

РГБ

00

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

15 MAR 1993

ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ

ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ

На правах рукописи

ЛОПАТИНА Светлана Александровна

Лопат

УДК 551.46

АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА
ИМИТАЦИОННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЯХ

(на примере Аральского моря)

01.04.01 - Экспериментальная физика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 1993

Работа выполнена в Ордена Трудового Красного Знамени
Институте радиотехники и электроники РАН

Научный руководитель - доктор физико-математических наук,
профессор, академик АЕН РФ
КРАШВИН В.Ф.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
ОЛЕШНИКОВ А.Я.
- кандидат географических наук
БОРТНИК В.Н.

Ведущая организация - Институт океанологии РАН
им. П. П. Ширшова

Защита диссертации состоится " 9 " *апреля* 1993г.
в 10 час. 00 мин. на заседании Специализированного совета
Д.002.74.03 при Институте радиотехники и электроники РАН по
адресу: 103907, ГСП, Москва, пр.Маркса, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ РАН.
Автореферат разослан " 9 " марта 1993г.

Ученый секретарь
Специализированного совета
к.ф.-м.н.



В.Е.Журавлев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Исследование гидрофизических режимов природных объектов является одним из важных разделов многих международных и национальных программ по окружающей среде. Среди таких программ следует указать "Разрезы", "Глобальные изменения", GEWEX, национальные биосферные программы США, России и др. В них предусматриваются этапы по сбору и анализу данных о функционировании естественных и искусственных водных систем в условиях изменяющегося климата. Реализация планов таких работ возможна в силу уникальности этих систем только с помощью методов имитационного моделирования и проведения имитационных экспериментов. Последовательный анализ информации о состоянии гидрофизических полей, введение поправок в имитационную модель (по принципу обратной связи) и управление процессами сбора и обработки данных обеспечивают эффективное исследование закономерностей протекания гидрофизических процессов.

Одной из болевых точек планеты по оценкам многих ученых является проблема Аральского моря, расположенного в зоне особого энергетического пояса планеты. Длительные антропогенные нагрузки на Приаралье привели к существенным изменениям геохимической и гидрологической обстановки в этом регионе. В настоящее время остро стоит вопрос об оценке эффективности и направленности водохозяйственных мероприятий по стабилизации режима Аральского моря и остановке процесса опустынивания Приаралья. В рамках этих задач важным оказывается описание с помощью имитационной модели режима внутренней динамики моря и создание методики прогнозирования динамических характеристик его гидрофизической структуры.

Цель работы.

Целью настоящей работы является разработка алгоритмических и программных средств, позволяющих осуществлять эффективный мониторинг гидрофизических полей Аральского моря в условиях изменяющегося уровня.

Научная новизна

1. Разработана и реализована в виде программного комплекса новая имитационная система, отвечающая задачам мониторинга Аральского моря.
2. Предложена имитационная модель для исследования сезонного хода гидрофизических полей Аральского моря и методика адаптации ее к данным измерений.
3. Проведены имитационные эксперименты по изучению и прогнозированию изменений гидрофизических полей Аральского моря для разных вариантов его уровня, а также по исследованию эффективности проведения натуральных измерений.

Практическая ценность.

Работа выполнялась в соответствии с темой НИР N 2.6.2 "Разработка комплекса математических моделей в их взаимосвязи с геоэкоинформационной системой экологического мониторинга глобального и регионального уровня" в рамках ГНТП "Экология России", НИР ГКНТ по проекту N 265, Программ научного сотрудничества с университетом Дилларда (США) и Центром космической физики и технологии дистанционного зондирования в г.Хо-Ши-Мине (Вьетнам). Прикладной аспект работы связан с созданием методики расчета гидрофизических полей внутреннего водоема на основе данных отрывочных по пространству и эпизодических во времени измерений и апробацией этой методики на примере аквагеосистемы Аральского моря по данным многолетних на-

турных измерений, проводившихся Государственным океанографическим институтом.

Разработанная имитационная система обеспечивает повышение эффективности мониторинга Аральского моря и может быть использована как блок системы мониторинга среднеазиатского региона.

Результаты работы также могут найти практическое применение при оценке состояния других внутренних водоемов, контролируемых в режиме мониторинга.

Положения, вносимые на защиту.

1. Созданная имитационная система позволяет на основе данных отрывочных по пространству и эпизодических во времени измерений исследовать и прогнозировать сезонные вариации гидрофизических полей Аральского моря в условиях изменения его уровня.

2. Предложенная методика включения имитационной системы в режим мониторинга Аральского моря дает возможность повысить его эффективность.

3. Развитая информационная технология обработки данных мониторинга Аральского моря обеспечивает режим адаптивного имитационного эксперимента.

Апробация работы.

Апробация основных результатов работы осуществлялась на Всесоюзном семинаре "Эволюционное моделирование и обработка данных радиофизического эксперимента" (Москва, 1984г.), на международном симпозиуме "Инженерная экология" (Звенигород, 1991г.), на Научно-технической конференции "Биомедицинское и экологическое приборостроение: наука, промышленность, рынок" (Рязань, 1992г.).

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 5 печатных

работах.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 126 страницах машинописного текста, включая список литературы из 80 наименований, 26 рисунков и 13 таблиц.

Содержание работы

Во введении показана актуальность темы, формулируется научная новизна и практическая ценность полученных результатов, дается структура и краткий обзор содержания диссертации, приведены основные положения, представленные к защите.

В первой главе определяется роль имитационного эксперимента (ИЭ) в автоматизации гидрофизических исследований и осуществляется постановка задач, возникающих при этом.

Использование имитационных систем (ИС) дает возможность исследователям имитировать на ЭЕМ различные ситуации для реального объекта и на основе проведенных имитационных экспериментов осуществлять различные оценки и прогноз. Возможность оперативного проведения имитационных экспериментов предполагает следующие свойства ИС: полнота, гибкость, универсальность, простота использования. Для обеспечения вышеуказанных свойств ИС должна строиться согласно следующим принципам: иерархичность структуры, модульный принцип, машинная независимость, адекватность.

Приводятся примеры использования ИС в гидрофизических исследованиях (ПОИСТ, "Орошение", "Азовское море").

Наложным средством организации гидрофизических исследований,

характеризующихся редкой повторяемостью и высокой стоимостью, является использование мониторинговых систем, включающих методы имитационного моделирования, сбор и обработку поступающей измерительной информации. Для повышения эффективности проведения такого мониторинга представляется целесообразным объединить средства имитационного моделирования и информацию, поступающую с измерительных комплексов, в виде ИС. Поток данных об отдельных характеристиках гидрофизических полей позволяет корректировать и подстраивать имитационную модель, включенную в качестве инструмента анализа наблюдений, прогноза пространственно-временной изменчивости полей.

Выделены характерные особенности ИС мониторинга гидрофизических полей водных систем. ИС данного класса должны обеспечивать проведение следующих ИЭ:

- ИЭ по адаптации имитационной модели к данным измерений;
- ИЭ для построения диагностических карт гидрофизических полей;
- ИЭ для построения прогностических карт гидрофизических полей;
- ИЭ по оценке эффективности и планированию измерений.

Учитывая вышесказанное, для реализации поставленной в диссертационной работе цели, возникает необходимость решения следующих задач:

1. Создать имитационную модель, позволяющую адекватно описать сезонные изменения гидрофизических полей Аральского моря в условиях изменения его уровня.

2. Разработать методику адаптации имитационной модели к данным натурных измерений.

3. Для проведения имитационных экспериментов создать ИС

"Арал", позволяющую решать задачи мониторинга гидрофизических полей Аральского моря.

4. Провести имитационные эксперименты с использованием ИС "Арал" по исследованию и прогнозированию изменений гидрофизических полей Аральского моря для различных вариантов его уровня, а также по исследованию эффективности проведения натурных измерений.

Во второй главе излагается функциональное наполнение ИС "Арал".

В первой части главы дается обзор математических моделей гидротермодинамики вод Арала и приводится описание имитационной модели сезонного хода гидрофизических полей Аральского моря. Блок-схема модели представлена на рис.1. Предлагаемая модель предназначена для имитации сезонного хода основных гидрофизических полей (температура, соленость) в безледовый период.

Для учета многолетних изменений уровня водоема в модель введен блок 1 (используется информация о положении уровня на конец предыдущего сезона).

После уточнения многолетнего уровня производится коррекция сетки глубин (бл.2) и перераспределение начальных полей температуры и солености. Начальное поле температуры принимается нулевым по всему пространству. Начальное поле солености задается приближенно с учетом солезапаса водоема и оценок количества отложившихся солей на обсохших территориях при понижении уровня моря.

Для задания основных составляющих водного баланса моря, определяющих сезонные колебания его уровня (бл.1'), в модели в качестве первого приближения используются средние многолетние данные за предыдущие годы, которые необходимо корректировать в зависимости от априори известной конкретной гидрометеорологической обстановки

года.

В блоке 5 имитируются течения Аральского моря. Используется модель Фельзенбаума квазиустановившихся течений в море малой и средней глубины. Модель позволяет рассчитать горизонтальные компоненты скорости течения в любой точке по вертикали. Вертикальная составляющая скорости течения вычисляется из уравнения неразрывности.

Для имитации сезонного хода полей температуры и солености используется метод компарментов (бл.6). Считается, что перенос вещества между компартаментами осуществляется посредством течений и вследствие наличия градиента вещества между компартаментами. Для учета теплообмена моря с атмосферой используются данные КазНИИМИ Госкомгидромета. Для задания пространственного распределения баланса влаги и тепла на поверхности Аральского моря использовались материалы комплексных гидрометеорологических атласов Каспийского и Аральского морей.

Вертикальная устойчивость морских вод - одна из важных гидрофизических характеристик, определяющих условия развития конвективного перемешивания (бл.7,8,9). Для исследования вертикальных изменений плотности Аральских вод с учетом особенностей протекания конвекции этого водоема использовалась линейная модель:

$$\rho = \rho_0 \left(0.97529 - 0.00317 \frac{T}{T_0} + 0.02737 \frac{S}{S_0} \right), T_0 = 17.5^\circ \text{C}, S_0 = 35\text{‰},$$

$$\rho_0 = 1.025412 / \text{cm}^3.$$

Применение этого линейного уравнения в приближении Буссинеска для расчета плотности Аральской воды не является корректным, но линейность модели позволяет имитировать без каких либо погрешностей термическую конвекцию и, как показали эксперименты, не дает больших погрешностей в имитации конвекции, вызванной как темпера-

турой, так и соленостью.

Вопрос об устойчивости стратификации решается следующим образом (ось \vec{z} направлена вниз):

$$\frac{d\rho}{dz} > 0 \quad - \text{ устойчивая,}$$

$$\frac{d\rho}{dz} < 0 \quad - \text{ неустойчивая.}$$

В случае неустойчивости стратификации температура и соленость рассматриваемых слоев осредняются (бл.9).

Во второй части главы рассматриваются задачи, возникающие в процессе согласования данных измерений с моделями, методы их решения, а также приводится схема согласования экспедиционных измерений научно-исследовательского судна "Отто-Шмидт" с имитационной моделью сезонного хода гидрофизических полей Аральского моря.

Материалы экспедиционных измерений предоставлены ГОИН. Судовые измерения имеют высокую точность (в отличие от дистанционных методов) и выполняются не только на поверхности, но и по глубине. Это позволяет извлекать информацию и о вертикальной структуре полей.

Для организации взаимодействия данных и модели используется дискретная схема. Съемка данных производится последовательно по станциям в зависимости от рейса судна в течении 8-10 дней и только после этого данные обрабатываются и включаются в модель.

Так как замеры с судна производятся в любое время суток и подвержены суточным колебаниям измеряемых полей (особенно температура), в работе приводится схема поправок к данным измерений с учетом ее суточного хода.

На следующем этапе для каждой станции, на которой производились измерения, вычисляются параметры, характеризующие вертикаль-

ную структуру полей:

- среднее значение солености по глубине,
- глубина залегания термоклина и температура в этой точке,
- разность и среднее значение температур выше термоклина,
- разность и среднее значение температур ниже термоклина.

К этим параметрам производится адаптация модели. Погрешности отклонения для каждого из них задаются предварительно. Проверяются значения полей, восстановленные в процессе моделирования в моменты времени, соответствующие измерениям в точках, соответствующих координатам станций. Под адаптацией в данном случае понимается альтернативный перебор. Схема проведения альтернативного перебора определялась экспериментально в процессе оценки чувствительности модели (гл. 4).

В третьей главе приводится описание ИС "Арал". Созданная система позволяет проводить в автоматическом режиме следующие этапы ИЭ для решения задач мониторинга гидрофизических полей Аральского моря:

- обработка данных судовых измерений;
- адаптивная настройка имитационной модели к результатам измерений;
- проведение непосредственно имитационных экспериментов по диагностированию и прогнозированию гидрофизических полей Аральского моря, а также по планированию измерений.

Процесс управления выделенными выше этапами ИЭ осуществляется в автоматическом режиме и реализован, соответственно, в виде программных модулей UPРЗ, UPRO, UPRAV. Структура модулей UPRAV, UPRЗ определяется содержанием функционального наполнения системы. Структура модуля UPRO определялась в результате имитационных эк

периментов по оценке чувствительности имитационной модели (гл.4). Система реализована на ЕС-1055 в операционной среде ОС MVT ЕС. При реализации системы использованы языки программирования: Фортран-4, PL-1, язык заданий ОС ЕС. Для создания и поддержки информационной базы ИС применялась инструментальная диалоговая система PRIMUS. При создании ИС "Арал" соблюдались основные принципы, которым должна удовлетворять ИС:

1. Иерархичность структуры. ИС "Арал" имеет трехуровневую структуру. Первый, верхний уровень определяет монитор ИС. Реализован с использованием языка PL-1 в системе PRIMUS в виде модуля UPRD. Определяет этапы функционирования ИС.

Нижний, модульный уровень, содержит отдельные математические модели гидродинамических процессов и алгоритмы обработки данных измерений.

Средний уровень включает модули UPRAV, UPR3, UPRO, позволяющие автоматизировать часть этапов функционирования ИС.

2. Машинная независимость. Нижние два уровня структуры ИС реализованы на языке Фортран-4. Верхний уровень определяется средствами реализации диалога "Человек-ЭВМ". Перенесение его в другую операционную среду не представляет серьезных трудностей. Но при этом должна выполняться схема функционирования ИС.

3. Адекватность. Библиотека модулей достаточно полно покрывает рассматриваемый класс задач. Это подтверждается результатами имитационных экспериментов (гл.4).

Архитектура ИС "Арал". В ИС содержатся следующие компоненты:

- монитор;
- PRIMUS, генерирующая наборы данных и ведущая информационные обмены в ИС;

- библиотека модулей функционального наполнения ИС;
- рабочая область пользователя (дубль исходного набора данных (ИИД), конечный набор данных (КИД), рабочий набор данных (РИД));
- архив данных ИС, исходный набор данных (ИИД). Функционирование ИС "Арал" осуществляется по следующим основным этапам:

1. Архивация данных. Выделение части информации из архива данных в ИИД.
2. Обработка данных. Формирование РИД, т.е. информационной среды для проведения ИЭ по адаптации модели.
3. ИЭ по адаптации модели к данным измерений. Получаемые в результате этого состояния поля используются как начальное приближение для режима прогнозирования.
4. Вывод диагностических карт полей в КИД.
5. Формирование РИД для экспериментов по прогнозированию.
6. ИЭ по прогнозированию состояния гидрофизических полей.
7. Вывод прогностических карт полей в КИД.
8. Формирование РИД для экспериментов по оценке количества измерений.
9. ИЭ по оценке количества измерений.
10. Вывод рекомендаций по проведению измерений в КИД.

Далее описывается организация информации в ИС. Приводится структура архива данных и перечень программных модулей Библиотеки ИС.

В конце главы рассматриваются перспективы развития системы.

Четвертая глава посвящена результатам имитационных экспериментов, полученным на основе эксплуатации ИС "Арал".

В результате экспериментов по оценке чувствительности имитационной модели были выделены параметры модели, изменения котору

оказывают наибольшее влияние на пространственно-временное распределение полей температуры и солености Аральского моря (при неизменной структуре модели). А также исследована реакция модели на возмущения этих параметров. Полученные результаты использовались при создании алгоритма адаптивной настройки модели к данным измерений. В работе приводится схема алгоритма адаптации, в которую включены направления осуществляемой адаптации, приоритет их выполнения и параметры, проверяемые в результате проведения адаптации по данному направлению. Коррекция параметров модели осуществляется в строгом соответствии со схемой. По каждому из направлений производится 2-3 шага.

В случае, если после выполнения схемы заданная точность не достигается, выполняется возврат в начало схемы и т.д. Максимальное число возвратов 3-4 раза. В противном случае выдается сообщение пользователю о необходимости изменения режима адаптации.

Полученный алгоритм управления процессом адаптации модели к данным измерений реализован в виде программного модуля UPRO.

Далее приводятся результаты экспериментов, проводимых на данных судовых экспедиционных измерений о состоянии полей за 1981, 1989 годы (представлены ГОИН). 1981 год был выбран для отладки работы системы в условиях наличия стока речных вод (сброс речных вод Амударьи в Аральское море по основному руслу прекращен начиная с 1982 года). 1989 год был выбран как наиболее информативный из последних лет и характеризуется отсутствием стока.

Результаты проведенных имитационных экспериментов на данных трех экспедиций в 1981г. и на данных двух экспедиций в 1989 г. позволили сделать следующие выводы. ИС "Арал" дает возможность восстанавливать пространственно-временные распределения полей темпе-

ратуры и солености Аральского моря с относительной погрешностью 10%, прогнозировать динамику полей до следующей съемки (2-3 месяца) с относительной погрешностью 15%. Частично результаты экспериментов приведены на рис.2,3, табл.1.

Для достоверного диагностирования и прогнозирования пространственно-временного распределения гидрофизических полей достаточно производить съемку данных на акватории Арала 2 раза в сезон. Желательное время съемок: конец мая - начало июня; конец июля - начало августа. Выбор именно этих временных интервалов объясняется тем, что оптимальное время адаптации модели - 2 месяца.

Сравнение результатов экспериментов за 1981, 1989 гг. по оценке влияния количества измерений и их месторасположения на результаты моделирования позволяет сделать вывод, что увеличение количества измерений в прибрежном юго-западном, западном районах моря на малых глубинах не влияет на результаты моделирования. Для наибольшей достоверности и информативности измерения рекомендуется производить в районах моря, максимально удаленных от берегов и на больших глубинах. Частично результаты этих экспериментов приведены на рис.4.

В Заключение сформулированы основные результаты работы:

1. На основе изучения многолетних данных натуральных наблюдений за изменчивостью гидрофизических полей Аральского моря разработана имитационная модель гидротермодинамики вод Аральского моря, адекватно описывающая сезонный ход гидрофизических полей в безледовый период.

2. Предложенная методика обработки данных судовых измерений и схема согласования этих данных с имитационной моделью позволяет корректировать модель для более точного описания гидрофизического

режима Аральского моря.

3. Разработан алгоритм автоматической адаптации имитационной модели к данным экспериментальных измерений гидрофизических полей Аральского моря.

4. Создана имитационная система "Арал", реализующая эффективное проведение имитационных экспериментов для решения задач мониторинга гидрофизических полей Аральского моря.

5. На базе ИС "Арал" проведены имитационные эксперименты, которые позволили на основе данных экспедиционных измерений в условиях наличия речного стока (1981г.) и при его отсутствии (1989г.) достоверно диагностировать и прогнозировать пространственно-временные распределения гидрофизических полей Аральского моря в рассматриваемые периоды.

6. На основе имитационных экспериментов были сформулированы рекомендации по режиму эффективного планирования измерений гидрофизических характеристик на акватории Аральского моря.

Основные результаты работы приведены в следующих публикациях:

1. Букатова И.Л., Лопатина С.А. Адаптивное управление имитационной системой: основные принципы и реализация // Тр. Всесоюз. семинара "Эволюционное моделирование и обработка данных радиофизического эксперимента" М.: ИРЭ АН СССР, 1984. с.12-14.
2. Лопатина С.А. Имитационное моделирование в задачах мониторинга замкнутых морей // Методы информатики в радиофизических исследованиях окружающей среды. М.: Наука, 1989. с.68-71.
3. Лопатина С.А. Имитационная система автоматизированного мониторинга замкнутых морей // Методы информатики в

радиофизических исследованиях окружающей среды. М.: Наука, 1989. с.71-72.

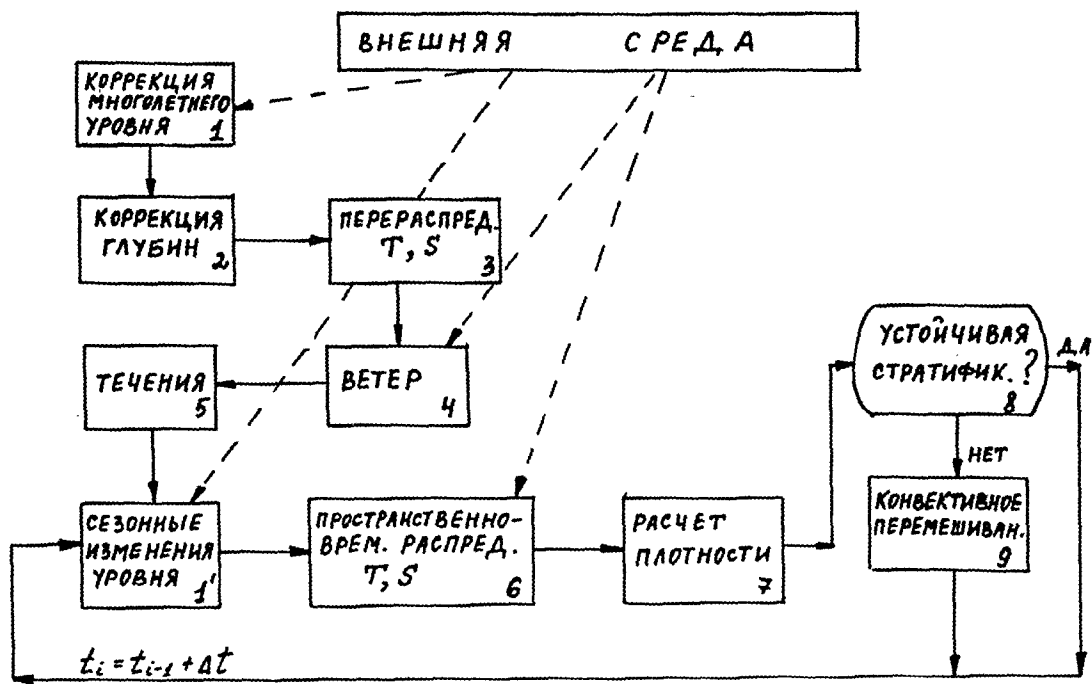
4. Лопатина С.А. Имитационная система мониторинга гидрофизических полей Аральского моря. Материалы международного симпозиума "Инженерная экология - 91", 1991. с.158-159.
5. Лопатина С.А. Информационная база имитационной системы (ИС) мониторинга гидрофизических полей Аральского моря // Тез. докл. Научно-техн. конф. "Биомедицинское и экологическое приборостроение: наука, промышленность, рынок". Рязань, 1992. с.73.

Таблица 1. Средняя температура воды на различных горизонтах (1989 г.)

Глубина м	УП		Х		
	экспед.	адаптация	экспедиц.	прогностич.	адаптация
Западная глубоководная впадина (ст.9)					
0	26,0	25	16,3	16,5	16,5
5	25,82	25	17,47	17,8	17,5
10	25,24	24	17,44	17,8	17,3
15	23,54	24	17,45	17,6	17,3
20	11,77	12,5	17,46	17,6	17,3
25	8,44	9	17,46	17,2	17,3
30	3,90	5	17,47	17,1	17,3
40	1,43	2,5	15,69	15,3	15,5
50	0,69	1,0	15,73	15,3	15,5

Центральная зона (ст.7а)

0	28	28	13,5	13	13
5	27	28	13,7	13	13,5



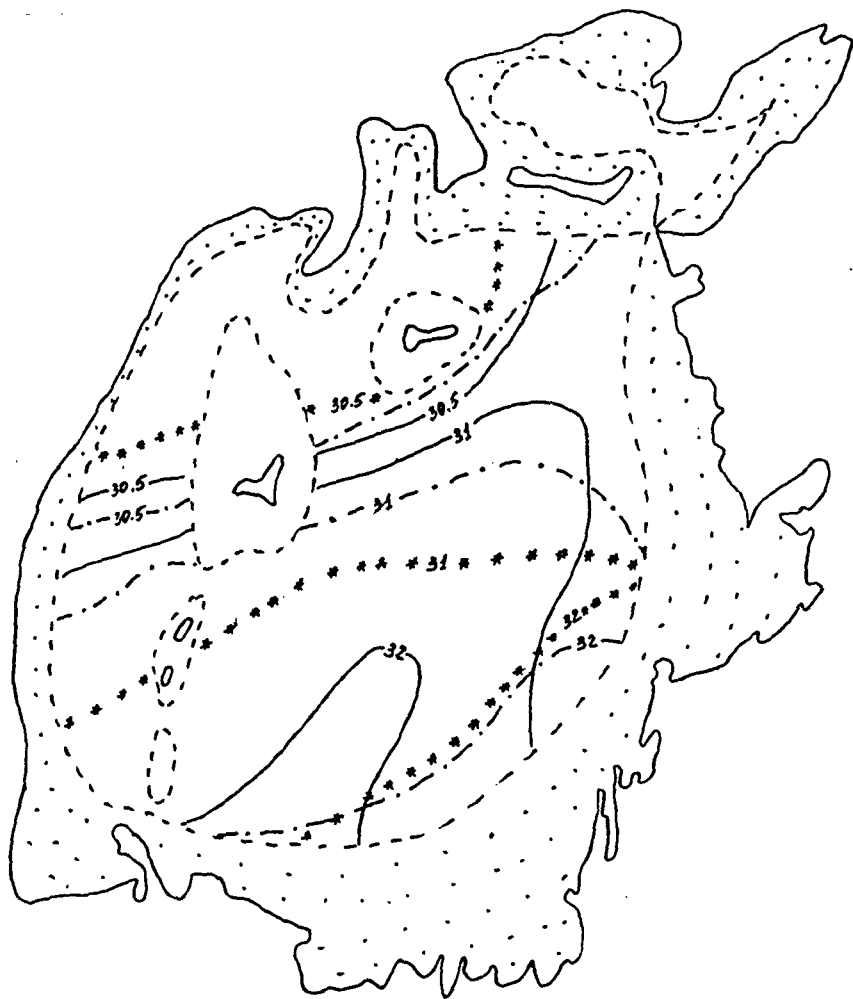


Рис. 2 Распределение солености на поверхности Аральского моря (‰) в октябре 1989г.

- экспедиционные данные,
- . - результаты адаптации модели,
- * * * результаты прогнозных экспериментов.

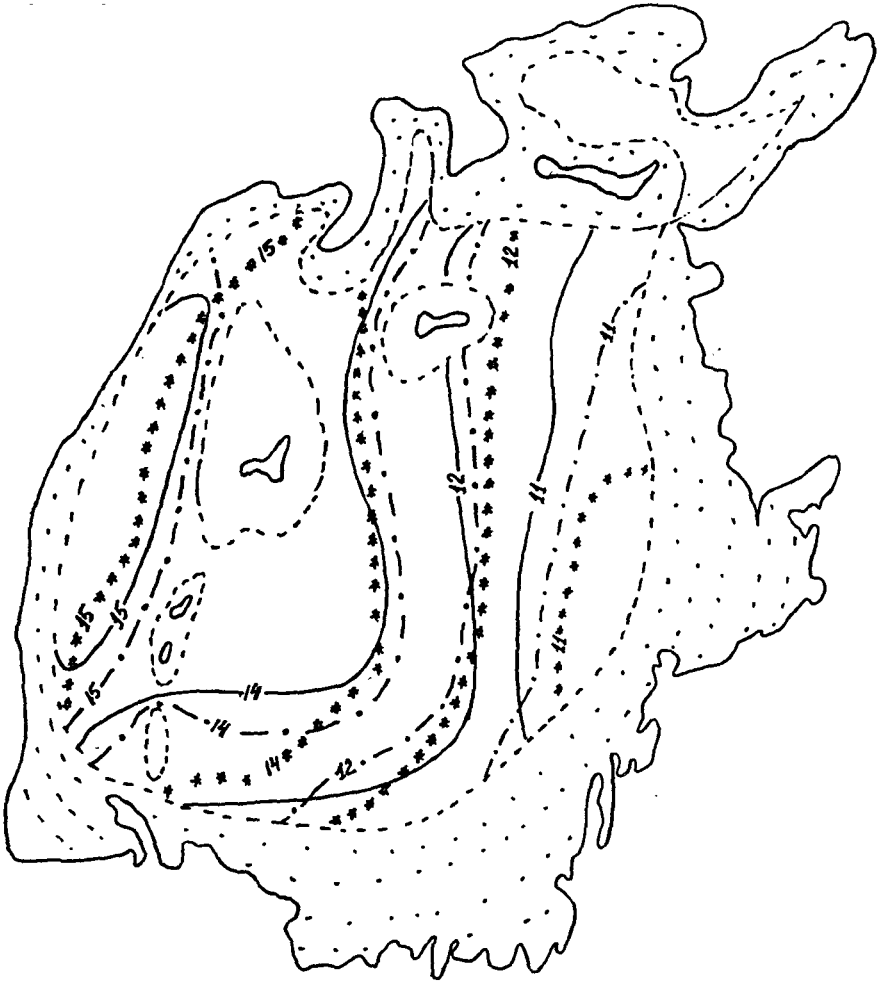


Рис. 3 Распределение температуры воды на поверхности Аральского моря ($t^{\circ}\text{C}$) в октябре 1989г.

- экспедиционные данные,
- . - результаты адаптации модели,
- * * * результаты прогнозных экспериментов.

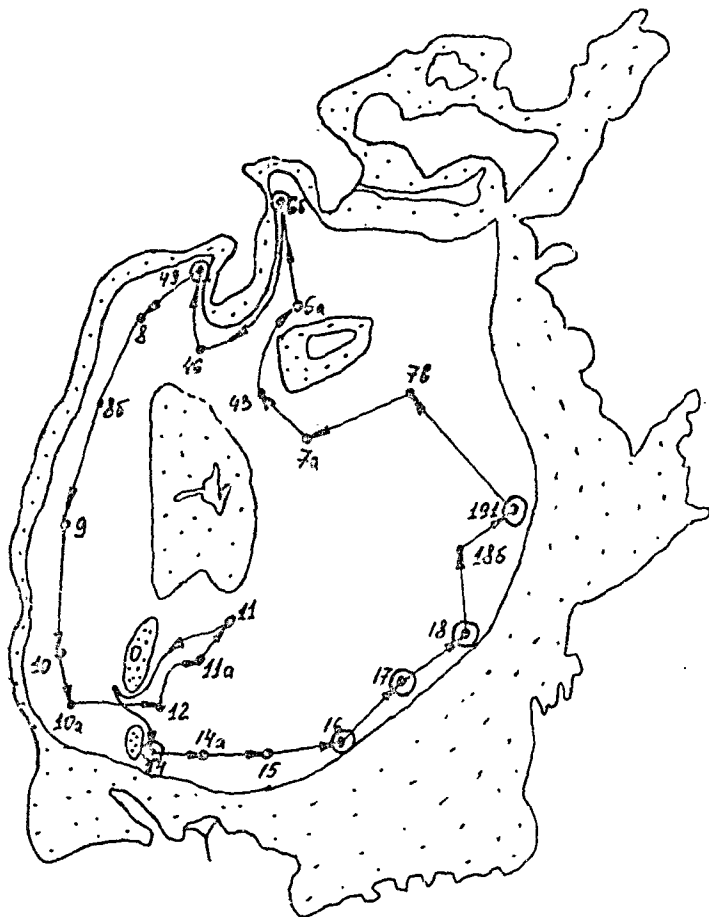


Рис. 4 Схема выполнения станций на Аральском море во время экспедиционных работ в октябре 1989г.
о - станции, измерения на которых не влияют на результаты моделирования.