

УДК 551.465.15(262.54)

## О ДИНАМИКЕ ВОДНЫХ МАСС АЗОВСКОГО МОРЯ

Ф.А.Сурют  
НИИМ и ПМ СКНИ 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.

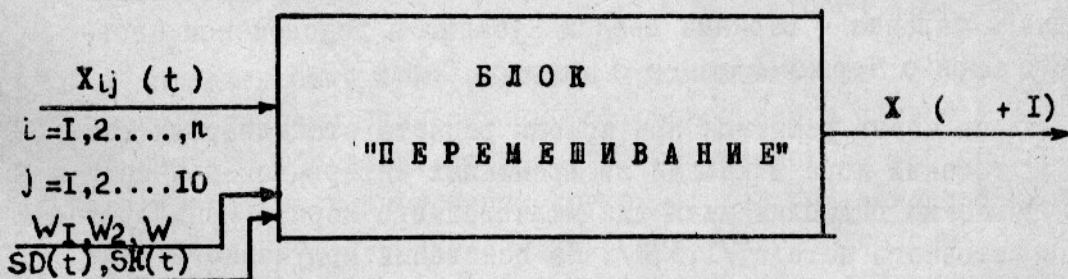


Схема работ блока "Перемешивание"

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

$$\Delta H_i(t+1) = k_{1i} \operatorname{arctg} \frac{W_1}{k_2},$$

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.1, 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.ХI, 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.