

УДК 51 : 639.2

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ПОИСКОВОГО И ДОБЫВАЮЩЕГО ФЛОТА В РАЙОНЕ ПРОМЫСЛА

В.В.Старов, И.Б.Колмаков

Имитационной моделью называется человеко-машинная система, объединяющая экспертов, ЭВМ, специальное математическое обеспечение и позволяющая воспроизводить изучаемые процессы в моделируемых объектах. Программы имитационной модели содержат формализованный аналог объекта, отображающий его структуру, функциональные зависимости, связи и динамику протекающих в нем процессов. Более подробное определение имитации можно найти в работе Т.Нейлора (1975)^ж).

Имитационная модель совместной работы поискового и добывающего флота в районе промысла позволяет при выбранных критериях эффективности сравнивать различные схемы оперативного управления добывающим и поисковым флотом на промысле и выбирать из них наиболее пригодные для практики управления (предполагается, что управление осуществляется штабом экспедиции в условиях некоторой неопределенности, т.е. неполноты информации о промысловой обстановке).

Модель состоит из двух частей: первая имитирует состояние внешней среды (сырьевую базу, промысловую обстановку), вторая - деятельность поискового и добывающего флота в районе промысла.

Модель состояния сырьевых ресурсов. На состояние сырьевой базы влияет множество факторов, но в модели учитываются лишь наиболее важные. Эти факторы разделены на три группы: состояние внешней среды;

ж) Нейлор Т. Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем. М., "Мир", 1975,

состояние сырьевых ресурсов без учета деятельности флота;
состояние сырьевых ресурсов с учетом деятельности флота.

Район промысла, в котором рассматривается состояние сырьевых ресурсов, представляется в виде M квадратов, занумерованных от I до M

Состояние внешней среды в модели предлагается характеризовать тремя группами параметров:

- Γ_1 - гидрологическими (температура и соленость воды);
- Γ_2 - гидрометеорологическими (волнение моря, давление);
- Γ_3 - гидробиологическими (количество питательной среды в 1 м^3 воды).

Модель состояния внешней среды представляется в виде набора вектор-функций:

$$\bar{\Gamma}^P(t) = (\Gamma_1^P(t), \Gamma_2^P(t), \Gamma_3^P(t)), \quad P = 1, 2, \dots, M, \quad t \in [0, T].$$

Состояние сырьевых ресурсов без учета деятельности флота в районе промысла, т.е. распределение перемещающихся косяков рыб, характеризуется следующими параметрами:

- V_1 - возможный вылов на промысловое усилие;
- V_2 - количество рыбы в косяке (мощность косяка);
- ρ - координаты косяка (номер квадрата).

Модель такого распределения представляет собой набор вектор-функций

$$\bar{V}^n(t) = (V_1^n(t), V_2^n(t), \rho^n(t)), \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad t \in [0, T]$$

где N - количество косяков.

Состояние (перераспределение) сырьевых ресурсов с учетом деятельности флота описывается следующей группой параметров:

- Y_1 - эффективность усилия;
- Y_2 - остаточная мощность косяка;
- Y_3 - координаты отлавливаемого косяка.

Модель такого перераспределения определяется вектор-функциями

$$\bar{Y}^n(t) = (Y_1^n(t), Y_2^n(t), Y_3^n(t)), \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad t \in [0, T],$$

компоненты которых задаются формулами

$$y_1^n(t) = V_1^n(t) \cdot \frac{y_2^n(t)}{V_2^n(t)} ; \quad (1)$$

$$y_2^n(t) = (V_2^n(t) - S^n(t)) \cdot \text{sign}(V_2^n(t) - S^n(t) - V_{20}), \quad (2)$$

где $S^n(t)$ - количество рыбы, изъятой из n -го косяка добывающим флотом к моменту времени t ;

V_{20} - порог, ниже которого косяк считается непромысловым;

$$y_3^n(t) = P^n(t) \cdot \text{sign } y_2^n(t). \quad (3)$$

Способ формирования функций $S^n(t)$ проиллюстрирован на рис. I для случая $N = 2, M = 3$. Входной информацией здесь являются функции $y_3^n(t)$ ($n = 1, 2$), определяющие номер квадрата, в котором находится n -й косяк в момент времени t . Функции $x_p^n(t)$ ($p = 1, 2, 3$) отражают фактическую интенсивность лова в P -м квадрате в момент времени t и определяются по формуле (23).

Функции $\delta_{py_3^n}$ ($p = 1, 2, 3; n = 1, 2$) определяются по формуле

$$\delta_{py_3^n} = \begin{cases} 1 & \text{при } P = y_3^n \\ 0 & \text{при } P \neq y_3^n \end{cases} \quad (4)$$

Эти функции выражают наличие (при $\delta_{py_3^n} = 1$) или отсутствие (при $\delta_{py_3^n} = 0$) n -го косяка в P -м квадрате. Суммированием ($\sum_p, p = 1, 2, 3$) определяется количество косяков рыб в P -м квадрате в момент времени $t \in [0, T]$. Таким образом, α_p может принимать значения 0, 1, 2, а функции $\beta_p(t)$ определяют интенсивность добычи из каждого косяка, находящегося в любой момент времени t в P -м квадрате. Смысл блоков произведения и интегрирования понятен из рис. I.

Состояние внешней среды и сырьевых ресурсов в каждом квадрате с учетом деятельности добывающего флота описывается набором M вектор-функций

$$\bar{W}^P(t) = (\Gamma_1^P(t), \Gamma_2^P(t), \Gamma_3^P(t), W_4^P(t), W_5^P(t)), P = 1, 2, \dots, M, t \in [0, T].$$

где количество рыбы в P -м квадрате в момент времени t выражается формулой

$$W_4^P(t) = \sum_{n=1}^N y_2^n(t) \cdot \delta_{py_3^n}(t) \quad (5)$$

$$W_5^P(t) = \begin{cases} \frac{1}{W_4^P(t)} \sum_{n=1}^N y_1^n(t) y_2^n(t) \delta_{py_3^n}(t) & \text{при } W_4^P(t) \neq 0 \\ 0 & \text{при } W_4^P(t) = 0, \end{cases} \quad (6)$$

где $W_5^P(t)$ - усредненный вылов на промысловое усилие в P -м квадрате в момент времени t .

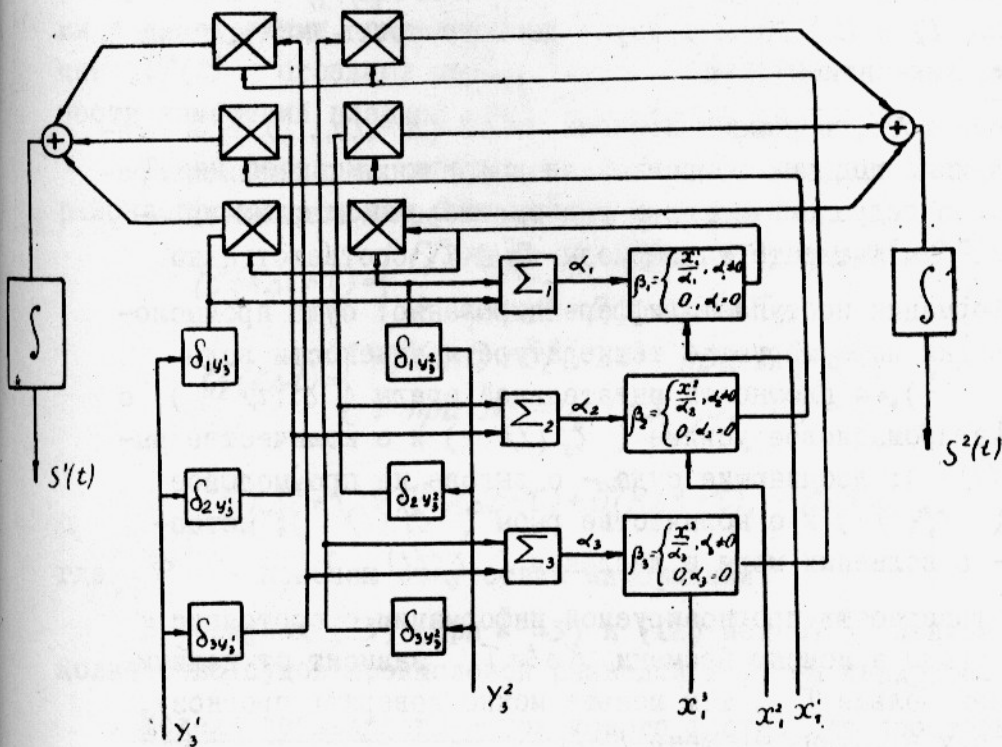


Рис. I. Схема формирования функций $S^n(t)$.

Информация о наличии сырьевых ресурсов и состоянии внешней среды в различных квадратах собирается судами промышленной разведки, добывающими судами и гидрометеорологической службой погоды с некоторой регламентированной периодичностью Δt .

Поступление информации о сырьевых ресурсах и внешней среде в штабы экспедиций моделируется формированием случайных последовательностей векторов

$$\{ \bar{\zeta}^P(0), \bar{\zeta}^P(\Delta t), \dots, \bar{\zeta}^P(K \cdot \Delta t), \dots \},$$

где верхний индекс P при векторе $\bar{\zeta}$ показывает номер квадрата, для которого в данный момент в штабе экспедиции получены сообщения.

Случайная векторная величина $\bar{\xi}^P(K \cdot \Delta t)$ должна удовлетворять условиям

$$E \bar{\xi}^P(K \cdot \Delta t) = \bar{W}^P(K \cdot \Delta t), \quad P = 1, 2, \dots, M, \quad K \Delta t \in [0, T]; \quad (7)$$

$$D \xi_i^P(K \cdot \Delta t) = C_i^P(K \cdot \Delta t), \quad i = 1, 2, \dots, 5, \quad P = 1, \dots, M, \quad K \Delta t \in [0, T], \quad (8)$$

где числа $C_i^P > 0$ характеризуют достоверность поступающих сообщений.

Кроме того, в момент времени $K \Delta t$ ($K = 0, 1, \dots$) в штаб экспедиций поступает прогнозная информация о внешней среде: прогноз гидрологических и гидрометеорологических параметров в P -м квадрате на периоды τ_1 и τ_2 соответственно.

Информация поступает дифференцированно: суда промысловой разведки информируют о температуре и солености воды ($\xi_1^P(t)$), о плотности питательной среды ($\xi_3^P(t)$), о вылове на промысловое усилие ($\xi_5^P(t)$) и о количестве рыбы ($\xi_4^P(t)$); добывающие суда - о вылове на промысловое усилие ($\xi_5^P(t)$) и о количестве рыбы ($\xi_4^P(t)$); метеослужба - о волнении моря и давлении ($\xi_2^P(t)$).

Достоверность прогнозируемой информации о состоянии внешней среды в момент времени $K \Delta t + \tau$ зависит от величины τ : чем больше τ , тем меньше можно доверять прогнозу, полученному в момент времени $K \Delta t$.

Кроме того, достоверность сообщений, за исключением метеосводок, зависит от представительности источников информации.

В модели эти зависимости учитываются следующим образом:

$$C_1^P(K \Delta t + \tau) = \frac{a_1^2}{\sqrt{N^P(K \Delta t)}} + b_1 \tau, \quad 0 \leq \tau \leq \tau_1, \quad N^P \neq 0; \quad (9)$$

$$C_2^P(K \Delta t + \tau) = a_2^2 + b_2 \tau, \quad 0 \leq \tau \leq \tau_2 \quad (10)$$

$$C_i^P(K \Delta t) = \frac{a_i^2}{\sqrt{N^P(K \Delta t)}}, \quad i = 3, 4, 5; \quad N^P \neq 0, \quad (11)$$

где $a_i^2, b_i = \text{const}$;

N^P - количество судов в P -м квадрате.

При $N^P = 0$ формулы (9) и (11) теряют смысл. В этом случае можно считать, что никаких сообщений, кроме метеосводок, не поступало в штаб экспедиции из P -го квадрата.

Информационная модель состояния сырьевых ресурсов и внешней среды реализуется суммированием вектор-функций

$$\bar{W}^P(t), (P=1, \dots, M) \quad \text{и} \quad \delta^P(t) = (\delta_1^P(t), \dots, \delta_5^P(t)).$$

Компоненты $\delta_s^P(t)$ ($s=1, \dots, 5$) реализуются при помощи генераторов случайных чисел с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями, определенными по формулам (9) - (11). Функции $\delta_i^P(t)$ отражают методические и инструментальные погрешности измерений внешней среды и сырьевых ресурсов.

Таким образом, информационная модель каждого квадрата района промысла может быть представлена в виде

$$\zeta_i^P(K\Delta t + \tau) = \begin{cases} \Gamma_i^P(K\Delta t + \tau) + \delta_i^P(K\Delta t + \tau), & \text{при } N^P \neq 0 \\ \Phi & \text{при } N^P = 0, \quad 0 \leq \tau \leq \tau_1 \end{cases}; \quad (I2)$$

$$\zeta_i^P(K\Delta t) = \begin{cases} W_i^P(K\Delta t) + \delta_i^P(K\Delta t) & \text{при } N^P \neq 0 \\ \Phi & \text{при } N^P = 0, \quad i=3,4,5, \quad W_3^P = \Gamma_3^P \end{cases}; \quad (I3)$$

$$\zeta_2^P(K\Delta t + \tau) = \Gamma_2^P(K\Delta t + \tau) + \delta_2^P(K\Delta t + \tau), \quad 0 \leq \tau \leq \tau_2 \quad (I4)$$

где Φ - признак отсутствия информации.

В формулах (I3) (при $i=3$) и (I2) под N^P понимается количество судов промысловой разведки в P -м квадрате.

Модель добывающего и поискового флота. Для простоты построения модели здесь описывается работа однотипных судов занятых либо только поиском, либо поиском и добычей.

Одна из задач построения данной имитационной модели - моделирование процесса передислокации в районе промысла. Это в свою очередь требует моделирования района промысла и динамики перемещения флота.

Между каждыми двумя квадратами $i, P \in \{1, \dots, M\}$ по карте общего района промысла определим кратчайший маршрут между центрами этих квадратов, допустимый береговой линией и рельефом дна. Длину этого пути будем обозначать через r_{iP} (рис.2).

Построим графическую модель общего района промысла, интерпретируя каждый P -й квадрат вершиной неориентированного графа.

Каждой паре вершин графа (всего их будет $\frac{M \cdot M - 1}{2}$) поставим во взаимнооднозначное соответствие кратчайший путь, определяемый следующим образом. Пусть кратчайший маршрут на кар-

те района промысла, соединяющий центры квадратов l_1 и l_k проходит через квадраты l_2, l_3, \dots, l_{k-1} . Тогда кратчайшим путем данной пары вершин (l_1, l_k) будет путь, состоящий из ребер, соединяющих последовательно вершины l_1, l_2, \dots, l_k .

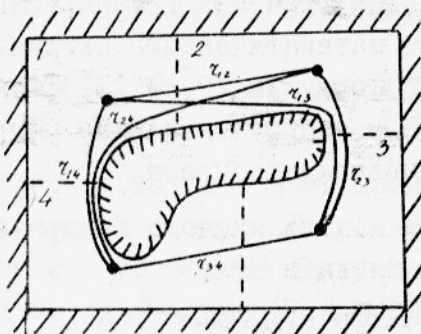


Рис.2. Схема кратчайших расстояний на карте района промысла

Множество вершин кратчайшего пути, соединяющего вершины l_1 и l_k , обозначим через $\{l_1, l_k\}$.

Граф, состоящий из вершин $1, 2, \dots, M$ и ребер всевозможных кратчайших путей назовем графом района промысла.

Каждому кратчайшему пути $\{l_1, l_k\}$ поставим в соответствие число

$$r\{l_1, l_k\} = r_{l_1 l_2} + r_{l_2 l_3} + \dots + r_{l_{k-1} l_k}. \quad (15)$$

Рассмотрим на примере введенные выше обозначения (см.рис.2, 3).

Кратчайшими путями здесь будут

$$\{1, 2\}, \{2, 3\}, \{3, 4\}, \{4, 1\}, \{1, 3\} = (1, 2, 3),$$

$$\{4, 2\} = (4, 1, 2);$$

$$r\{1, 3\} = r_{12} + r_{23}, \quad r\{4, 2\} = r_{41} + r_{12}$$

Кратчайшие пути здесь введены для того, чтобы определять районы, через которые будут проходить суда во время дислокаций.

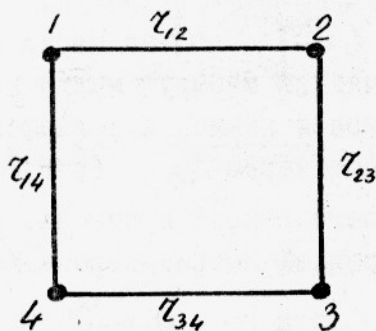


Рис.3. Графа района промысла (пример)

Предположим, что суда перемещаются со средней скоростью V .

Чтобы знать в любой момент времени, в каком квадрате находятся те или иные группы судов, введем следующие допущения, облегчающие построение модели: суда могут двигаться только по маршрутам, соответствующим кратчайшим путям графа, т.е. движе-

ние судов представляется движением точки по ребрам графа района промысла; судно считается принадлежащим тому квадрату, ближе к вершине которого находится соответствующая ему точка на ребре графа.

Так как длина пути по ребрам графа из одной вершины в другую, как правило, больше длины кратчайшего пути между центрами соответствующих районов, время нахождения судна в пути при расчете окажется завышенным.

Чтобы исключить это несоответствие, введем для каждого маршрута из квадрата i в квадрат j расчетную скорость V_{ij} , определяемую по формуле

$$V_{ij}^{-1} r\{i, j\} = V^{-1} \cdot r_{ij} = \tau_{ij}. \quad (16)$$

Предположим, что суда изменяют направление движения только в моменты управления (капитанские часы). Между этими моментами t_i^k ($k=0, 1, \dots$) проходят периоды времени Δt_i .

Пусть в начальный момент времени $t_{нач}$ каждый P -й квадрат характеризуется числом N_P ($t_{нач}$), определяющим количество судов в P -м квадрате.

В момент $t_i^0 \geq t_{нач}$ подается первая команда по дислокации судов, определяющая $\frac{M \cdot M - 1}{2}$ чисел ΔK_{ij} , характеризующих количество судов, направленных из квадрата i в квадрат j .

С момента t_i^0 до второго момента управления t_i^1 количество судов в каждом квадрате определяется по формулам

$$\begin{aligned} N_P(t) = & K_P(t_i^0) + \sum_{j \neq P} \Delta K_{jP}(t_i^0) \text{sign}(t - (\tau_{jP} + t_i^0)) - \\ & - \sum_{j \neq P} \Delta K_{Pj}(t_i^0) \text{sign}(t - (t_i^0 + \frac{r_{Pi}}{2V})) + \sum_{(i,j) \in \mathcal{P}e(i,j)} \Delta K_{ij}(t_i^0) \left(\text{sign}(t - (t_i^0 + \frac{r\{i,P\} - \delta_P}{V_{ij}})) - \right. \\ & \left. - \text{sign}(t - (t_i^0 + \frac{r\{i,P\} + \delta_P^2}{V_{ij}})) \right); \end{aligned} \quad (17)$$

$$K_P(t_i^0) = N_P(t_{нач});$$

$$(t_i^0 < t \leq t_i^1, \quad P=1, 2, \dots, M). \quad (18)$$

В формуле (17) первое слагаемое определяет количество судов, находящихся в P -м квадрате в момент t_i^0 ; второе

слагаемое - количество судов, дополнительно прибывших в P -й квадрат к моменту t ; третье слагаемое - количество судов, снятых с P -го квадрата для передислокации в другие квадраты; четвертое слагаемое - количество судов, находящихся на переходе и попавших в момент времени t в P -й квадрат.

Величины δ_p^1 и δ_p^2 определяются по формулам

$$\delta_p^1 = \frac{\Gamma_{i'P}}{2}, \quad (i', P) \in \{i, j\}; \quad (19)$$

$$\delta_p^2 = \frac{\Gamma_{Pi''}}{2}, \quad (P, i'') \in \{i, j\}. \quad (20)$$

В общем случае при $t_i^k < t \leq t_i^{k+1}$, $k \geq 1$ формулы (17 и (18) будут иметь вид

$$N_p(t) = K_p(t_i^k) + \sum_{j \neq P} \Delta K_{iP}(t_i^k) \text{sign}(t - (t_{jP} + t_i^k)) - \\ - \sum_{j \neq P} \Delta K_{Pj}(t_i^k) \text{sign}(t - (t_i^k + \frac{\Gamma_{Pi''}}{2V})) + \sum_{(i, j) \in \{P, i, j\}} \Delta K_{ij}(t_i^k) (\text{sign}(t - (t_i^k + \frac{\Gamma_{(i, j)P}}{V_{ij}})) - \\ - \text{sign}(t - (t_i^k + \frac{\Gamma_{(i, j)P} + \delta_p^2}{V_{ij}}))) + \Delta N_p(t);$$

$$K_p(t_i^k) = N_p(t_i^k); \quad (21)$$

$$(t_i^k < t \leq t_i^{k+1}, \quad k \geq 1, \quad P = 1, 2, \dots, M). \quad (22)$$

В формуле (21) пятое слагаемое отражает количество вновь появившихся судов в момент времени t в P -м квадрате.

В некоторых случаях (например, при выходе из строя орудий лова, запаздывании снабжения судов какими-либо ресурсами и т.п.) величина $\Delta N_p(t)$ может принимать и отрицательные значения.

Теперь опишем динамику производственного процесса добывающих судов в P -м квадрате (схема модели дана на рис.4).

Входами модели являются величины, определяющие метеоусловия и сырьевые ресурсы (Γ_2^P, W_4^P, W_5^P), количество добывающих судов (N_0^P) и пропускную способность перерабатывающих производств в P -м квадрате (V^P).

Выход модели будем измерять величиной η^P , определяющей количество сырья, сдаваемого на переработку.

Входная величина W_4^P поступает на функциональный блок W_1^P , который определяет фактическую интенсивность добычи X_1^P :

$$x_1^P(t) = W_1(W_4^P(t), x_2^P(t)), \quad (23)$$

где x_2^P - допустимая интенсивность добычи.

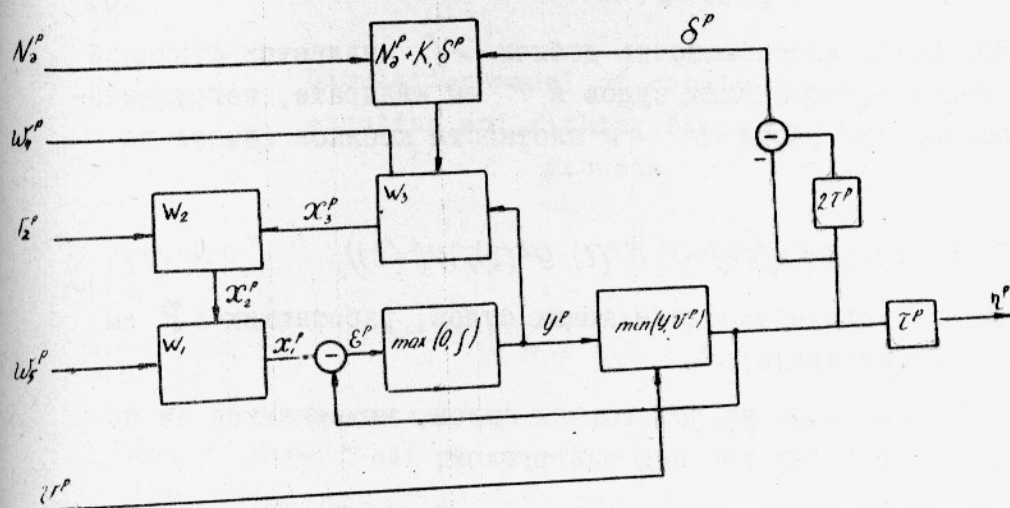


Рис. 4. Схема модели производственного процесса добывающих судов

Далее, выловленный с/рец накапливается на добывающих судах, определяя загруженность им флота y^P ;

$$y^P(t) = \max\left(0, \int_{t_{нач.}}^t \epsilon^P(\tau) d\tau\right), \quad (24)$$

где $\epsilon^P(t) = x_1^P(t) - \delta^P(t)$ - приращение количества сырья в момент t на добывающих судах;

$\eta^P(t)$ - темп сдачи сырья в момент t на переработку.

Величина η^P не может превышать величин объема сырья на добывающих судах и пропускной способности перерабатывающих производств.

Поэтому полагаем

$$\eta^P(t) = \min(y^P(t), v^P(t)). \quad (25)$$

Запаздывание τ^P отражает время, затрачиваемое добывающим флотом на переход из P -го квадрата к перерабатывающему производству.

Допустимая интенсивность добычи x_2^P определяется как функция от метеоусловий Γ_2^P и возможной интенсивности до-

бычи x_3^P (x_3^P рассчитывается при условии полного штиля):

$$x_2^P(t) = W_2(\Gamma_2^P(t), x_3^P(t)). \quad (26)$$

Возможная интенсивность добычи x_3^P является функцией от количества добывающих судов в P -м квадрате, загруженности добывающего флота Y^P и плотности косяков (вылов на усилии W_5^P):

$$x_3^P(t) = W_3(N_0^P(t) + K_1 \delta^P(t), Y^P(t), W_5^P(t)), \quad (27)$$

где N_0^P - количество добывающих судов, работающих в P -м квадрате;

K_1, δ^P - количество добывающих судов, находящихся на переходах или под разгрузкой;

K_1 - условная вместимость одного добывающего судна;

$$\delta^P(t) = \eta^P(t - 2\tau_p) - \eta^P(t). \quad (28)$$

В рассмотренной модели нас интересует организация выбора управляющих параметров

$$\{\Delta K_{ij}^{доб.}(t_i^k)\}_{k=0, \dots}, \quad \{\Delta K_{ij}^{разв.}(t_i^k)\}_{k=0, \dots}$$

на основании некоторого критерия эффективности с учетом начальных условий $N_p(t_{нач.})$, $P = 1, \dots, M$, информации о внешней среде и сырьевых ресурсах $\bar{\xi}^P(t)$ и пропускной способности перерабатывающих производств $V^P(t)$.

Таким образом, цель построения модели конкретизируется: модель должна давать сравнительную оценку эффективности различных систем оперативного управления передислокацией добывающих судов (выбор $\{\Delta K_{ij}^{доб.}(t_i^k)\}_{k=0, \dots}$ и судов промысловой разведки $\{\Delta K_{ij}^{разв.}(t_i^k)\}_{k=0, \dots}$).

Один из путей развития работы - организация деловой игры (тренажера) для обучения будущих руководителей штабов экспедиций. Деловая игра даст возможность демонстрировать основные функции руководителей штабов экспедиций и научит будущих руководителей принимать верные и своевременные решения.

Simulation model of combined operation of
scouting and fishing fleet on fishing
grounds

V.V.Starov, I.B.Kolmakov

S u m m a r y

The simulation model of combined operation of scouting and fishing fleet is used to make comparable estimates of the efficiency of various schemes of operational management of the fleet on the fishing grounds.

The description of the simulation model consists of two parts: the first concerns the environment (resources, fishing situation) and the second includes the activity of the fishing and scouting fleet on fishing grounds.

The machine experiment using the model allows for estimation of the results obtained when various methods of management are applied and for testing various managerial methods under the same conditions.