

# СТРУКТУРА СИСТЕМЫ И УПРАВЛЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМ ПРОЦЕССОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЧЁРНОГО МОРЯ

Ю.Б. Ратнер, М.В. Иванчик,  
Т.М. Баянкина, М.В. Мартынов

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины, г. Севастополь  
E-mail: [Yubrat@mair.ru](mailto:Yubrat@mair.ru)

*В статье дается описание структуры системы диагноза и прогноза динамики Черного моря. Исходя из изложенного материала, формулируется вывод о необходимости разработки специального управляющего комплекса для организации вычислительного процесса моделирования. Приводится описание разработанного управляющего комплекса и инструментальных средств, созданных для его разработки. Управляющий комплекс позволил значительно повысить оперативность и надежность диагноза и прогноза состояния Черного моря. Разработанные инструментальные средства проектирования управляющих комплексов могут найти применение при создании средств управления вычислительными процессами в системах более высокого уровня иерархии.*

**Введение.** Одним из актуальных направлений контроля состояния и использования ресурсов Черного моря является комплексный мониторинг его гидрофизических полей. С этой целью в МГИ НАНУ разработана и успешно функционирует система диагноза и прогноза полей возвышения уровня, температуры, солености и скорости течений, позволяющая выполнять расчеты в квазиоперативном режиме. В работе [1] было дано общее описание разработанной системы по состоянию на конец 2004 г. В работе [2] основное внимание было уделено оценке объемов информационных потоков, циркулирующих в системе, дальнейшему развитию принципов ее построения и доработкам, выполненным в 2005 году.

Первая и вторая части предлагаемой работы посвящена более детальному описанию логических схем обработки данных в подсистемах диагноза и прогноза, ввода и предварительной обработки спутниковых альтиметрических и метеорологических данных, за-

дающих внешнее воздействие на морскую среду.

Третья часть работы посвящена описанию разрабатываемого в настоящее время управляющего комплекса системы и инструментальных средств, используемых при решении этой задачи.

**Логическая схема диагноза и прогноза гидрофизических полей Черного моря.** Модель циркуляции Черного моря основана на примитивных уравнениях динамики моря [3]. Уравнения модели записаны в декартовой системе координат с осями  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , направленными на восток, на север и вертикально вниз соответственно, в форме Громеки - Лемба:

Численная схема модели сохраняет энергию, а в случае баротропных бездивергентных течений и потенциальную энстрофию. Аккуратная аппроксимация уравнения гидростатики позволяет точно описывать обмен потенциальной и кинетической энергии в пределах каждого бокса с учетом нелинейной зависимости плотности от температуры и солености. Конечно-разностная аппроксимация уравнений по горизонтали выполнена на сетке с шагом 5 км. По вертикали используются 35 неравномерно расположенных горизонтов. Дискретизация во времени осуществляется методом чехарды с периодическим подключением схемы Мацуно.

Радиус Россби в глубоководной части Черного моря равен 25 км. Поэтому горизонтальное разрешение модели и значение коэффициентов вязкости и диффузии позволяет воспроизводить синоптическую изменчивость Черного моря.

Блок-схема подсистемы моделирования динамики Черного моря с использованием бассейновой модели показана на рисунке 1. Диагноз, или прогноз по модели начинается с ее инициализации. Для этого необходимо задать дату начала и конца прогноза, ввести ряд параметров, управляющих памятью, необходимой для размещения массивов, в которых хранится информация о физических полях Черного моря и атмосфере над ним, подготовить оперативную базу климатических и обновляющихся метеорологических и спутниковых данных.

Подготовка оперативной базы данных осуществляется на основе использования архивов климатических данных и результатов

предварительной обработки постоянно обновляющейся спутниковой и метеорологической информации. Предварительная обработка постоянно обновляющейся информации будет рассмотрена ниже.

Сразу непосредственно после инициализации модели выполняется циклическая последовательность операций диагноза и прогноза. Она начинается с расчета вертикальной компоненты скорости течений. Следующим этапом расчетов является ассилияция альтиметрии. В ходе выполнения этой операции осуществляется предварительная обработка альтиметрических измерений в соответствии с блок-схемой, показанной на рисунке 2. Полученные величины динамического уровня поверхности Черного моря усваиваются в модели, в соответствии с [4].

В процессе расчета полей солености и температуры выполняется ввод и интерполяция на текущее время счета данных о потоках тепла и влаги из атмосферы, используемых для задания граничных условий на температуру и соленость морской воды на поверхности Черного моря. Рассчитанное по модели поле температуры верхнего слоя моря затем корректируется в ходе ассилияции спутниковой ТПМ [5], получаемой по данным ИСЗ *NOAA*. Ассилияция спутниковых ТПМ способствует повышению достоверности моделирования гидрофизических полей в верхнем перемешанном слое моря. Расчет горизонтальных компонент скоростей течений производится в два этапа. На первом этапе рассчитываются адвективная и диффузионная составляющие. Для этого используется информация о напряжении трения ветра, поступающая из оперативной базы данных и интерполируемая на текущее время счета. Эти данные используются для учета граничных условий на горизонтальные компоненты скорости течений непосредственно на морской поверхности. Затем выполняется расчет возвышенний уровня, кинетической энергии и далее завершается расчет горизонтальных компонент скоростей течений. После этого осуществляется запись результатов расчетов в архивы выходных данных

модели. Эта операция выполняется не на каждом шаге расчета, а через определенное число шагов, заданное на этапе инициализации модели. По завершении операции вывода осуществляется проверка на окончание вычислений, которые завершаются по достижении времени окончания расчетов.

*Логическая схема ввода и предварительной обработки спутниковых и опорных данных, усваиваемых в оперативной системе диагноза и прогноза течений Черного моря. Ввод и предварительная обработка спутниковых альтиметрических измерений уровня Черного моря. Данные измерений уровня морской поверхности, получаемые со спутников *Topex Poseidon*, *ERS-2*, *Jason-1*, *Envisat* и *GFO* из глобального центра обработки альтиметрических измерений – *AVISO* (Франция), используются для задания граничных условий и повышения точности расчета физических полей Черного моря. Они поступают с периодичностью два раза в неделю, с задержкой до 3-5 суток. Объемы данных зависят от спутника с которого они получены и числа оборотов спутника вокруг Земли, включенных в каждый конкретный файл. После приема данных по сети Internet, осуществляется выбор информации по Черному морю, реорганизация формата хранения данных и запись результатов обработки в архив данных альтиметрических измерений уровня Черного моря, являющийся компонентой оперативной базы данных подсистемы диагноза и прогноза.*

*Ввод и предварительная обработка опорных метеорологических данных. Метеорологические данные, усваиваемые в модели включают:*

– информацию о поле скорости ветра, получаемую по данным реанализа *NCEP* (США) [6], или данным диагноза и прогноза на 2,5 суток по Европейской атмосферной модели *ALADIN* (Национальная Администрация по атмосфере – *NMA*, Румыния) [7], или по данным ИСЗ *QuikSCAT* (США) [8], используемую для задания граничных условий на поток импульса из атмосферы в море;

– информацию о потоках тепла и влаги, получаемую по данным, расчетов с использованием атмосферной модели *ALADIN* из *NMA* (диагноз и прогноз на 2,5 сут), которая используется для задания граничных условий на соленость и температуру на поверхности моря [5].

*Используемые данные. Данные поступают либо на стандартные сроки метеорологических наблюдений (0; 6; 12 и 18 ч. UTC – *NCEP*, *NMA*).*

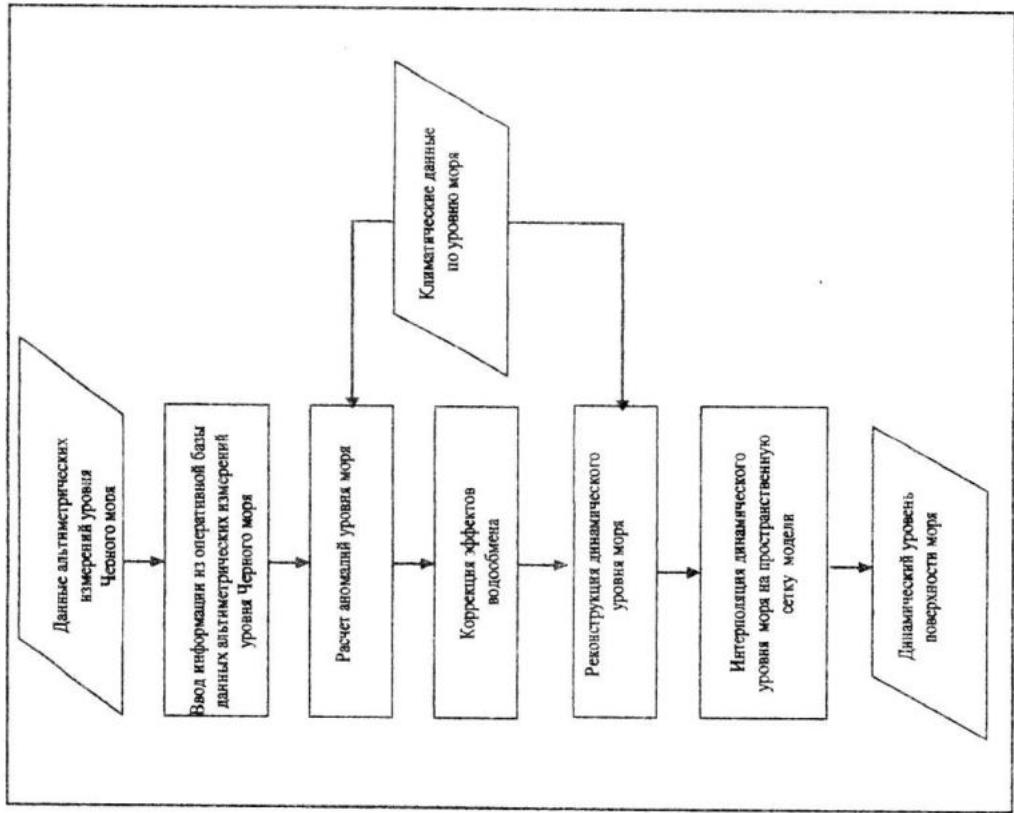


Рисунок 2 – Блок-схема обработки и ввода в модель альтиметрических измерений

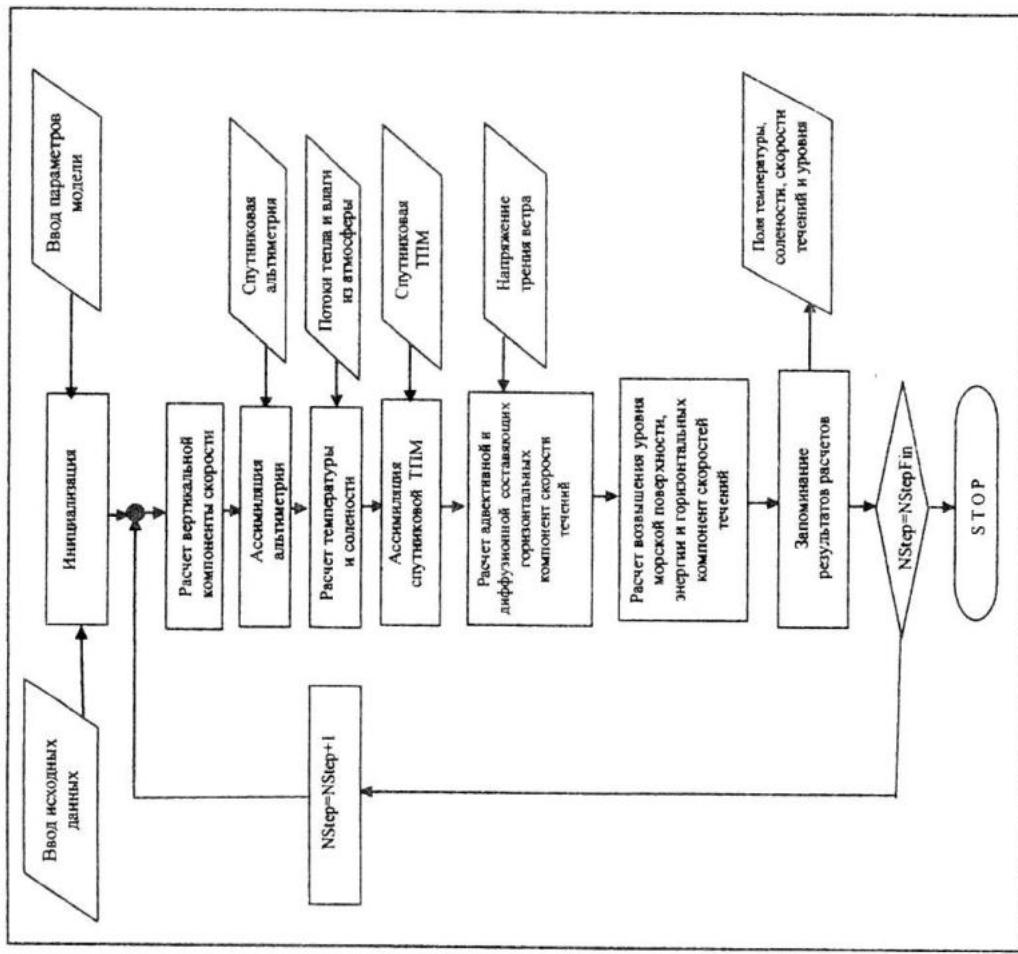


Рисунок 1 –Блок-схема подсистемы моделирования динамики Черного моря

либо между 1-4 и 13-16 ч. UTC (QuikSCAT). Данные NCEP следуют с задержкой 1-4 сут, данные NMA и QuikSCAT - 1 сут, NMA - 12-15 ч. Данные реанализа NCEP заданы на сетке  $1^\circ \times 1^\circ$  по широте и долготе, остальные - на сетке  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ . Сетка, на которой заданы данные QuikSCAT, смешена относительно сетки NMA на  $+0,125^\circ$  по широте и долготе. Каждый четвертый узел сетки NMA совпадает с узлом сетки NCEP.

Блок-схема обработки метеорологических данных приведена на рисунке 3. В процессе предварительной обработки выполняется распаковка получаемой информации, расчет величин напряжения трения ветра, перевод единиц измерений физических величин из исходных, к единицам измерений, используемым в модели. Результаты предварительной обработки записываются в специальный архив метеорологических данных. Информация из архива метеорологических данных используется на этапе создания оперативной базы данных. В процессе ее создания выполняется расчет мгновенных величин потоков тепла и влаги, требуемых для диагноза и прогноза по их интегральным величинам, далее все метеорологические параметры интерполируются на узлы модельной сетки для задания граничных условий на поля температуры, солености и горизонтальных компонент скоростей течений. До июля 2005 г в оперативных расчетах по бассейновой модели циркуляции Черного моря использовались преимущественно данные реанализа ветра NCEP, после - данные диагноза и прогноза NMA.

*Ввод и предварительная обработка данных о поле поверхности температуры, полученной по измерениям инфракрасного радиометра AVHRR, установленного на спутниках серии NOAA. Спутниковые снимки ИК-радиометра AVHRR ИСЗ NOAA, принимаются и обрабатываются в приемном центре МГИ НАН Украины для восстановления поля температуры поверхности Черного моря (ТПМ):* Эти данные поступают ежедневно, с задержкой 3-15 ч. После оперативной обработки принятой информации, восстановленные величины температуры поверхности Черного моря записываются в архив спутниковых ТПМ в виде электронных карт с пространственным разрешением  $\sim 1,1$  км. Одна карта соот-

ветствует одной дистанционной съемке Черного моря. При приеме информации с трех спутников серии NOAA в течение одного дня может быть получено до 6 карт ТПМ, некоторые дни могут быть не обеспечены ни одной картой (в случае, если морская акватория полностью закрыта облачностью).

Последующая обработка и ввод полученной информации в модель выполняется в соответствии с блок-схемой, представленной на рисунке 4. Фильтрация областей перегрева, необходима для исключения влияния эффектов аномально интенсивного прогрева верхнего слоя воды  $\leq 1$  м, в дневное время весеннего и летнего сезонов, в условиях слабых ветров. Ее необходимо выполнять, так как температура, получаемая с помощью ИК-радиометра в условиях перегрева верхнего слоя, не соответствует термодинамической температуре на первом горизонте модели по глубине. После фильтрации областей перегрева, поля ТПМ усредняются по пространственным ячейкам соответствующим модельной сетке и за сутки по времени. Эта процедура способствует снижению уровня флуктуационных ошибок величин спутниковых ТПМ и площади морской поверхности закрытой облачностью. Далее осредненные величины ТПМ вводятся в подсистему диагноза и прогноза физических полей Черного моря, в моменты времени, соответствующие 12 часам каждого дня, для которого выполняются диагностические расчеты по модели, где они усваиваются в соответствии с процедурой ассимиляции [5]

**Управление вычислительным процессом диагноза и прогноза гидрофизических полей.** В ходе выполнения диагноза, или прогноза скоростей течений и других физических полей Черного моря, требуется осуществить целый ряд этапов обработки данных. При этом приходится иметь дело с приемом, вводом и преобразованием весьма большого числа разнородных по своему содержанию типов данных, а также запускать модель диагноза и прогноза состояния морской среды с разнообразными вариантами ее настройки. Обработка каждого типа данных, или расчеты по модели являются сложными вычислительными процедурами, требующими запуска отдельных программных комплексов обработки данных, выполняемых асинхронно, но в определенной последовательности. При этом каждый такой программный комплекс порождает собственную информационную структуру с целым рядом архивов, содержащих исходные данные и результаты обработки. В силу наличия функций

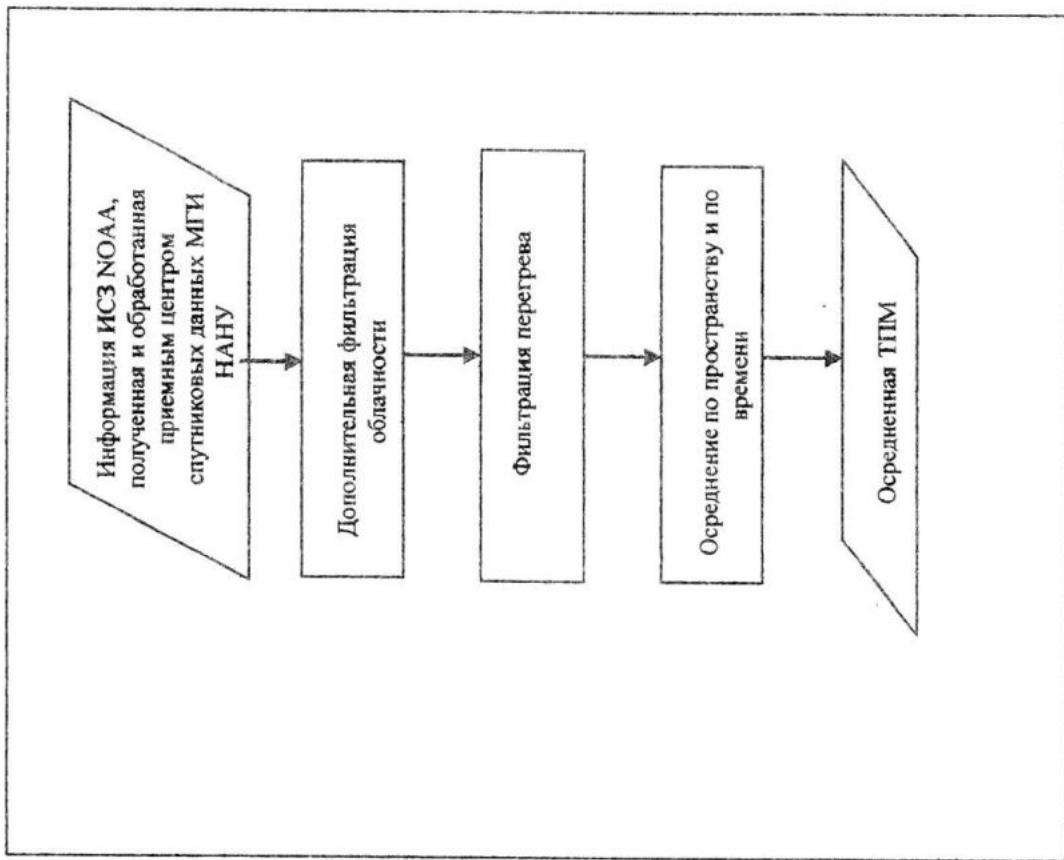


Рисунок 4 – Блок-схема обработки и ввода данных ИСЗ NOAA

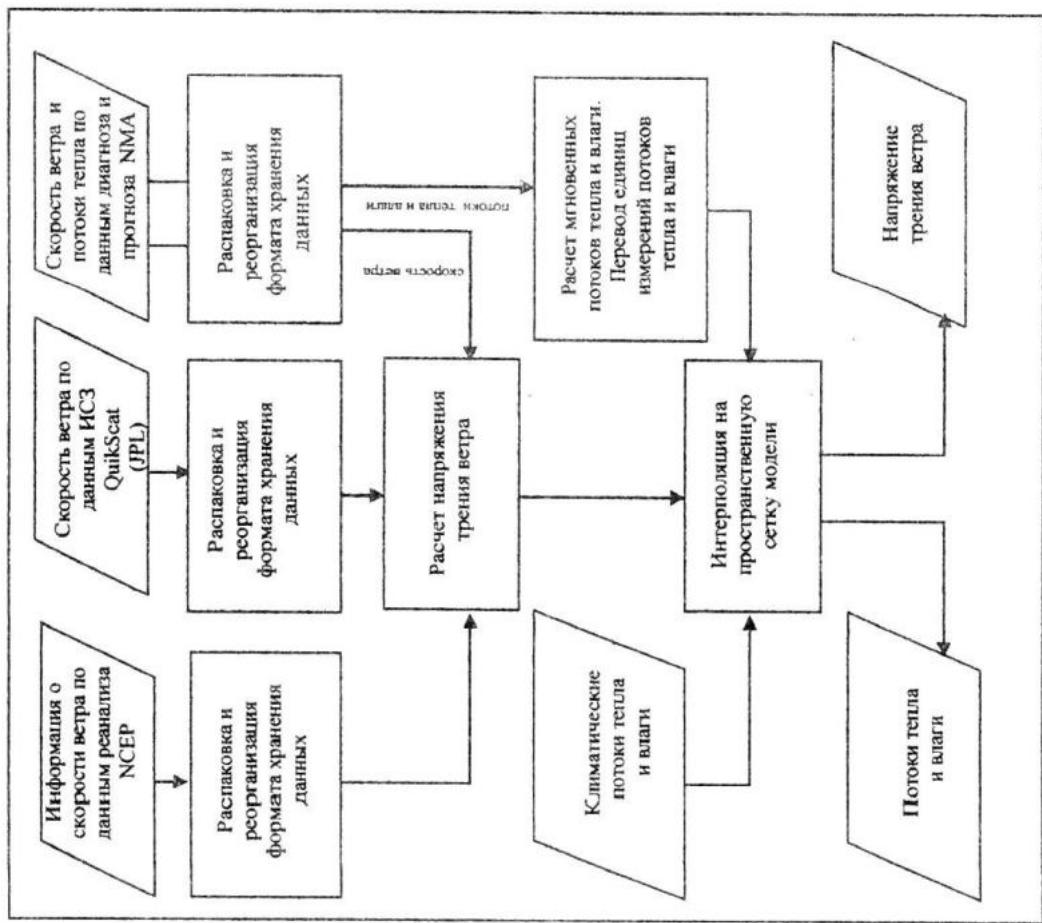


Рисунок 3 – Блок-схема обработки метеорологических данных

циональных связей между этапами обработки, выходные данные, получаемые одним комплексом, являются входными данными, используемыми другими программными комплексами системы диагностики и прогноза. В результате, при реализации вычислительного процесса возникает необходимость согласованного копирования большого числа наборов данных из одного места в другое и вызова различных программ комплексов, с помощью которых выполняется обработка. Это представляет собой достаточно сложную последовательность действий, которую оператор, реализующий процедуру диагностики и прогноза, должен держать в своей памяти. Сложность информационных связей может приводить к ошибкам реализации вычислительного процесса обработки данных и увеличению времени затрачиваемого на выполнение диагноза состояния Черного моря.

С целью облегчения реализации вычислительного процесса были разработаны задания, написанные на специально разработанном языке управления. Он обладает более развитым набором операторов, позволяющим организовать циклы и циклическое обновление управляющих данных, реализуемое с помощью специальных объектов – контейнеров данных. Это делает разрабатываемые задания достаточно гибкими и структуризованными.

Задания объединены в группы и подгруппы, в зависимости от функционального назначения и представляют собой управляющий комплекс системы диагностики и прогноза динамики Черного моря. Его структура показана на рисунке 5.

Группа *INPUT* включает подгруппы заданий *ALTIMETRY*, *NOAASST* и *METEO*, каждая из которых содержит задания, управляющие процессом обработки соответственно спутниковых альтиметрических данных, метеорологических данных и спутниковых данных о температуре поверхности Черного моря. Наличие не одного, а нескольких заданий обработки данных в каждой подгруппе связано с многовариантностью источников и форматов представления спутниковых и метеорологических данных.

Группа *MHI-casting* содержит различные задания, непосредственно упра-

вляющие выполнением процедуры диагноза и прогноза полей скоростей морских течений и других полей Черного моря.

Процедура диагноза и прогноза существенно зависят от того, какая метеорологическая информация используется для ее выполнения. Так, например, в случае, когда используются данные *NCEP* или *QuikSCAT*, то доступна только информация о скорости ветра. В том случае, когда используются данные *NMA* – наряду с данными о ветре поступает информация о потоках тепла и влаги. Эти особенности приводят к изменениям в процедуре диагноза и прогноза и целесообразности разделения заданий, управляющих вычислительным процессом прогноза на две подгруппы, названные *OperativeNCEP* и *OperativeNMA*. И хотя на рисунке 5 видно, что реализация обработки выполняется под управлением одних и тех же заданий, тем не менее, они отличаются по настройке управляющих параметров. Оперативные расчеты по модели включают подготовку данных, выполняемую под управлением задания инициализации модели. Прогнозы по модели выполняются с помощью заданий диагноза и прогноза динамики Черного моря и задания для подготовки данных для диагноза и прогноза по реальным моделям.

Подгруппа заданий настройки моделей предназначена для настройки параметров модели, управляющих выбором типа граничных условий, задаваемых на поверхности моря, режимами ассимиляции спутниковых и метеорологических данных, частотой выдачи результатов расчетов и др. Как правило, эти операции выполняются гораздо реже, чем непосредственно сами расчеты и отличаются большим числом комбинаций настраиваемых параметров. Разделение настройки модели на отдельные задания позволяет гибко организовать эту процедуру, выполняя исключительно необходимые действия.

Для архивирования и отображения данных, включая результаты диагноза и прогноза, будут использованы задания из группы *OUTPUT*, состоящей из трех подгрупп *ARCH*, *GRAF* и *NET* – соответственно архивирования, графического отображения и распространения данных на основе средств сети *Internet*. В настоящее время сами программные средства, реализующие выполнение этих операций и задания, управляющие ходом их выполнения, находятся в стадии доработки и тестирования.

Для контроля качества поступающих данных и валидации результатов модельных расчетов

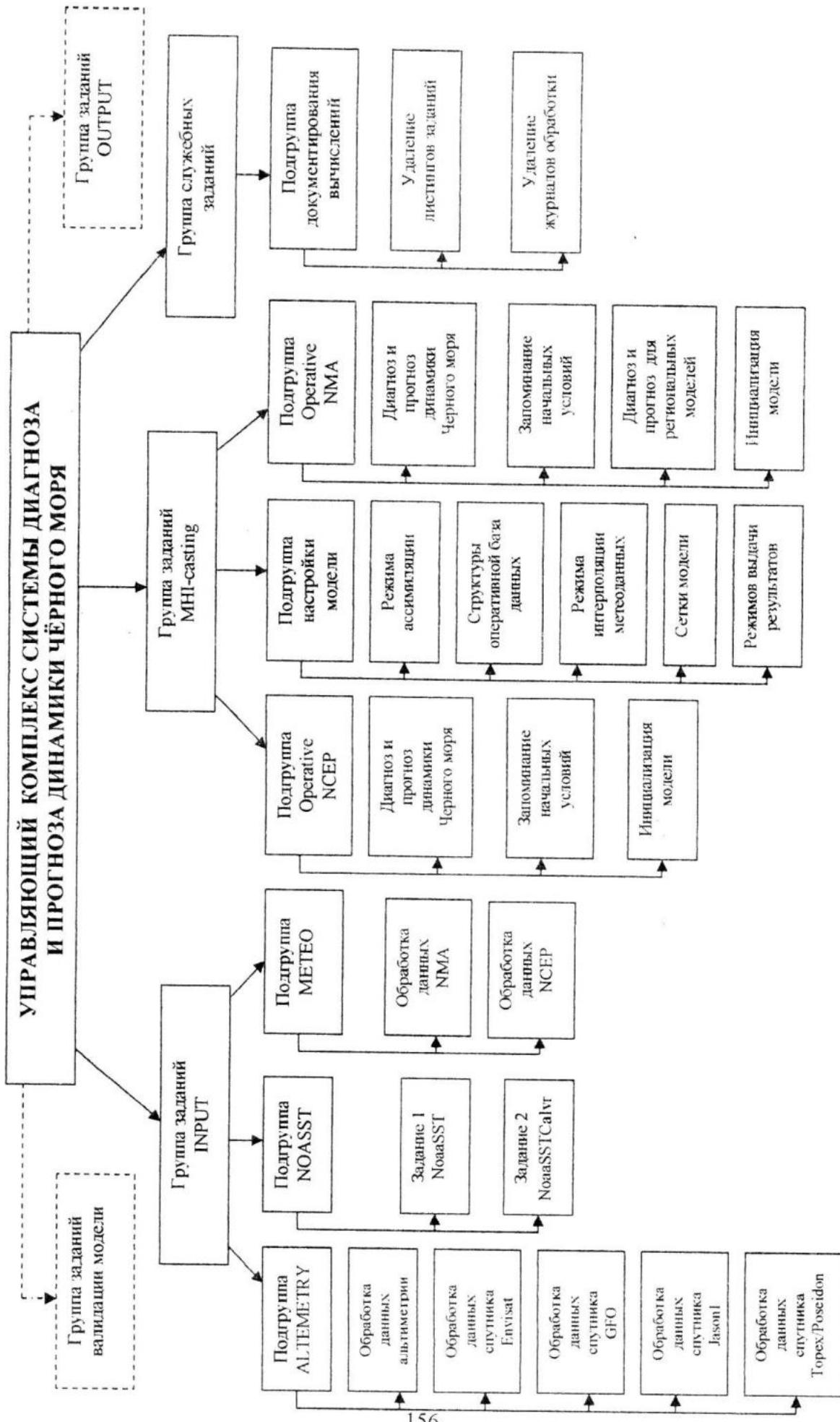


Рисунок 5 – Структура управляющего комплекса

планируется в дальнейшем доработать соответствующее программное обеспечение и задания с целью их включения в состав управляющего комплекса. Это обеспечит возможность выполнения оперативного контроля хода вычислительного процесса обработки и анализа достоверности результатов диагноза и прогноза гидрофизических полей Черного моря.

Изложенные сведения показывают, что сам управляющий комплекс имеет достаточно сложную, иерархическую структуру. Для облегчения разработки заданий, доступа к ним и хранения в памяти компьютера логической структуры и управления

вычислительным процессом, были созданы специальные программные средства разработчика и оператора управляющего комплекса. В состав разработанных программных средств входят четыре программы.

Программа *CalcMan* (*Calculation Manager*) предназначена для создания и редактирования групп и подгрупп заданий управляющих комплексов, навигации по ним, создания и редактирования заданий на специально разработанном языке управления, отладки заданий и запуска заданий на выполнение. Пример главного окна программы по состоянию на сентябрь 2006 г. показан на рисунке 6.

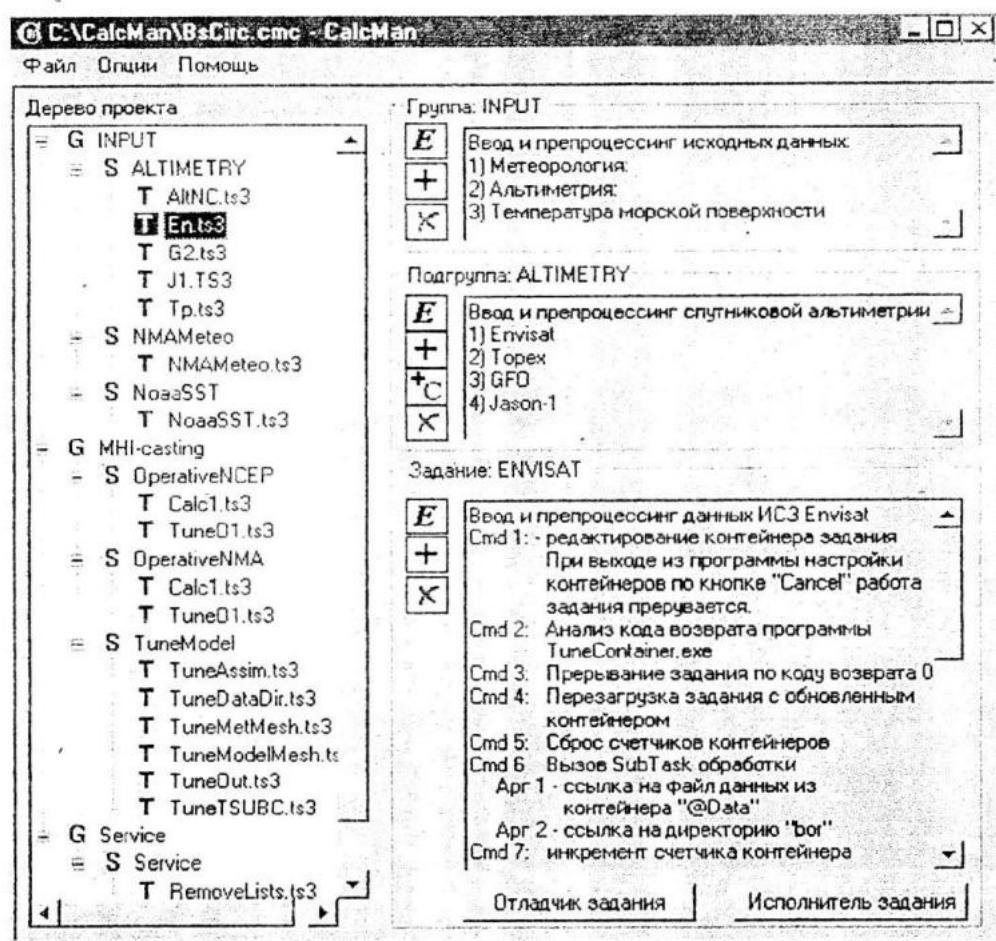


Рисунок 6 – Главное окно программы

Оно состоит из 6 основных элементов – меню, окна навигации, области редактирования групп заданий, области редактирования подгрупп заданий, области редактирования заданий и области управления запуском заданий

В окне навигации отображается структура управляющего комплекса. Каждое из окон редактирования состоит из двух элементов – панели управления редактирования с кнопками, реализующими отдельные его операции и информационного окна, со-

ного назначения и особенности выполнения группы, подгруппы, или самих заданий. Область управления запуском заданий содержит две кнопки, нажатие на левую кнопку обеспечивает запуск заданий в режиме отладки, на правую – в режиме выполнения.

Одним из наиболее сложных элементов программы является редактор заданий. Он обеспечивает их полнофункциональную разработку, позволяет осуществлять маркировку команд с изменяемыми параметрами и контейнеров данных с обновляющимся содержимым.

В результате процесс оперативной настройки задания может выполняться независимо, с помощью более простых программ *TuneTask* и *TuneContainer*. Запуск заданий может выполняться автономно, с помощью независимой программы *CMEEngine* (*Calculation Manager Engine*), обеспечивающей также вызов программ *TuneTask* и *TuneContainer*, при необходимости оперативной модификации управляющих параметров задания в ходе выполнения расчетов. Благодаря этому существенно повышается защищенность управляющих комплексов от случайного, или несанкционированного изменения их содержимого и гибкость управления вычислительными процессами.

**Выводы.** Вычислительный процесс моделирования динамики Черного моря представляет собой сложную процедуру обработки разнородной информации и отображения результатов расчетов. Разработанный и описанный выше управляющий комплекс позволил существенно облегчить и повысить оперативность процедуры диагноза и прогноза гидрофизических полей. Следует особо отметить, что на основе разработанных средств проектирования управляющих комплексов может быть решена более сложная задача – создание программного комплекса, управляющего вычислительным процессом моделирования в метасистеме междисциплинарных моделей морской среды. Это обеспечивается благодаря возможности вызова и исполнения управляющих комплексов из других аналогичных комплексов управления, функционирующих на более высоком уровне иерархии.

Более подробно с возможностями программного обеспечения, предназначенного для разработки и выполнения управляющих комплексов, можно ознакомиться по документации, выставленной на сайте <http://dvs.net.ua/>. В дальнейшем планируется создание аналогичной системы, функционирующей под управлением *OS Linux*.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Дорофеев, Г.К. Коротаев, Ю.Б. Ратнер. Система мониторинга гидрофизических полей Черного моря в квазиоперативном режиме // Системы контроля окружающей среды – 2006. – Севастополь – ЭКОСИ-Гидрофизика. 2004. Наст. сборник.
2. С. Г. Демышев, Г. К. Коротаев. Численная энергосбалансированная модель бароклинических течений океана с неровным дном на сетке С. // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. – М: ИВМ РАН. – 1992. – С.163 - 231.
3. Ю. Б. Ратнер, М. В. Мартынов, Т. М. Баянкина, С.В. Бородин. Информационные потоки в системе оперативного мониторинга гидрофизических полей Черного моря и автоматизация процессов их обработки. //Системы контроля окружающей среды – 2005. – Севастополь – ЭКОСИ-Гидрофизика. 2005 – С. 140 -149.
4. G. K. Korotaev, O. A. Saenko, S. J. Koblinsky Satellite altimetry observations of the Black Sea level // Journ. Geoph. Res., – 2001. V.106, № C1. – P. 917- 933.
5. В. Л. Дорофеев, Г. К. Коротаев. Ассимиляция спутниковых измерений поверхности температуры Черного моря в модели циркуляции //Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь – ЭКОСИ-Гидрофизика. 2004, вып. 11, – С. 24 -30.
6. E. Kalnay and Coauthors, 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project//Bull. Amer. Meteor. Soc.– 1996. V. 77. – P. 437-471.
7. S. Stefanescu, E. Cordoneanu, A. Kubryakov. Ocean wave and circulation modeling at NIMH Romania// Romanian Journal of Meteor. – 2004. V. 6, № 1 - 2. – P. 75-88
8. R. S. Dunbar et al, 2000. QuikSCAT Science Data Product User's Manual, Version 1.0, JPL Document D-18053, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA.