

УДК 551.46.01:51 (265.53)

С. В. Бердников, Ю. А. Домбровский, А. Г. Островская,
М. В. Приходько, Л. И. Титова, Ю. В. Тютюнов

Имитационная модель основных компонентов экосистемы Охотского моря

Разработана имитационная система, моделирующая динамику основных групп планктона Охотского моря с учетом важнейших абиотических факторов среды и комплекса внешних воздействий. Проведено модельное исследование сезонной изменчивости и пространственного распределения этих групп. Имитационный комплекс состоит из блоков, представляющих собой законченные программные алгоритмы отдельных процессов: крупномасштабной циркуляции вод Охотского моря; формирования солености вод; температурного режима; пространственно-временной динамики фитопланктона; динамики макропланктона; динамики мезопланктона.

Биологические ресурсы Охотского моря, включающие такие ценные промысловые объекты, как минтай, лосось, сельдь, камбала, навага, бычки, палтус, краб камчатский, стригун, креветки, моллюски, трепанг, тюлень, белуха, ламинария и другие, огромны. Это подтверждается исследованиями североохотского шельфа, проводимыми Тихоокеанским институтом рыбного хозяйства и океанографии (ТИНРО) и его филиалами. Вместе с тем, в конце 50-х — 60-х годах произошел перелом таких объектов, как камбала, камчатский краб, сельдь. В результате усилий, направленных на урегулирование промысла, запасы тихоокеанской сельди восстановлены, и в настоящее время разрешен ее промышленный вылов в северной части моря. Таким образом, несмотря на высокую продуктивность моря, интенсивная эксплуатация его биоресурсов в интересах народного хозяйства требует научно обоснованных стратегий.

Важной задачей является оценка продуктивности отдельных районов и всего моря в целом. Именно в этом направлении сосредоточены значительные усилия сотрудников ТИНРО. В этой связи возникает ряд проблем, которые могут быть эффективно разрешены лишь при условии широкого использования современных методов системного анализа, имитационного моделирования в частности. Позитивный опыт решения задач такого плана хорошо известен [1]. Задача, к решению которой были привлечены сотрудники НИИ механики и прикладной математики Ростовского госуниверситета, заключалась в разработке имитационной системы, моделирующей динамику основных групп планктона Охотского моря с учетом важнейших абиотических факторов среды и комплекса внешних воздействий, и модельном исследовании их сезонной изменчивости и пространственного распределения.

В основу разработки модели нижних трофических уровней экосистемы Охотского моря легло понимание имитационной системы как элемента человеко-машинной системы, имеющей структуру значительной сложности, позволяющей проводить широкий набор экспериментов. Элементы такой структуры — блоки — по сути дела, представляют собой законченные программные алгоритмы отдельных процессов.

При создании моделей биологических подсистем мы исходили из фундаментального понятия о взаимодействии объекта со средой обитания [2] и определяющем для популяционной кинетики значении изменений внешних абиотических факторов. Работа всего имитационного

комплекса, структура которого соответствует общим принципам построения модели пространственно-временной динамики гидробионтов [3], представляет собой последовательный расчет крупномасштабной циркуляции водных масс Охотского моря (модель КЦВМОМ), режима солености (модель СВОМ), температуры водных масс (модель ТВОМ), а затем (на их основе) — расчет биологических подсистем: фитопланктона (ФОМ), мезопланктона (МЗПОМ) и макропланктона (МКПОМ). Блочная структура имитационной системы представлена на рис. 1.

Модель циркуляции. Непериодическая циркуляция водных масс Охотского моря представляет собой сложную систему круговоротов разного масштаба и знака внутри циклонического макрокольца, состоящего из цепи вдольбереговых течений: Западно-Камчатского, Северной ветви, Пенжинского, Ямского, Северо-Охотского, Амурского, Восточно-Сахалинского, сбрасывающего вместе с течением Соя воды в океан, и Северо-

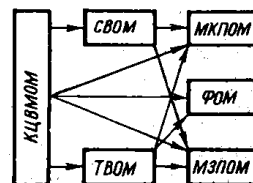


Рис. 1. Блочная структура имитационной системы Охотского моря

ро-Восточного течения, замыкающего макросистему на юге моря [4]. Для имитации крупномасштабной циркуляции вод выбран массбалансовый подход [5]. Разработана компартментальная модель, в которую заложены следующие гипотезы:

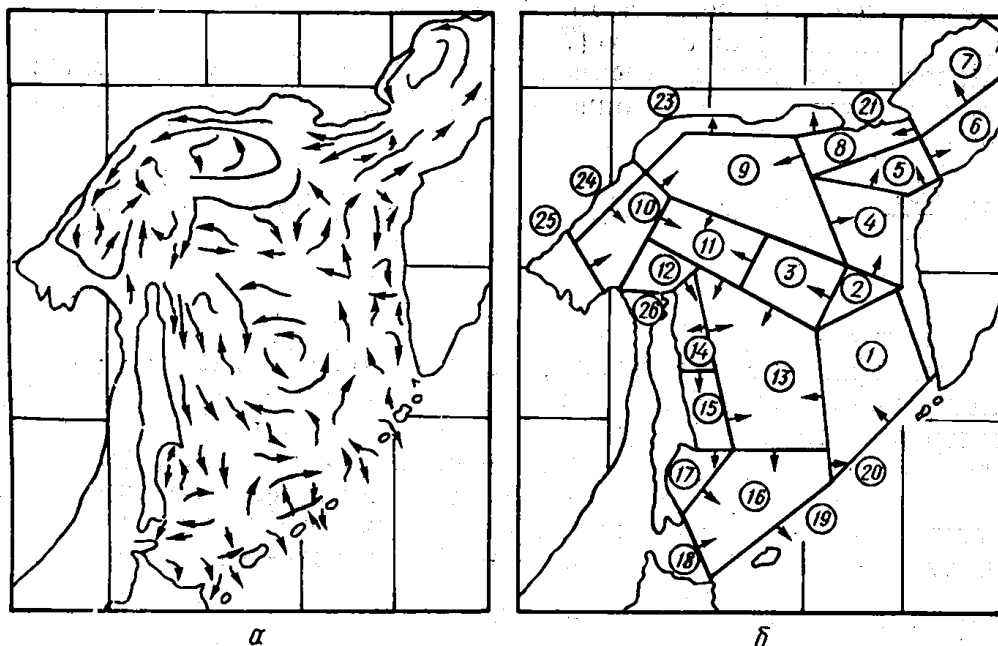


Рис. 2. Схема разбиения зеркала Охотского моря на сегменты и структура циркуляции, принятые в модели

1. Охотское море подразделяется на 26 сегментов (рис. 2), в пределах которых все характеристики считаются однородными, средними по сегменту.

2. По вертикали море делится на два слоя: от поверхности до горизонта 30 м и далее до 200 м (или до дна на шельфе).

3. Объемы сегментов считаются неизменяющимися во времени.

4. Внешними границами являются: граница «вода — атмосфера», береговая линия, горизонт 200 м, дно, Курильские проливы, пролив Лаперуза.

5. В модели считается известной и неизменной в течение года структура циркуляции (направления перемещений водных масс от сегмента к сегменту), которая включает все устойчивые циркуляционные

системы с пространственным масштабом более 200 км. Она одинакова для обоих слоев.

6. Все периодические или кратковременные перемещения водных масс с пространственным масштабом менее 200 км рассматриваются как случайные и имитируются аналогично механизму турбулентной диффузии.

7. Для Охотского моря приняты во внимание следующие составляющие водного баланса: речной сток, осадки, испарение, водообмены через Курильские проливы и пролив Лаперуза, поступление водных масс в период таяния льда, обмен с глубинными слоями. Для объема каждого сегмента справедливо линейное обыкновенное дифференциальное уравнение водного баланса, в правую часть которого входят соответствующие слагаемые.

Задача имитации циркуляции вод Охотского моря связана с правильным выбором ее пространственной структуры и решается с помощью моделей режима солености и температуры (рис. 1). Блоки СВМ и ТВМ имеют и самостоятельное значение при прогнозировании термохалинного режима моря. В результате большой серии имитационных экспериментов осуществлена идентификация модели циркуляции и калибровка ее параметров на основе итерационной процедуры сравнения расчетных и натуральных данных (по систематизированным материалам фоновых съемок МОТИНРО). Кроме этого привлечены расчетные данные, полученные с помощью в какой-то степени альтернативного гидродинамического подхода [6].

Получены величины направленного и «диффузионного» обмена между выделенными сегментами, характерные для трех типов лет: нормального, теплого и холодного [7].

Пространственная и сезонная динамика солености. Динамика солености в каждом районе описывается следующим балансовым соотношением:

$$V_i \frac{dC_i}{dt} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N [\alpha_{ij} R_j C_j + E_{ij} (C_j - C_i)] - R_i C_i + F_i; \quad i = \overline{1, N}. \quad (1)$$

Здесь C_i — концентрация солей в i -м сегменте объема V_i ; E_{ij} — объемный коэффициент «диффузии», равный $D_{ij} A_{ij} / \bar{L}_i$, где \bar{L}_i — средняя протяженность смежной границы i -го сегмента; A_{ij} — площадь соприкосновения сегментов i и j ; D_{ij} — коэффициент турбулентной диффузии; F_i — функция источника, описывающая внешнее поступление солей в i -й сегмент (приток из океана, таяние льда, подъем солей с глубины); R_i — суммарный поток воды из i -го сегмента; α_{ij} — его доля, направленная в j -й сегмент, β_i — доля потока R_i , направленная во внешнюю среду; $\sum_{j=1}^N \alpha_{ji} + \beta_i = 1$; $\alpha_{ii} = 0$ — для несмежных сегментов.

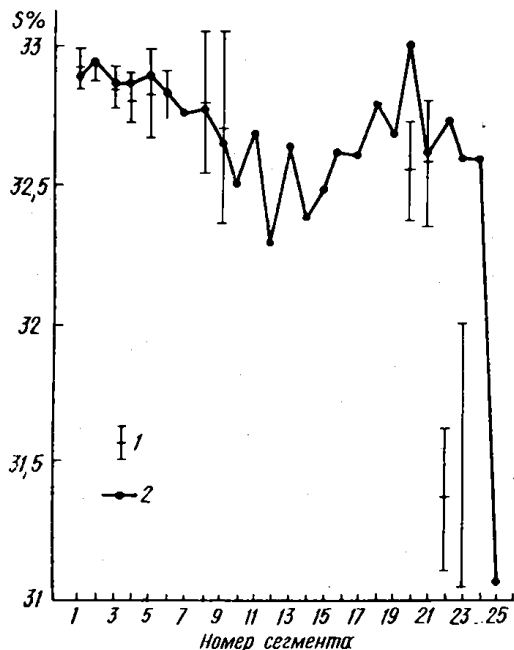
В модели (1) не учитываются степень минерализации речных вод и осадков, а также потери солей при испарении. Величины α_{ij} описывают структуру водообмена, а E_{ij} — аналоги диффузионных членов в гидродинамике — являются калибровочными параметрами модели.

В целом сезонный ход солености, рассчитанный по моделям КЦВММ и СВМ, соответствует фактической динамике этой характеристики среды в летнее время. Это дает основание полагать, что характер изменчивости в остальные периоды года также соответствует действительности (рис. 3).

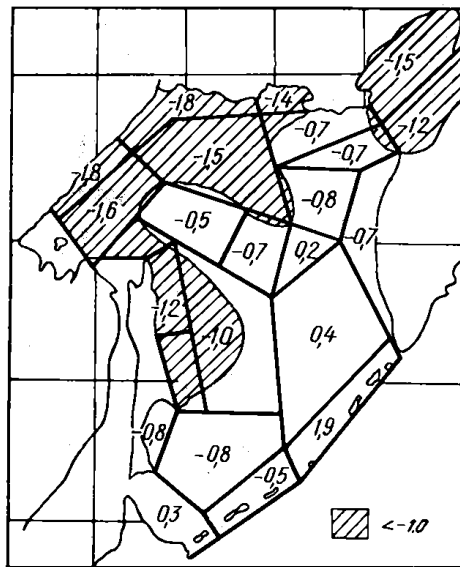
Модель температуры Охотского моря. Температура вод Охотского моря, так же как и соленость, принята в качестве трассирующей характеристики для калибровки параметров циркуляции. Ее изменение в каждом сегменте будем описывать уравнением теплового баланса

$$\rho C V_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_j W_{ij}^A + \sum_j W_{ij}^D - W_i + \Omega_i^1 + \Omega_i^2, \quad (2)$$

где T_i — температура воды в i -м сегменте ($^{\circ}K$); $W^{A_{ij}}$ — поступление тепла с потоком воды из j -го сегмента в i -ый; W — обмен теплом между i -м и j -м сегментами в результате «турбулентного» движения водных масс, W_i — суммарный вынос тепла из j -го сегмента, Ω^1_i — поступление тепла с водными потоками через внешнюю границу, Ω^2_i — обмен теплом через внешние границы, не связанный с водными потоками, ρ — плотность морской воды ($г/см^3$), C — теплоемкость (кал/г·град).



Р и с. 3. Пространственное распределение солёности (сопоставление расчетных данных с фактическими в июне 1970 г.): 1 — фактическая солёность (среднее \pm дисперсия); 2 — расчетная солёность



Р и с. 4. Распределение расчетной температуры нижнего слоя в августе и положение ядер холода

В настоящее время в климатических моделях используется большое число различных полуэмпирических схем, в которых взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью описывается с помощью относительно простых соотношений. В данной работе предпочтение отдано полуэмпирическим зависимостям, принятым в работе [8].

Нами рассчитаны значения температуры воды для каждого сегмента в слоях 0—30 и 30—200 м. На рис. 4 представлено распределение расчетной температуры в нижнем слое в августе и отмечено положение ядер холода (устойчивых зон экстремально низких температур, ограниченных изотермой $-1,0^{\circ}C$). В целом оно в северной части Охотского моря соответствует данным В. И. Чернявского (1984), выделившего толщину (мощность) ядер холода в Охотском море в качестве индикатора, связанного с термикой моря, и основы классификации лет по теплосодержанию вод. Полученные результаты — еще одно свидетельство адекватности принятой схемы моделирования течений.

Биологические подсистемы модели. Применяемый в настоящей работе подход к моделированию динамики планктонных сообществ в целом соответствует традиционным методам модельного описания этих звеньев водных экосистем. Однако анализ имеющейся информации о фитоценозе, полученной при проведении натурных гидробиологических съемок, показал, что невозможно адекватно применить даже простейшую модель, основанную на круговороте лимитирующего рост фитопланктона биогенного элемента. Поэтому использовалась более простая математическая модель, а основное внимание уделено воздействиям внешних факторов (температуры, переноса водными массами и

др.) на популяционную кинетику, что, однако, не препятствует дальнейшему структурно-параметрическому расширению базовых моделей биологической подсистемы (учет других (биогенных) факторов регулирования, описание процессов спорообразования для фитопланктона, пассивных стадий, возрастных классов, питания и т. д. — для рачков).

Несколько подробнее рассмотрим подход к моделированию макрозоопланктона Охотского моря, включающего организмы довольно крупных размеров, измеряемых сантиметрами (эвфаузииды, гиперииды, шетинкочелюстные и пр.), на примере эвфаузиид, играющих важнейшую роль в биотическом круговороте акваценоза Охотского моря и имеющих максимальную суммарную биомассу среди основных таксономических групп беспозвоночных (до 82 % общей биомассы [9, 10]). Неретически-холодноводные *Th. gaschii* и умеренно-холодноводные *Th. longipes* и *E. pacifica* (по данным съемок комплексных экспедиций МоТИНРО за 1974—1980 гг. [10]) имеют среди 95 видов макропланктона частоты встречаемости 84, 49 и 13 % соответственно и являются основой рационов таких промысловых рыб, как сельдь, минтай, лососевые [11].

Значительный интерес представляют механизмы, формирующие пространственно-временную динамику эвфаузиид. Зоны высоких биомасс рассматриваемых видов расположены соответственно в шельфовой, центральной глубоководной части моря и южных районах, существует их характерная межгодовая изменчивость [9, 12] благодаря различиям термохалинного режима разных по теплосодержанию лет.

При моделировании принято разбиение популяции на две возрастные группы — половозрелые и неполовозрелые особи. На готовность к нересту и смертность рачков в каждом районе моря существенное влияние оказывает сезонный ход температуры, а жизнеспособность личинок зависит от напряженности внутривидовой конкуренции половозрелых рачков. В пространственном аспекте популяция предполагается состоящей из 52 субпопуляций, каждая из которых находится в своем пространственном местообитании (сегменте), согласно принятому при создании имитационной системы двухслойному разбиению моря на 26 районов. Связь между субпопуляциями обеспечивается моделированием пассивного переноса рачков в соответствии с матрицей циркуляции, являющейся результатом работы гидрологического блока. Динамика каждой точечной субпопуляции описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений, параметры которых подбирались в соответствии с биологическими характеристиками моделируемых видов и их экологическими требованиями к физико-химическим факторам среды обитания [9, 10, 12—16].

При расчете использован аналог метода расщепления. Показано, что решающая роль в формировании характерной для рассматриваемых видов эвфаузиид пространственной неоднородности принадлежит температурному фактору. Вид с оптимальной температурой 6 °С (*Th. gaschii*) закрепляется и более эффективно воспроизводится в северных и шельфовых районах, рачки же с оптимальной температурой 10 °С (*Th. longipes*) «предпочитают» центральные и южные (наиболее глубоководные) районы моря. В сезонном аспекте пространственное распределение эвфаузиид претерпевает значительные изменения. При этом пятнистость в наибольшей степени выражена в теплые месяцы года, зимой же, когда термические условия по морю выравниваются, распределение рачков становится более равномерным.

Полученные в результате расчетов сезонный ход и пространственная динамика фазовых переменных удовлетворительно согласуются с представлениями о поведении биологических компонент нижних трофических уровней экосистемы Охотского моря в разные по теплосодержанию типы лет и с данными гидробиологических съемок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рациональное использование водных ресурсов бассейна Азовского моря. Математические модели.— М. : Наука, 1981.—360 с.
2. Одум Ю. Основы экологии.— М. : Мир, 1975.—740 с.
3. Домбровский Ю. А., Тютюнов Ю. В., Обущенко Н. И. Обзор методов моделирования динамики рыбных популяций и сообществ. Приложение к ихтиофауне Азовского моря // Депон. рукопись № 2841-В86, Ростовский гос. ун-т.— Ростов-на-Дону, 1986.—83 с.
4. Чернявский В. И. Циркуляционные системы Охотского моря // Изв. ТИНРО.— 1981.—105.— С. 13—19.
5. Бирман В., Ричардсон В., Дэвис Т. Стратегия математического моделирования в приложении к заливу Сагиноу озера Гурон // Использование математических моделей для оптимизации управления качеством воды: Тр. сов.-амер. симпозиума. Т. 2. Ч. 2.— Л. : Гидрометеоздат.— 1979.— С. 81—122.
6. Лучин В. А. Диагностический расчет циркуляции вод Охотского моря в летнее время // Тр. ДВНИИ.— 1982.— Вып. 96.— С. 69—77.
7. Чернявский В. И. Термические характеристики северо-восточной части Охотского сапоесса gaschii и Thysanoessa longipes в северной части Охотского моря // Изв. ТИНРО.— 1984.—109.— С. 94—103.
8. Баталин А. М., Васюкова Н. Т. Опыт расчета теплового баланса Охотского моря // Тр. Океанографической комиссии АН СССР.— 1960.—7.— С. 37—51.
9. Афанасьев Н. Н. Характеристика репродуктивного периода жизненного цикла Thysanoessa gaschii и Thysanoessa longipes в северной части Охотского моря // Изв. ТИНРО.— 1982.—106.— С. 107—114.
10. Афанасьев Н. Н. Макропланктон северной части Охотского моря: Автореф. дис. ... канд. биол. наук.— М. : Ин-т океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР.— 1985.—24 с.
11. Шунтов В. П. Биологические ресурсы Охотского моря.— М. : Агропромиздат, 1985.—224 с.
12. Пискунова Л. В. Межгодовая изменчивость численности гиперид и эвфаузиид в прикамчатских водах Охотского моря // Изв. ТИНРО.— 1982.—106.— С. 84—89.
13. Журавлев В. М. Видовой состав и характер распространения эвфаузиид в Охотском море // Океанология.— 1977.—17, вып. 1.— С. 127—131.
14. Пономарева Л. А. Эвфаузииды северной половины Тихого океана, их распространение и экология массовых видов.— М. : АН СССР, 1963.—140 с.
15. Boden B., Briton E., Jonson M. Euphausiacea of the North Pacific // Bull. Scripps Inst. Oceanogr. Calif., 1955, N 18.
16. Motoda S., Minoda T. Plankton of the Bering Sea // Plankton.— Institute of Marine Science: University of Alaska, Fairbanks, 1974.— P. 207—241.

НИИ механики и прикладной математики
Ростовского государственного университета

Материал поступил
в редакцию 11.04.88

ABSTRACT. Elaborated is a simulation system which models the dynamics of major groups of plankton in the Okhotsk Sea with the most important abiotic factors of the environment and the complex of external influence taken into account. Model study of seasonal variability and spatial distribution of these groups has been carried out. The simulation complex consists of the boxes which represent the complete program algorithms of separate processes: the large-scale circulation of waters in the Okhotsk Sea; the formation of salinity; temperature conditions; spatial-temporal dynamics of phytoplankton, the dynamics of macroplankton, mesoplankton.

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ОТДЕЛЕНИЯ НАУК О ЗЕМЛЕ
АКАДЕМИИ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР

№ 3
МАЙ — ИЮНЬ
1989

Основан в январе 1985 г.

Выходит шесть раз в год

Киев Наукова думка

СОДЕРЖАНИЕ

Термогидродинамика океана

- Долина И. С., Островский Л. А.* О неустойчивости движения синоптических вихрей в океане 3
- Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б.* Моделирование Тропической Атлантики с учетом верхнего квазиоднородного слоя 7

Анализ результатов наблюдений и методы расчета гидрофизических полей океана

- Ефимов В. В., Князьков А. С.* О циркуляции в Тропической Атлантике, вызываемой меридионально-неоднородным полем ветра 15
- Климок В. И., Макешов К. К., Перцева М. В., Рыбалка В. А.* О численном моделировании течений на северо-западном шельфе Черного моря 20
- Латун В. С.* Антициклонические вихри в Черном море летом 1984 года 27
- Байков С. В., Буров В. А.* Оценка профиля частоты плавучести по дисперсионным характеристикам внутренних волн 35
- Волков И. И., Гордеев Н. Д., Лозовацкий И. Д.* К вопросу о расчете спектров мелкомасштабных неоднородностей гидрофизических полей океана 41
- Еникеев В. Х., Михайличенко Ю. Г.* Об антициклонических вихрях закручивания Гольфстрима 47

Математическое моделирование морских систем

- Бердников С. В., Домбровский Ю. А., Островская А. Г., Приходько М. В., Титова Л. И., Тютюнов Ю. В.* Имитационная модель основных компонентов экосистемы Охотского моря 52

Краткие сообщения

- Рутенко А. Н.* Экспериментальное исследование генерации придонной турбулентности внутренними волнами 58
- Владимиров В. Л., Диалло Б., Мартынов О. В., Салль М. Х.* Индекс цвета вод Гвинейского сектора Атлантического океана 61

CONTENTS

Thermohydrodynamics of the Ocean

- Dolina I. S., Ostrovskii L. A.* On Unstable Motion of Synoptic Eddies in the Ocean 3
Mikhailova E. N., Shapiro N. B. Modelling of the Tropical Atlantic Taking Into Account Upper Homogeneous Layer 7

Analysis of Observational Results and Methods of Calculating Hydrophysical Fields of the Ocean

- Efimov V. V., Knyaz'kov A. S.* On the circulation in the Tropical Atlantic Induced by Meridionally-Inhomogeneous Wind Field 15
Klimok V. I., Makeshov K. K., Pertseva M. V., Rybalka V. A. On the Numerical Modelling of Currents on the North-West Shelf of the Black Sea 20
Latun V. S. Anticyclonic Eddies in the Black Sea During Summer of 1984 27
Baikov S. V., Burov V. A. The Estimation of the Buoyancy Frequency Profile Using Dispersion Characteristics of the Internal Waves 35
Volkov I. I., Gordeev N. D., Lozovatskii I. D. On the Problem of Calculation of Spectra of Small-Scale Inhomogeneities in Hydrophysical Fields of the Ocean 41
Enikeev V. Kh., Mikhailichenko Yu. G. On the Anticyclonic Spin-off Eddies of the Gulf Stream 47

Mathematical Modelling of Marine Systems

- Berdnikov S. V., Dombrovskii Yu. A., Ostrovskaya A. G., Prikhod'ko M. V., Titova L. I., Tyutyunov Yu. V.* A Model Simulating Basic Components of the Okhotsk Sea Ecosystem 52

Brief Notes

- Rutenko A. N.* Experimental Study of Near-Bottom Turbulence Generated by Internal Waves 58
Vladimirov V. L., Diallo B., Martynov O. V., Salle M. Kh. Colour Index of the Waters of Guinean Sector of the Atlantic Ocean 61