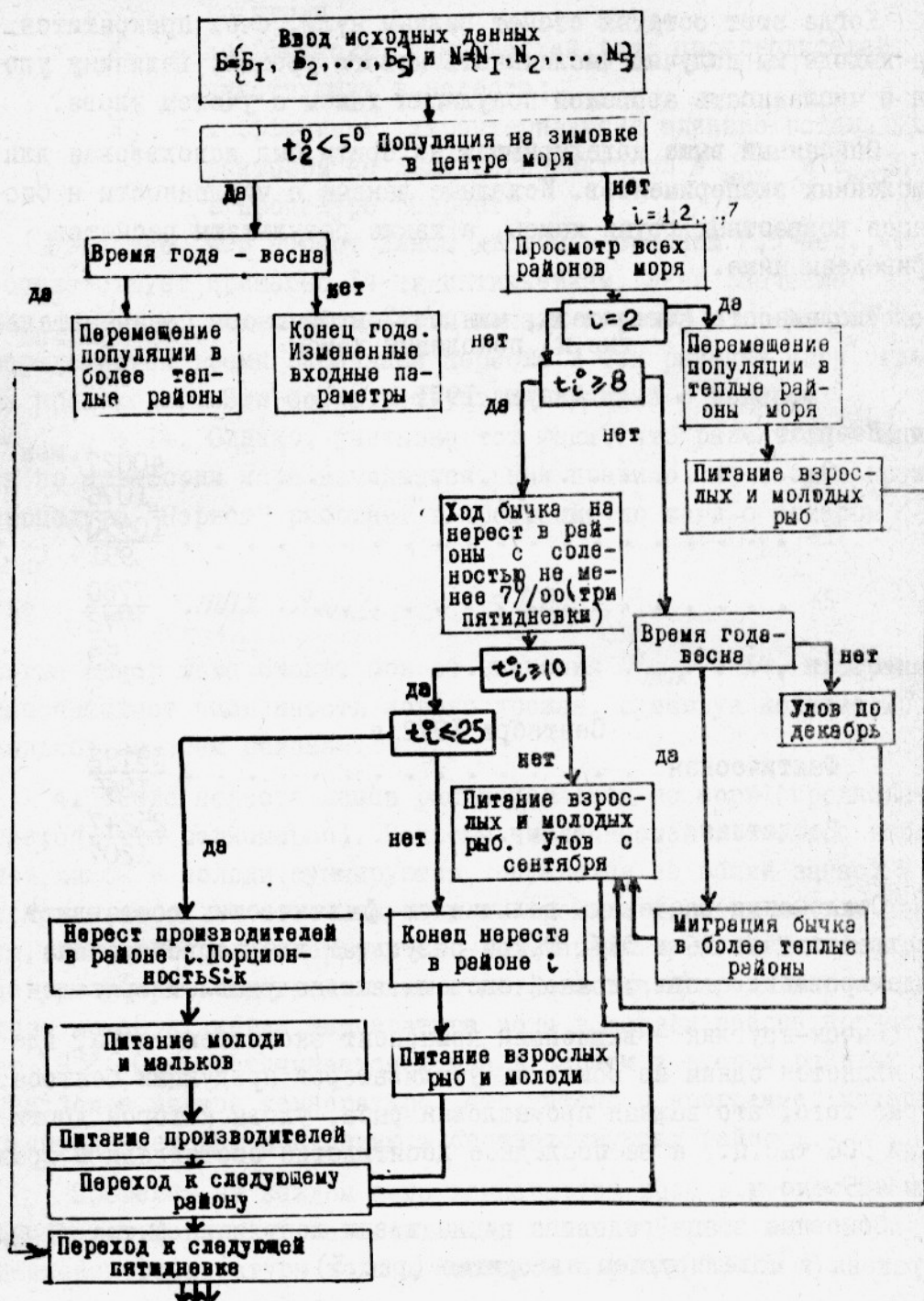


Рис.3. Блок-схема модели "Бычок-кругляк":

$B = \{B_1, B_2, \dots, B_5\}$ - вектор биомассы возрастных групп; $N = \{N_1, N_2, \dots, N_5\}$ - вектор численности возрастных групп; i - номер района; t_i^0 - температура воды в районе.

Температура воды во втором районе может быть ниже 5°C либо весной, когда бычок еще зимует, либо осенью, когда рыба уходит на зимовку. Если бычок находится в районе зимовки, то при прогревании воды в более мелких районах, граничащих со вторым, какая-то часть рыбы будет уходить кормиться в эти районы.

Допускается, что рыба полностью заходит в район зимовки, если температура воды в этом районе будет меньше 5° в течение трех пятидневок, в противном случае рыба продолжает питаться в тех районах моря, где температура воды не меньше 5°C и отсюда постоянно подходит в район зимовки. Подобное допущение не существенно, но введено с целью экономии машинного времени.

Программа реализует описываемый алгоритм при помощи введенной в нее функции $f(t^o, g^o)$, зависящей от температуры воды t^o и прочих факторов g^o , среди которых наиболее важно состояние кормовой базы. Она служит для определения той части популяции, которая покидает район.

Здесь и в дальнейшем численность кругляка в районах моря в каждый момент времени пересчитывается по формуле:

$$N_i^t = N_i^{t-1} + f(t^o, g^o) \cdot N_j^t,$$

где j - рассматриваемый район моря;
 i - район соседний с j .

Преднерестовый нагул и нерест. Ввиду того, что нерестовые миграции бычка-кругляка главным образом определяются температурой воды, подсчитывается половозрелая часть стада, непосредственно участвующая в нересте, введением некоторой функции $g(t)$, так что

$$N_H^t = N_H^{t-1} + g(t^o) \cdot N^t,$$

где N_H^t - численность участвующих в нересте особей в рассматриваемом районе в данный момент времени t .

Районы, непригодные для нереста, исключаются проверкой условий на соленость воды; район 2 не рассмотрен.

Предполагается, что подход на нерест длится в течение трех пятидневок, что фиксируется счетчиком. На самом деле подход бычка в нерестилищах длится приблизительно 15 дней. Поскольку нерест осуществляется порционно (может выметываться до пяти порций), то счетчик S_{ik} указывает, какую порцию мечет рыба,

зашедшая на нерест в район i через k пятидневок после начала хода.

Икрометание продолжается в течение всего периода, когда температура воды остается выше 10°C , и заканчивается, когда она достигает 25°C .

Известно, что отложив очередную порцию икры, самки отходят от берега и в течение 18 дней кормятся, поэтому в программе предусмотрено изменение их биомассы под воздействием описанной выше процедуры "Корм".

Количество выживших мальков определяется следующим соотношением:

$$N_{мл.iks} = a \times N_{Hiks},$$

где N_{Hiks} - численность особей, зашедших через k пятидневок от начала хода в i район на нерест, откладывающих S -ю порцию икры.

Коэффициент a выбирается с учетом средней плодовитости для бычка-кругляка и условий, в которых происходит нерест.

Неучаствующие в процессе нереста особи (молодь и мальки, уже появившиеся от других производителей), в течение всего периода нереста кормятся, т.е. находятся под воздействием процедуры "Корм".

После нереста, который длится до середины августа, бычок-кругляк отходит от берегов в районы нагула. Здесь, начиная с 15 сентября и по декабрь, его ловят (отлавливается до 30% стада).

Результаты работы описанного моделирующего алгоритма - преобразованные значения численности и биомассы популяции бычка.

По программе, реализующей этот алгоритм, проведены численные эксперименты. Исходными данными служили биомасса и численность популяции по состоянию на октябрь 1971 г.

Данные по состоянию на октябрь 1972 г.

Показатели	Фактические	Расчетные	Ошибки расчетов, %
Численность, млн.шт.	655	673	3
Биомасса, тыс.ц	108	139	28

Из приведенных данных следует, что процент ошибки между фактическими и расчетными данными по численности и биомассы бычков-кругляков составляет около 30%.

Список использованной литературы

1. Ш у л ь м а н Г.Е., В е н г р ж и н Е.П., Д у б и н и -
н а В.Н. Особенности газового обмена бычков Азовского
моря в связи с условиями обитания. "Вопросы ихтиологии",
1957, вып.8, с.77.
2. М и х м а н А.С. О плодовитости азовских бычков-кругляка
и сирмана. Труды АЗНИИРХ, 1963, вып.6, с.105.
3. К о с т ю ч е н к о В.А. Распределение бычка-кругляка в
Азовском море в связи с распределением его кормовой базы
Труды АзчерНИРО, 1955, т.16, с.157.
4. К о с т ю ч е н к о В.А. Питание бычка-кругляка и исполь-
зование им кормовой базы Азовского моря. Труды АЗНИИРХ,
1960, т.1, вып.1, с.341.
5. К у д е л и н а Е.Н. Суточный рацион мальков бычков-
кругляка и рыжика на ранних этапах развития. Труды
АЗНИИРХ, 1963, вып.6, с.83.
6. Г р у д и н и н П.И. Прогнозирование запаса азовской хам-
сы. "Рыбное хозяйство", 1963, № 12, с.21.
7. К о р н и л о в а В.П. Питание азовской хамсы. Труды
ВНИРО, 1955, т.31, вып.1, с.368-378.
8. К о р н и л о в а В.П. Питание хамсы и тюльки в услови-
ях нового режима Азовского моря. Труды АЗНИИРХ, 1960,
т.1, вып.1, с.361.
9. К а л и н и н а Э.М. Допустимые и критические concentra-
ции кислорода для молоди. Труды Севастопольской биол.
станции, 1961, т.14, с.215-219.

Modelling of the dynamics of fish populations
from the Azov Sea with special reference to
anchovy and round goby

L.V. Abetsedarskaya, S.P. Volovik,
T.A. Voron, A.B. Gorstko,
N.S. Zadorozhnaya, I.O. Kovtun,
V.Yu. Sycheva

S u m m a r y

Since 1930 data have been collected on the dynamics of populations of most important species of fish from the Azov Sea. Regularities and relationships characterizing variations in the parameters of fish populations have been ascertained. One of the main blocks, FISH from the simulation model of the ecosystem is generally described. The processing of data in separate blocks referred to such abundant marine species of fish as anchovy and round goby is discussed. The error of computed results at modelling the population dynamics and biomass within an annual cycle constitutes about 35% as compared to actual observations.

РЕФЕРАТЫ

УДК 31:556.16(262.54)

Основные статистические параметры и циклические вариации материкового стока в Азовское море. А.М.Бронфман, С.В.Козли-тина, Л.А.Кучай. Труды ВНИРО, 1976, т.118, с. 8-18.

Проанализированы функции распределения вероятностей, статистические критерии законов их распределения, дисперсии, коэффициенты вариации, асимметрия и эксцесс стока Дона и Кубани. Расчеты характеристик выполнены на ЭВМ "Наири-2" для всей совокупности рядов и отдельных участков, характеризующихся режимом измененной хозяйственной деятельностью на водосборе.

Современное водохозяйственное строительство в бассейне не внесло принципиальных изменений в статистические характеристики стока. На основании спектрального анализа выделены основные циклические флуктуации водности Дона и Кубани, подробно обоснована их геодезическая природа.

Табл.2, илл.2, библи.16.

УДК 31:551.464.5(262.54)

Статистический подход в задаче построения прогнозирующих функций солёности Азовского моря. Л.А.Кучай. Труды ВНИРО, 1976, т.118, с. 19-26.

Освещена проблема моделирования временного ряда, значениями которого являются среднегодовые величины солёности Азовского моря. Предложена параметрическая модель с одним параметром, представляющим собой среднегодовую величину солёности Азовского моря, которая дает возможность прогнозировать исходный временной ряд на один-два года вперед. Приведена проверка адекватности полученной модели данным наблюдений.

Табл.5, илл.1, библи.2.

Моделирование естественного процесса воспроизводства проходных рыб Азово-Кубанского района. Ю.М.Гаргопа, С.В.Козлитина. Труды ВНИРО, 1976, т.118, с. 27-33.

Исследования при помощи электронно-вычислительных машин позволили получить ряд уравнений множественной корреляции, удовлетворительно ($r = 0,71-0,89$) аппроксимирующих зависимость естественного воспроизводства севрюги, рыбака и шемаи от стока Кубани, температуры воды и воздуха, солености Азовского моря в различные стадии онтогенеза. Для достижения необходимого уровня воспроизводства осетровых на нерестилища среднего течения Кубани следует в мае-августе подавать около 3 км^3 воды; сток речных вод в море по устьям в апреле-августе должен составлять в среднем 6 км^3 , расходы воды по устьям в период хода производителей рыбака и шемаи (сентябрь-декабрь) не должны превышать $90 \text{ м}^3/\text{сек}$.

В целом оптимальный объем попуска речных вод в море, необходимый для создания благоприятных экологических условий для севрюги, рыбака и шемаи в нижнем течении Кубани и предустьевом взморье, равен около $6,9 \text{ км}^3$.

Библ.4.

Применение математических моделей при обосновании требований рыбного хозяйства к водным ресурсам нижнего Дона. В.Г.Дубинина, С.В.Козлитина. Труды ВНИРО, 1976, т.118, с. 34-47.

Осуществлена попытка применения математических моделей для обоснования требований рыбного хозяйства к водным ресурсам нижнего Дона, для чего исследованы колебания запасов полупроходных рыб в зависимости от повторяемости стока Дона и среднегодовой солености моря.

Трансформация весеннего стока на 1 км^3 эквивалентна изменению годового стока на 2 км^3 , т.е. колебания весеннего и годового стока на 1 км^3 приводят к изменению запасов на 80 и 40 тыс.ц соответственно. Варьирование биомассы полупроходных рыб в основном обусловлено соленостью моря, изменение которой на $1^0/00$ влечет за собой увеличение или уменьшение запасов на 230-400 тыс.ц.

Для снижения современной солености моря ($13^0/00$), создания необходимых условий обитания и приведения численности популяции полупроходных рыб к среднегодовым значениям требуется в течение шести лет осуществлять весенние выпуски объемом 14 км^3 , при годовом стоке Дона 27 км^3 и при общем материковом стоке в Азовское море не менее 43 км^3 .

Для поддержания оптимального солевого режима и дальнейшего увеличения запасов полупроходных рыб необходимо подавать в море ежегодно 14 км^3 донской воды весной и 20 км^3 в течение года или 12 и 25 км^3 соответственно, при общем материковом стоке в Азовское море не менее 39 км^3 , что возможно лишь в случае переброски стока в объеме порядка 30 км^3 (на уровень 2000 г.).

Табл.2, библи.9.

УДК 577.4:517.959.2(262.54)

Имитационная система "Азовское море". А.Б.Горстко.
Труды ВНИРО, 1976, т.118, с. 48-55.

В работе изложены принципы, положенные в основу создания имитационной системы "Азовское море". Описаны два варианта функционирования этой системы.

Методика построения имитационной системы отличается от применявшихся ранее тем, что она позволяет использовать значительный объем плохо формализованной биологической информации.

Не последнюю роль играет и возможность выбора для каждого блока наиболее подходящего метода моделирования, иногда отличающегося от методов, применяемых в других блоках.

Илл.2, библи.4.

УДК 551.465.15(262.54)

О динамике водных масс Азовского моря. Ф.А.Сурков. Труды ВНИРО, 1976, т.118, с. 56-61.

Исследуемая имитационная модель перераспределения растворенных и взвешенных в толще воды веществ по акватории моря основана на предположениях, позволяющих избежать использования приближенных методов решения задач гидродинамики. В то же время модель учитывает влияние на динамику водных масс и компонент водного баланса Азовского моря и ветровой деятельности

над его поверхностью. Предварительные расчеты для режима солености различных районов моря дали хорошие результаты. Модель может быть использована для анализа динамики концентраций различных веществ в водах Азовского моря и в случае создания Керченского гидроузла.

Илл. I, библиография 5.

УДК 551.465.63:519.242.37(262.54).

Статистическая модель формирования солености Азовского моря. А.М.Бронфман, Ф.А.Сурков. Труды ВНИРО, 1976, т. II8, с. 62-69.

Приведен статистический анализ гидрометеорологических факторов, влияющих на изменение солености моря, из их числа выделяются факторы, наиболее существенные, в статистическом смысле. Построена линейная модель формирования солености с высокой степенью достоверности, рассмотрены возможные области ее применения.

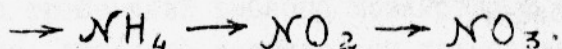
Табл. 3, библиография 8.

УДК 543.34:517.949.8(262.54)

К моделированию круговорота азота в Азовском море. А.М.Бронфман, В.Г.Ильичев. Труды ВНИРО, 1976, т. II8, с. 70-77.

Процессы распада органического вещества в Азовском море разнообразны. Поэтому проследить пути появления минеральных форм азота (аммиак, нитриты, нитраты) практически невозможно. Выделена основная цепочка разложения органического вещества:

Мертвые организмы $\rightarrow$ белковоподобные глинокислоты $\rightarrow$



Эта многоступенчатая реакция, описана системой дифференциальных уравнений с коэффициентами, зависящими от температуры и кислорода. Модель позволяет учитывать и ряд внешних факторов - поступление азота с атмосферными осадками, речным стоком и т.д.

Некоторые параметры модели, например, константы скоростей химических реакций удалось получить, сравнивая машинные расчеты с реальными наблюдениями.

Илл. 2, библиография 7.

УДК 58I.526.32:55I.465.8:5I7.925(26.04+262.54)

Математическая модель трансформации биогенных веществ Таганрогского залива. Ю.А.Домбровский, Е.А.Чернус. Труды ВНИРО, 1976, т.II8, с. 78-86.

Описана математическая модель трансформации биогенных веществ Таганрогского залива. Предполагается, что круговорот биогенных элементов состоит из трех основных процессов: продуцирования фитопланктоном органического вещества из неограниченного, отмирания и распада живых организмов и последующей минерализации органического вещества. Трансформация азота в результате этих процессов описана системой обыкновенных дифференциальных уравнений.

Зависимость интенсивности процессов от температуры и солености водоема учитывается коэффициентами уравнений, которые предполагаются функциями этих внешних факторов.

Приведены расчеты по модели после ее идентификации. Модель правильно качественно описывает исследуемые процессы, а динамику фитопланктона и количественно.

Табл.2, илл.5, библ.7.

УДК 58I.526.32:5I7.949(262.54)

Математическая модель динамики фитопланктонных сообществ Азовского моря. А.Я.Алдакимова, Ф.А.Сурков, В.Л.Шустова. Труды ВНИРО, 1976, т.II8, с.87-93.

Описана работа блока "Фитопланктон" - одного из основных блоков имитационной системы "Азовское море". Этот блок позволяет рассчитывать биомассы фитопланктона по отдельным видам, массу отмершего фитопланктона, количество биогенных веществ, потребленных фитопланктоном в течение каждого периода времени и изменение содержания биогенных элементов в веществе фитопланктона.

Математическая модель блока позволяет проследить за всеми изменениями с фитопланктоном в течение года, а также прогнозировать развитие фитопланктона и появление новых видов в Азовском море (например, в годы осолонения).

Расчеты по программе, составленной для блока "Фитопланктон", с использованием наблюдений над биомассами разных видов

фитопланктона в Азовском море дали положительные результаты: тенденция изменения биомассы различных видов фитопланктона улавливается правильно. Следовательно, предположения, положенные в основу блока, были верными.

Илл.3, библи.5.

УДК 591.524.1:594:595+1+3:517.949.2(262.54)

Моделирование динамики биомассы зоопланктона и бентоса. А.Б.Горстко, О.Г.Мордвинова, М.Я.Некрасова, Е.И.Студеникина. Труды ВНИРО, 1976, т.118, с.94-101.

В предлагаемых моделях описаны закономерности динамики биомассы зоопланктона и бентоса Азовского моря и факторы, ее обуславливающие.

Илл.3, библи.5.

УДК 591.524.1:597:517.949.2(262.54)

Моделирование динамики популяций азовских рыб на примере хамсы и бычка-кругляка. Л.В.Абецедарская, С.П.Воловик, Т.А.Ворон, А.Б.Горстко, Н.С.Задорожная, И.О.Ковтун, В.Ю.Сычева. Труды ВНИРО, 1976, т.118, с.102-112.

С 1930 г. накоплен материал, характеризующий динамику популяций качественного состава основных представителей ихтиофауны Азовского моря, установлены закономерности и связи, характеризующие изменения параметров популяций рыб.

Приведена общая характеристика одного из основных блоков модели "Рыба" имитационной модели экосистемы. Рассмотрена реализация моделирования по частным блокам, относящимся к массовым морским рыбам - хамсе и бычку-кругляку. Ошибка расчетных данных при моделировании динамики численности и биомассы этих рыб в течение годового цикла составила, по сравнению с фактическими около 35%.

Илл.3, библи.9.

ВОПРОСЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ
И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ
АЗОВСКОГО МОРЯ

Редактор Е.И.Каменская
Техн.редактор Т.Г.Таривердиева

Отдел научно-технической информации ВНИРО

Л - 57204

Подписано к печати 21.07.76г.

Формат 70x108/16

Заказ № 94

Тираж 575 экз.

Объем - 6,1 п.л.

Цена 0 р. 70 к.

Ротапринт ВНИРО
Москва, 107140, Верх.Красносельская,17