

# ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

DOI: 10.36535/0235-5019-2020-1-1

УДК 502.175

## ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ ЭКОИНФОРМАТИКИ

Д-р физ.мат. наук, профессор **В.Ф. Крапивин**<sup>1</sup>,  
д-р физ.мат. наук, профессор **Ф.А. Мкртчян**<sup>1</sup>,  
канд. техн. наук **И.И. Потапов**<sup>2</sup>,  
канд. физ.-мат. наук, доцент **В.В. Климов**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

<sup>2</sup> Всероссийский институт научной и технической информации РАН, Москва

## EXPERT SYSTEMS OF THE ECOINFORMATICS

**V.F. Krapivin, F.A. Mkrtchyan, I.I. Potapov, V.V. Klimov**

**Ключевые слова:** мониторинг, алгоритм, принятие решения, информация, спектральный образ

**Key words:** monitoring, algorithm, decision making, information, spectral image

*Рассмотрены методы, алгоритмы и технологии принятия решения о качестве и характеристиках объектов окружающей среды на основе данных мониторинга. Отмечены особенности оптических средств мониторинга, позволяющих формировать спектральные образы гидрохимических объектов окружающей среды. Показано, что систематическое обеспечение систем дистанционного зондирования земных покровов данными о характере экранирующего эффекта растительного покрова в фиксированный момент времени и в конкретной географической точке наряду с экспериментальными исследованиями требует развития технологии, которая позволяла бы по фрагментарной в пространстве и эпизодической во времени информации восстанавливать полную пространственную и динамическую зависимость этого эффекта от параметров окружающей среды.*

*Methods, algorithms and decision making technologies are considered to be as instruments for the assessment of quality and characteristics of environmental objects using monitoring data. Features of optical monitoring tools are marked what provides the formation of spectral images for hydrochemical environmental objects. It is shown that systematic provision of remote sensing systems of land covers with data about vegetation cover screening effect at fixed time and in concrete geographical coordinates needs the development of the technology that allows to reconstruct spatial and temporal dependency of this effect on the episodic and fragmentary information.*

## Спектроэллипсометрическая технология для контроля качества воды

В последнее время интенсивно развивается спектральная поляризационно - оптическая аппаратура для исследований в реальном масштабе времени - многоканальные поляризационные спектрофотометры, спектрополяриметры, спектральные эллипсометры и дихрометры, нефелометры, рефрактометры. Использование в современных поляризационно-оптических приборах эффективных модуляторов состояния поляризации и многоканальных анализаторов, развитие методов программирования определяют их высокие технические характеристики. Так, современные спектрофотометры обеспечивают измерение нескольких спектров в секунду с точностью и чувствительностью на уровне 1% и 0,01% соответственно, а измерения спектров вращения плоскости поляризации в реальном масштабе времени на спектрополяриметрах выполняются с высокой точностью. В то же время, коммерческие многоканальные поляризационно-оптические спектральные приборы еще не получили широкого распространения.

Совместное применение технических средств и software для оперативного мониторинга водной среды развито недостаточно из-за сложности синтеза комплексной системы мониторинга. Особенно сложны задачи сочетания алгоритмического обеспечения с уровнем информационного обеспечения системы мониторинга. Актуальная задача экологического мониторинга требует разработки компактных прецизионных поляризационно-оптических приборов экспресс анализа жидких сред. При этом эффективность решения многопараметрических задач в большей мере определяют чувствительность и точность приборов, их универсальность, возможность использования широкого спектрального диапазона. Спектральные измерения в водной среде дают информативную базу для применения современных методов и алгоритмов распознавания и идентификации загрязнителей этой среды.

В институте радиотехники и электроники Российской академии наук впервые созданы устройства, основанные на принципах многоканальной регистрации спектров ослабленного, отраженного или рассеянного света. Использование оперативных измерений спектрометрии и методов обработки данных впервые реализовано в адаптивном идентификаторе, принципиальная схема которого представлена на рис. 1. [10, 16, 17].

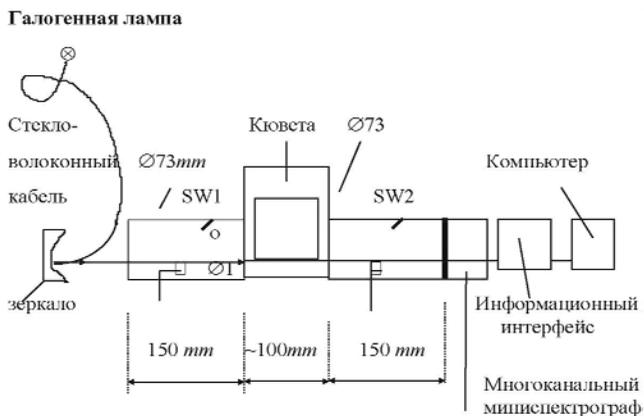


Рис. 1. Принципиальная схема адаптивного идентификатора. Через SW1 и SW2 обозначены переключатели состояния поляризации [16].

Адаптивный идентификатор был испытан в экспедиционных условиях на НИС «Дмитрий Менделеев» в Японском море и Центральных районах Тихого океана, а также при обследовании водных систем Южного Вьетнама и Сибири (о. Байкал, реки Ангара и Енисей) в рамках программ международного сотрудничества с Вьетнамским Научным Центром естественных наук и технологий, а также с Университетами Аляски и Дилларда США [9,11]. Эти эксперименты показали перспективность применения технологии спектроэллисометрии для оперативного контроля сточных вод, водных растворов в медицинской промышленности и изучения экосистем водоемов (структура пятен загрязнителей на поверхности водоемов, биомасса фитопланктона, мутность водной среды, содержание взвешенных веществ и др.)

Традиционно оптические методы исследования жидкостей являются наиболее информативными. В частности, поляризационно-оптические спектральные измерения позволяют решить широкий круг сложных задач экологического мониторинга водных сред. Задача определения концентрации различных веществ в многокомпонентных растворах по спектрам оптического пропускания и отражения, линейного и циркулярного двулучепреломления и дихроизма и по спектрам нарушенного полного внутреннего отражения успешно решается только с помощью развитого программного обеспечения.

Одним из перспективных направлений анализа растворов является жидкостная хроматография с прецизионными поляриметрическими устройствами. Следует отметить определенные трудности при создании компактных многоканальных поляризационно-оптических приборов. Как правило, ключевым элементом поляризационно-оптических приборов является модулятор состояния поляризации излучения. Это либо вращающийся поляризационный элемент (поляризатор, анализатор или компенсатор), ограничивающий частоту модуляции и значительно повышающий уровень помех, либо дорогостоящий фотоупругий модулятор, требующий совершенной термостабилизации. Используются в основном ПЗС линейки и матрицы фотодетекторов, имеющие недостаточно высокие фотометрические характеристики: малый динамический диапазон, недостаточная линейность, отсутствие доступа к отдельным пикселям, последовательное считывание фотоприемных элементов, приводящее к неэквивалентности измерительных промежутков на всех фотоприемниках.

Создание адаптивного идентификатора оказалось возможным благодаря развитию нового подхода в области поляризационной оптики. Эффективная элементная база поляризационной оптики и метод дискретной модуляции состояния поляризации позволили создать высокоточные поляризационно-оптические приборы различного назначения. Применение простых высокоэффективных переключателей поляризации и линеек кремниевых фотодиодов с произвольным доступом к фотодиодам существенно упростило задачу создания компактных недорогих поляризационно-оптических приборов: спектрофотометров, спектрополяриметров, спектроэллисометров и т.д.

Технология совместного использования спектрометрии и алгоритмов идентификации и распознавания позволило впервые создать типовой комплекс аппаратных, алгоритмических, модульных и программных средств для сбора и обработки данных о водной среде с функциями прогноза и принятия решений. Адаптивный идентификатор имеет ряд модификаций, ориентированных на использование в различных условиях. Стационарный вариант охватывает полный комплект технических и алгоритмических средств, обеспечивающих проведение измерений в

реальном масштабе времени. Использование этого варианта возможно при наличии сетевого питания 220 в. Полевой переносной вариант адаптивного идентификатора предусматривает два режима использования. При наличии ноутбука в полевых условиях (при отсутствии сетевого питания) весь функциональный спектр адаптивного идентификатора реализуется в режиме реального времени. В противном случае результаты измерений запоминаются в блоке автономной памяти, а затем вводятся в компьютер и обрабатываются.

Алгоритмическое обеспечение адаптивного идентификатора основано на комплексном использовании методов распознавания и классификации дискретных образов, формируемых на базе 35 спектров, регистрируемых за устанавливаемое оператором время. Обычно устанавливается временной интервал 1 сек., который обеспечивает регистрацию около 60 значений освещенности по каждому из 35 оптических каналов. Полученные спектры являются источниками рядов статистических параметров и различных характеристик, объединяемых в векторные пространства для последующего сопоставления с эталонными образцами, хранящимися в памяти компьютера. Технология этого сопоставления зависит от многообразия методов идентификации.

Адаптивный идентификатор рассчитан на обучение, которое представляет собой процедуру измерения спектральных характеристик и одновременно независимое измерение содержания химических элементов в водной среде. В результате в базе знаний формируется банк эталонов, сопоставление с которыми обеспечивает решение задачи идентификации. В частности, такое сопоставление может реализовываться в рамках расчета среднего квадратичного отклонения измеренного спектрального образа объекта от имеющихся в памяти компьютера эталонов. Программное обеспечение адаптивного идентификатора предусматривает различные алгоритмы решения этой задачи, среди которых имеется и кластерный анализ.

Адаптивный идентификатор может применяться в различных областях, где требуется оценить качество водного раствора или выявить присутствие в водной среде определенного набора химических элементов. Эти задачи адаптивный идентификатор решает в режиме непрерывного наблюдения за водной средой. Установленный для стационарного измерения он позволяет следить за динамикой качества воды в потоке, а при размещении на борту судна - измерять характеристики водного объекта по маршруту следования.

Функциональные возможности адаптивного идентификатора могут расширяться за счет увеличения объема эталонов в базе знаний. Переключение на естественный источник освещения позволяет решать задачи экспертизы земных покровов, обнаружения пленок нефтепродуктов на водной поверхности, определение степени загрязнения атмосферного воздуха и оценки состояния других объектов окружающей среды, спектральные образцы которых в видимом диапазоне могут изменяться.

Созданная за последнее время технология адаптивной идентификации элементов окружающей среды по данным спектральных измерений в видимом диапазоне позволяет перейти к синтезу экспертных систем для адаптивной идентификации параметров окружающей среды. В структуру таких систем входят компактный многоканальный спектрополяриметр (КМС), информационный интерфейс с компьютером (ИИК), пакет компьютерных программ (ПКП) и расширяющаяся база данных (РБД). ПКП реализует ряд алгоритмов обработки потоков данных от КМС и обеспечивает сервисные функции визуализации и управления режимом

измерений. РБД состоит из наборов эталонов спектральных образов пятен загрязнителей, изображаемых точками в многомерном векторном пространстве признаков, предварительно рассчитанных на основе обучающих выборок.

Основной принцип функционирования экспертных систем основан на фиксации изменений светового потока на выходе КМС и преобразование их в цифровой код. Дальнейшая обработка этих данных по своей эффективности определяется составом ПКП, куда включены различные алгоритмы распознавания двумерных образов. Адаптивность процедуры распознавания определяется уровнем накопления знаний об особенностях флуктуации интенсивности и поляризационных качеств отраженного света от водной поверхности. В состав ПКП входят средства, позволяющие в случае неопределенности ситуации с идентификацией пятна загрязнителя принимать экспертное решение на основе визуального анализа его спектрального образа. Эта процедура реализуется в режиме диалога и если решение принято, то оператор может фиксировать его в базе данных в форме эталона для последующих ситуаций возникновения аналогичных пятен.

После обучения функционирование экспертной системы ограничивается только количеством измерений, фиксируемого оператором исходя из соображений достижимости статистической достоверности и сохранения режима реального времени. Оператор имеет две возможности регулировать этот режим, устанавливая объем измерений или фиксируя время их накопления. Оператор связывается с различными блоками экспертной системы через человеко-машинный интерфейс ИИК, который обеспечивает селективность управления операциями всех блоков.

Таким образом, применение спектроэллипсометрической технологии и разработанных на ее основе систем для контроля водной среды дает возможность быстро, практически в реальном масштабе времени, решать широкий круг задач оперативного мониторинга водных растворов как искусственного, так и природного происхождения. При этом измерительная часть экспертной системы может монтироваться стационарно и пользователь будет получать непрерывный поток данных о состоянии водной среды. Это особенно важно при необходимости инспекции особо опасных химических предприятий.

### **Экспертная система для идентификации пятен загрязнителей на водной поверхности**

Задача обнаружения и идентификации пятен загрязнений на водной поверхности, особенно пятен нефтепродуктов, решается многими исследователями [19, 20]. Созданная за последнее время технология адаптивной идентификации элементов окружающей среды по данным спектральных измерений в видимом диапазоне позволяет перейти к синтезу экспертной системы для адаптивной идентификации параметров окружающей среды (ESAIEP - Expert System for Adaptive Identification of Environment Parameters). Элементы ESAIEP описаны в различных их модификациях в работах [16, 17]. В структуру системы входят КМС, ИИК, ПКП и РБД. ПКП реализует ряд алгоритмов обработки потоков данных от КМС и обеспечивает сервисные функции визуализации и управления режимом измерений. РБД состоит из наборов эталонов спектральных образов пятен загрязнителей, изображаемых точками в многомерном векторном пространстве признаков, предварительно рассчитанных на основе обучающих выборок.

Принцип функционирования ESAIEP основан на фиксации изменений светового потока на выходе КМС и преобразование их в цифровой код.

Дальнейшая обработка этих данных по своей эффективности определяется составом ПКП, куда включены различные алгоритмы распознавания двумерных образов. Адаптивность процедуры распознавания определяется уровнем накопления знаний об особенностях флуктуации интенсивности и поляризационных качеств отраженного света от водной поверхности. В состав ПКП входят средства, позволяющие в случае неопределенности ситуации с идентификацией пятна загрязнителя принимать экспертное решение на основе визуального анализа его спектрального образа. Эта процедура реализуется в режиме диалога с ESAIEP и если решение принято, то оператор может фиксировать его в базе данных в форме эталона для последующих ситуаций возникновения аналогичных пятен.

Принципиальная схема блока ПКП, обеспечивающего процедуру идентификации, представляет собой некоторое преобразование  $\Phi$  (рис. 2, табл. 1). Интенсивность света  $\xi_i^j$ , регистрируемая в момент времени  $t_i$  в канале  $\lambda_j$  поступает в алгоритм  $\Phi$ , где реализуется процедура различения двух гипотез  $H_0$  и  $H_1$  (рис. 3). Оператор ESAIEP определяет начальные данные  $v_i$ ,  $\alpha$  и  $\beta$ , а также решает какие параметры  $\mathbf{u}_i = (u_1, \dots, u_r)$  будут рассчитаны на основе измерений  $\{\xi_i^j\}$ . Сервисный блок ИИК дает возможность сформировать вектор  $\mathbf{u}_i$  из статистических характеристик рядов  $\{\xi_i^j\}$  или использовать непосредственные измерения. Априорная информация характеризует тип распределения  $f_a(\mathbf{u}_i)$ .  
Функция

$$L_i = \sum_{j=1}^{\theta} \psi_j = f_{a1}(\mathbf{u}_i^j) / f_{a0}(\mathbf{u}_i^j)$$

сравнивается с ее предельными значениями  $L_{i,min}$  и  $L_{i,max}$ . На первом этапе эти величины выбираются достаточно произвольно, но затем они изменяются до достижения максимальной точности распознавания гипотез  $H_0$  и  $H_1$ . Мы имеем  $L_{i,min} \rightarrow L_{i,min}^*$  и  $L_{i,max} \rightarrow L_{i,max}^*$ . Величины  $L_{i,min}^*$  и  $L_{i,max}^*$  запоминаются в РБД.

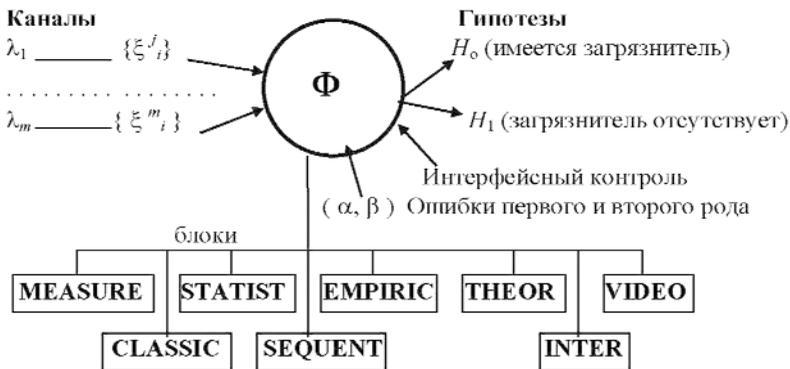


Рис. 2. Концептуальная блок-схема процедуры идентификации типов пятен загрязнителей на водной поверхности.

Описание блоков ESAIEP, указанных на схеме рис. 4.4.

Блок	Характеристика блока
MEASURE	Визуализация данных измерений (спектры, корреляции, статистические параметры, эмпирические и теоретические функции распределения).
CLASSIC	Вычисление параметров для классической процедуры принятия решений по критерию Неймана-Пирсона.
STATIST	Расчет статистических параметров и других характеристик, формирование векторного пространства $\{u_i\}$ .
SEQUENT	Оценка параметров для применения процедуры последовательного анализа Вальда при принятии решения.
EMPIRIC	Восстановление эмпирических функций распределения.
INTER	Реализация функций пользовательского интерфейса, оснащенного программными средствами вмешательства в режим работы экспертной системы на любом этапе ее функционирования.
THEOR	Реализация статистического критерия оценки теоретической функции распределения
VIDEO	Процедуры визуализации

После обучения функционирование экспертной системы ограничивается только количеством измерений, фиксируемом оператором исходя из соображений достижимости статистической достоверности и сохранения режима реального времени. Оператор имеет две возможности регулировать этот режим, устанавливая объем рядов  $\{z_i^j\}$  или фиксируя время их накопления. Обычно выбирается последняя характеристика, равная 1 сек. Рис. 4 поясняет эту процедуру. Оператор связывается с различными блоками ESAIEP через человеко-машинный интерфейс ИИК, который обеспечивает селективность управления операциями всех блоков.

Рис. 3. Процедура последовательного анализа для различения гипотез  $H_0$  и  $H_1$ .

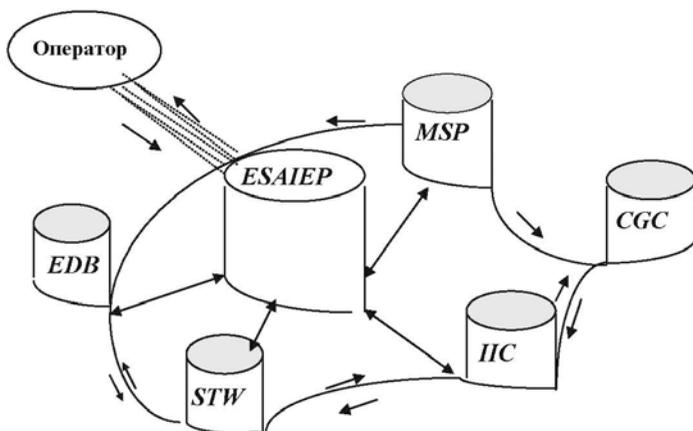


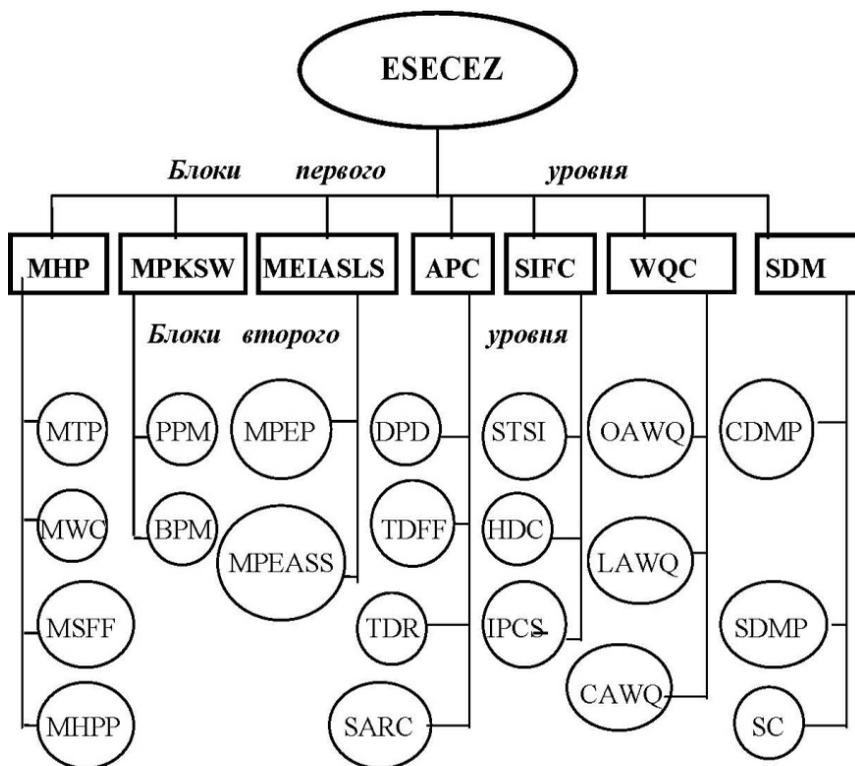
Рис. 4. Модель ESAIEP.

При наличии на поверхности воды пленки нефти система анализирует ее толщину, возраст, источник и геометрическую конфигурацию. Наиболее информативными в этом случае являются ряды данных измерений на длинах волн 398 нм, 439 нм и 480 нм. В случае растворенных или взвешенных в водной среде компонентов система оценивает их концентрацию, а при наличии данных в РБД о гидродинамических параметрах водного тела рассчитывает их пространственное распределение.

#### Экспертная система для экологического контроля зоны эстуария

Проблема оперативного многопланового контроля качества морской воды в зонах эстуариев, где, как правило, сосредотачиваются разветвленные сети антропогенных путей попадания загрязняющих веществ в морскую воду, является предметом исследования многих природоохранных программ национального и международного масштабов. Сложность этой проблемы обусловлена пространственной протяженностью акваторий эстуариев, наличием множества внешних факторов воздействия на их окружающую среду и ее нестационарностью. Для определения качества воды в эстуарии необходимо учитывать взаимодействие множества физических, химических и биологических процессов, что требует развития и применения системных подходов и компьютерных технологий.

Структура предлагаемой экспертной системы базируется на идеологии синтеза геоинформационных мониторинговых систем (ГИМС - технология). Основой ESECEZ является ряд моделей физических, химических и биологических процессов формирования качества морской воды в условиях функционирования аквагосистемы эстуария. Как видно из рис. 5 в структуре всех этих процессов выделены условно изолированные самостоятельные блоки, взаимосвязь между которыми реализуется через информационные параметрические входы и выходы. В такой реализации замена некоторых блоков или организация их дублирования не влияет на другие блоки и, следовательно, не требует дополнительных согласований внутри системы. Согласование блоков и информационных потоков по критерию вход/выход контролируется блоком SC и только этот блок может позволять какие-либо отклонения в уже согласованной жесткой структуре блоков ESECEZ.



**Рис. 5.** Блок-схема экспертной системы для экологического контроля в зоне эстуария. Описания сокращений даются в тексте.

Вся акватория эстуария обозначается в дальнейшем через  $\Omega = \{(\varphi, \lambda)\}$ , где  $\varphi$  - широта,  $\lambda$  - долгота. Водное тело эстуария обозначается через  $\Xi = \{(\varphi, \lambda, z)\}$ , где  $z$  - глубина. Пространство эстуария делится на пиксели  $\Xi_{ijk} = \{(\varphi, \lambda, z), \varphi_i \leq \varphi \leq \varphi_{i+1}, \lambda_j \leq \lambda \leq \lambda_{j+1}, z_k \leq z \leq z_{k+1}\}$ . Величины

$\Delta\varphi_i = \varphi_{i+1} - \varphi_i$ ,  $\Delta\lambda_j = \lambda_{j+1} - \lambda_j$ ,  $\Delta z_k = z_{k+1} - z_k$  являются свободными параметрами, выбор которых зависит от пользователя и безусловно определяется его информационной базой. Граница между акваторией эстуария и открытым морем, обозначаемая через  $\Gamma$ , также задается пользователем.

**Блок MHP.** В этом блоке сосредоточены средства имитации гидродинамических процессов, характерных для эстуариев. Сюда включены параметризации приливно-отливных потоков морской воды (блок MTP), берегового стока (блок MWC) и сточных вод (блок MSFF). Блок MHP управляет всеми этими параметризациями, обеспечивает внешние информационные потоки как от других блоков экспертной системы, базы данных, базы знаний, так и от пользователя. Под последним понимается любая другая информационная система, сеть интернет, индивидуальный пользователь или их комбинация.

Геометрическое представление гидродинамических процессов в резервуаре эстуария дается в форме равномерной пространственной структуры (блок МНРР). Согласно этой схеме водная среда внутри  $\Xi_{ijk}$  считается равномерно перемешанной, так что пиксели  $\Xi_{ijk}$  играют роль базовых структур, водные потоки между которыми формируют полную картину гидродинамических процессов в эстуарии. Пиксели  $\Xi_{ijk}$  используются для формирования вычислительной процедуры. В принципе их введение является значительным упрощением всей структуры расчетных схем во многих блоках экспертной системы и снижением требований к набору сведений об аквагосистеме эстуария. Как показывает опыт других аналогичных работ, эта методика оказывается эффективной после выбора размеров сетки  $\Delta\varphi \times \Delta\lambda \times \Delta z$  в процессе серии опытных имитационных экспериментов. Но в принципе возможен формальный подход к решению систем уравнений, описывающих гидрофизические процессы в эстуарии. Требуется лишь тщательный выбор граничных и начальных данных. А это повышает требования к базе данных.

Блок *МПКSW* управляет совокупностью процедур, обеспечивающих слежение во времени за изменениями попавшего в морскую среду загрязнителя. Эти изменения в каждой точке  $(\varphi, \lambda, z)$  пространства эстуария связаны с физическими, химическими и биологическими процессами. Многообразие возможных ситуаций, возникающих в этом динамическом процессе, определяется многими обстоятельствами. Все физические механизмы переноса загрязнителя из одной точки акватории  $\Omega$  в другую точку моделируются в блоке МНР. На долю блока *МПКSW* приходятся химические и биологические превращения загрязнителя. Физические же процессы делятся на две части. Первая их часть относится к переносу загрязнителя в морской среде за счет движения водных масс. Эти процессы описываются в блоке МНР. Ко второй части относятся физические процессы переноса загрязнителя за счет гравитационного осаждения, переноса загрязнителя биологическими объектами и процессы растворения и образования сгустков загрязнителя. Эти процессы моделируются в блоке РРМ.

Роль экосистемы в процессах трансформации загрязнителей зависит от их типов. Следуя многочисленным исследованиям трофических структур морских экосистем, выберем в качестве стандарта для эстуариев представленную на рис. 6 структуру с указанными в ней трофическими связями. Считается, что фитопланктон, бактерии, зоопланктон, детрит и биогенные элементы являются пассивными элементами экосистемы и перемещаются в пространстве с движением водных масс. Элементы нектона перемещаются в пространстве только за счет миграции по направлению максимального градиента пищевого рациона. Элементы бентоса являются стационарными в пространстве.

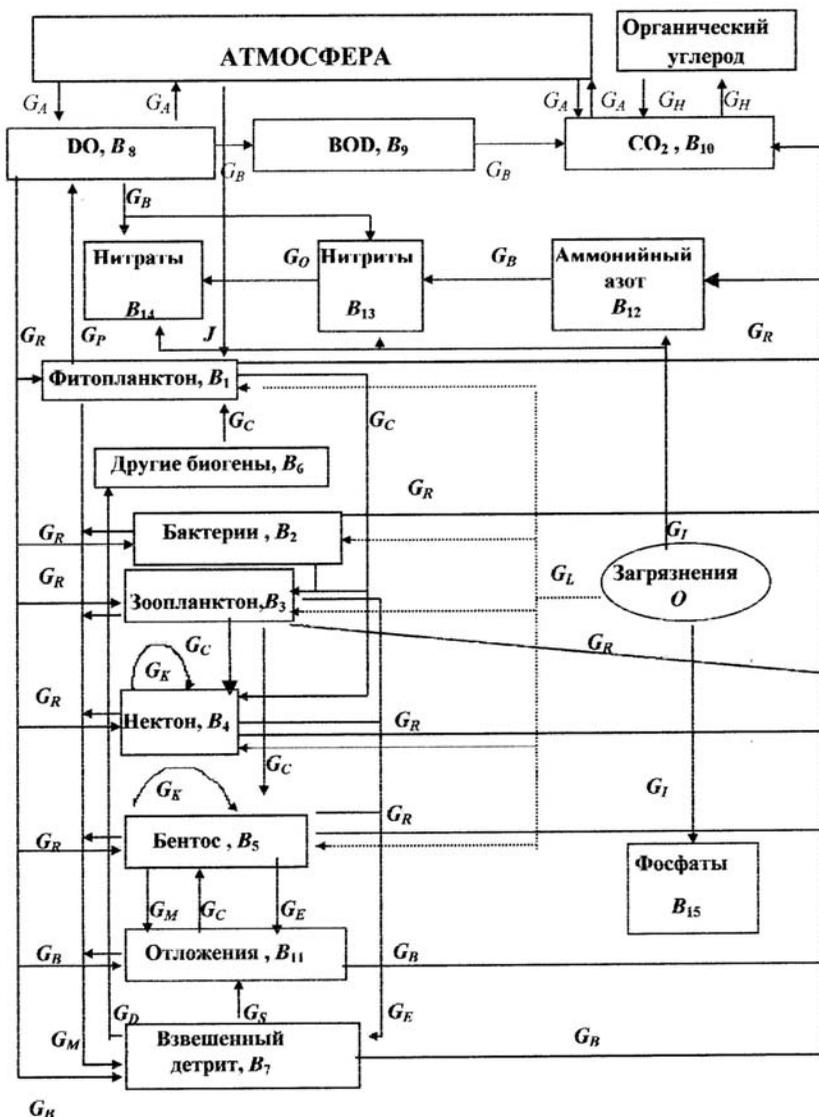


Рис. 6. Типовая структура энергетических и информационных связей в аквагеосистеме эстуария.

Блок MEIASLS управляет информационными связями между блоками второго уровня при расчетах динамических характеристик потоков химических веществ на границах атмосфера-море, море-суша и эстуарий-открытое море. Блок-схема такого взаимодействия представлена на рис. 7.

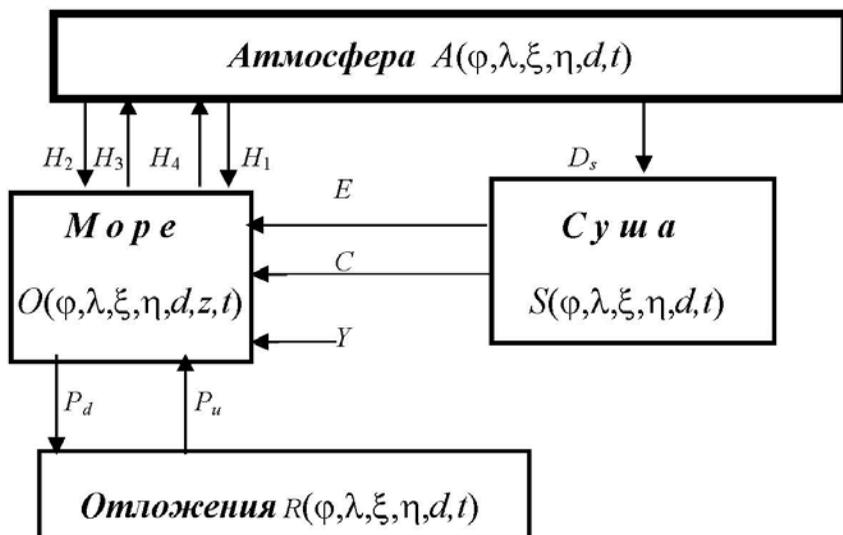


Рис. 7. Потoki химических элементов в системе «атмосфера-море-суша», учитываемые в ESECEZ.

Блок APC координирует взаимосвязь блоков второго уровня, собирающих, сортирующих, проверяющих и заносящих в базу данных различные сведения об антропогенных процессах в зоне эстуария. Осуществляется проверка достоверности официальных данных, выявляются места их несогласованности. Блок APC обеспечивает диалог с оператором по всем этим вопросам и реализует принимаемые им решения. Реализуются алгоритмы оценки комплексной непротиворечивости информации, циркулирующей в экспертной системе.

Блок SIFC согласует информационные потоки, возникающие в экспертной системе для подготовки ответов на запросы оператора, оформления отчетов по стандартным формам и проверки соответствия представляемой информации принятым критериям качества водной среды в зоне эстуария.

Блок WQC осуществляет выбор и включение алгоритмических процедур, обеспечивающих расчет показателей качества воды в эстуарии в соответствии с запрашиваемым набором критериев. Реализуется коррекция и обновление фрагментов баз данных и знаний, ответственных за формирование критериев качества воды в эстуарии.

Блок SDM регулирует процессы принятия решений в соответствии с классической и последовательной процедурами. Оператору дается возможность выбора процедуры или их комбинации. Контролируется процесс накопления статистических рядов по указанным критериям качества воды.

Блоки второго уровня реализуют конкретные алгоритмы, модели и другие процедуры обработки данных, поступающих в экспертную систему. Взаимосвязь между этими блоками осуществляется через блоки первого уровня. Такая структура позволяет иметь дублирующие реализации блоков второго уровня. Эти реализации создают гибкую информационную среду, позволяющую варьировать точности при параметризации процессов и регулировать требования к базе данных.

Блок *МТР* имитирует приливно-отливные процессы в зоне эстуария. Будем считать, что процесс прилива или отлива в эстуарии подчиняется периодическому закону движения водных масс через границу  $\Gamma$  в двух противоположных направлениях, ортогональных  $\Gamma$  и чередующихся через интервал времени  $\tau$ , в общем случае являющегося функцией времени и задаваемой оператором или определяемой в базе знаний. Пусть в некоторый момент  $t_{max}$  скорость движения воды через  $\Gamma$  достигает  $V_{max}$ . Тогда принимаем:

$$V(\varphi, \lambda, t) = V_{\Gamma}(t) = V_{max} \left| \cos[\pi(t - t_{max}) / \tau] \right| ;$$

$$(\varphi, \lambda) \in \Gamma, t_{max} - \tau/2 \leq t \leq t_{max} + \tau/2$$

Направление движения воды в эстуарии изменяется на противоположное направление при отливах и приливах. При адаптации системы к конкретному эстуарию в базу данных закладывается эталон направлений течений, согласованный с сеткой  $\Delta\varphi \cdot \Delta\lambda$  и возможно на нескольких уровнях по глубине  $z$ . Пусть это будет совокупность матриц  $\left\{ \left\| \alpha_{ij}^k \right\| \right\}$ . В последующем при функционировании экспертной системы происходит переключение направлений течений путем замены через каждые  $\Delta t = \tau$  элементов  $\alpha_{ij}^k$  на направление  $\alpha_{ij}^k + \pi$ .

Максимальное изменение глубины эстуария будем рассчитывать по формуле

$$Z_p(\varphi, \lambda, t) = Z_0(\varphi, \lambda, t) + \sigma_{\Gamma} V_{max} \tau / 2 \sigma,$$

где  $\sigma_{\Gamma}$  - интегральная оценка площади сечения входа эстуария вдоль  $\Gamma$ ,  $Z_0$  - распределение глубин в момент окончания отлива;  $\sigma$  - площадь эстуария.

Блок *МВС* реализует модель поверхностного стока и обеспечивает формирование потока  $E(\varphi, \lambda, \xi, \eta, d, t)$  загрязнителя типа  $\xi$  в состоянии  $\eta$  с параметром  $d$  в момент времени  $t$ . Считается, что поток  $E$  формируется только за счет стока осадков или воды, используемой для орошения или ирригации в сельском хозяйстве:

$$E(\varphi, \lambda, \xi, \eta, d, t) = S(\varphi, \lambda, \xi, \eta, d, t) Q(\varphi, \lambda, t) k(\xi, \eta, d, t),$$

где коэффициент захвата  $k$  в данном случае является коэффициентом вымывания,  $S$  - концентрация загрязнителя в почве,  $Q$  - поверхностный сток.

Блок *MSFF* реализует различные процедуры формирования потоков сточных вод в эстуарий. Выбор между ними осуществляет оператор экспертной системы.

Блок *MHPP* описывает механизмы перемещения загрязнителя в эстуарии за счет движения водных масс, гравитационного осаждения, молекулярной диффузии, турбулентного перемешивания и других процессов. Весь процесс движения загрязнителя в эстуарии складывается из обменов водными массами между пикселями  $\Xi_{ijk} \subseteq \Xi$ . Рассмотрим все элементы этого движения.

Самым незначительным по значимости процессом переноса вещества между пикселями является молекулярная диффузия растворенного вещества. Тем не менее, так как временные масштабы функционирования экспертной системы составляют месяцы и годы, то этот процесс учитывается для полноты описания поля загрязнителя в акватории эстуария. В общем случае масса растворенного

вещества, пересекающего за единицу времени одну из границ пикселя  $\Xi_{ijk}$  площадью  $S_{ijk}$ , описывается соотношением:

$$\frac{\partial O}{\partial t} = \begin{cases} -\delta dzd\varphi \partial O / \partial \lambda & \text{при потоке вдоль широты,} \\ -\delta dzd\lambda \partial O \setminus \partial \varphi & \text{при потоке вдоль долготы,} \\ -\delta d\lambda d\varphi \partial O \setminus \partial z & \text{при вертикальном потоке.} \end{cases}$$

Суммарное изменение концентрации загрязнителя за счет молекулярной диффузии в компартменте  $\Xi_{ijk}$  равно:

$$\partial O / \partial t = -\delta [dzd\varphi \partial O / \partial \lambda + dzd\lambda \partial O / \partial \varphi + d\lambda d\varphi \partial O / \partial z]$$

где коэффициент молекулярной диффузии  $\delta$  по различным оценкам может принимать значения от  $1,3 \cdot 10^{-5}$  до  $2 \cdot 10^{-5}$  г·см<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup>.

Приливно-отливное течение в эстуарии, конечно, является базовым процессом, от точности описания которого зависит достоверность расчетов поля загрязнителя. Схема реконструкции этого поля имеет бинарную структуру, состоящую из описаний ламинарного или турбулентного режимов движения морской воды. Разделителем этих режимов служит число Рейнольдса  $R$ , рассчитываемое по формуле  $R = V\rho \bar{z} / \mu$ , где  $\rho$  - плотность воды в эстуарии,  $\mu$  - коэффициент вязкости морской воды,  $\bar{z}$  - средняя глубина эстуария. В среднем для океанской среды ламинарный режим имеет место лишь при  $V < 2 \cdot 10^3$  см/с. В зоне эстуария выполнение такого соотношения мало вероятно, но учет его необходим для полноты описания процессов.

Изменение концентрации загрязнителя опишем уравнением

$$\frac{\partial O}{\partial t} + V_\varphi \frac{\partial O}{\partial \varphi} + V_\lambda \frac{\partial O}{\partial \lambda} + V_z \frac{\partial O}{\partial z} = D_\varphi \frac{\partial^2 O}{\partial \varphi^2} + D_\lambda \frac{\partial^2 O}{\partial \lambda^2} + D_z \frac{\partial^2 O}{\partial z^2} + f + F - \gamma O$$

где  $f$  - функция, описывающая поведение неконсервативного загрязнителя (участие в химических реакциях);  $D = (D_\varphi, D_\lambda, D_z)$  - коэффициент турбулентного перемешивания;  $F$  - функция источника и стока;  $\gamma$  - постоянная скорости седиментации.

Формально для расчета распределения  $O(\varphi, \lambda, z, \xi, \eta, t)$  необходимо задать начальные и граничные условия. Их формирование реализуется в диалоговом режиме.

Блок ВРМ реализует модель экосистемы эстуария в соответствии со схемой рис. 6. Внутри этой модели процессы трансформации загрязнителей описываются лишь частично. Учитываются только те типы загрязнителей, которые могут играть роль биогенных элементов. Считается, что поступающая на вход экосистемы эстуария энергия солнечной радиации  $J$  оценивается вне данной экспертной системы и является функцией координат и времени, определяемой либо по сценарию, либо текущими данными, вводимыми оператором в базу знаний. Меню экспертной системы предусматривает обе возможности. В случае формулировки сценария предоставляется возможность выбора между набором функций  $J(\varphi, \lambda, t)$ , представляемых аналитически, графически или таблично с указанием

временного периода их действия. Наиболее приемлемыми являются оценки  $J(\varphi, \lambda, t)$  в течение года, полугода, квартала, месяца и недели. Наблюдения за величинами  $J(\varphi, \lambda, t)$  в предыдущие периоды времени позволяют их использовать с некоторой коррекцией в последующие периоды. Конечно, оперативные измерения  $J(\varphi, \lambda, t)$  наиболее предпочтительны.

Блок *PPM* отражает закономерности физического взаимодействия между морской водой и загрязнителем. Характер этих процессов своеобразен для каждого типа загрязнителя. Но, конечно, можно выделить такие общие процессы, как образование сгустков (они быстрее оседают); всплывание на поверхность с образованием пятен различной толщины и плотности и испарение; растворение и т.п. Некоторые соображения на этот счет даны при описании блока *BPM*.

Блок *MPEASS* моделирует процессы обмена химическими элементами между атмосферой и морем. Эти процессы включают потоки  $H(\kappa, \xi, \eta, d)$ , где параметр  $\kappa$  описывает вид потока ( $\kappa=1$  - дождь;  $\kappa=2$  - сухое осаждение;  $\kappa=3$  - испарение;  $\kappa=4$  - брызги;  $\kappa=5$  - аэрация);  $\xi$  - тип загрязнителя;  $\eta$  - состояние загрязнителя ( $\eta=1$  растворенная фракция,  $\eta=2$  - пыль);  $d$  - идентификатор физического состояния загрязнителя ( $d=0$  для газа или растворенной фракции,  $d>0$  отражает величину диаметра частиц пыли в микронах). В частности имеем:

- Поток  $H(1, \xi, 1, d)$  описывает процесс выпадения загрязнителя  $\xi$  в растворенном виде с дождем.
- Поток  $H(2, \xi, 2, d)$  соответствует сухому осаждению частиц пыли или других аэрозолей с диаметром  $d$  микрон для загрязнителя типа  $\xi$ .
- Поток  $H(1, \xi, 2, d)$  отражает процесс вымывания пылевых частиц из атмосферы дождем.
- Поток  $H(3, \xi, 1, d)$  представляет перенос загрязнителя типа  $\xi$  с характерной скоростью  $d$  из морской среды в атмосферу с испарением.
- Перенос загрязнителя типа  $\xi$  из морской среды в атмосферу с брызгами в растворенном виде описывает поток  $H(4, \xi, 1, d)$ , а в нерастворенной форме - поток  $H(4, \xi, 2, d)$ .

Блок *TDFP* формирует все фрагменты базы данных, оформляет табличные материалы, создает информационные потоки при обращении оператора к базе данных с запросами. В частности, в этом блоке формируются информационные образы эстуария при адаптации *ESECEZ*.

Блок *TDR* обслуживает обновление базы данных. В отличие от блока *TDFP* здесь подконтрольными являются динамические элементы базы данных. Имеется в виду все расчетные фрагменты. Оператор задает режимы наблюдения за окружающей средой, определяет какую информацию и за какое время хранить в базе данных, в каком виде и определяет степень их доступности.

Блок *SARC* помогает отслеживать закономерности в антропогенном поле зоны эстуария, выявляя наиболее характерные процессы и оценивая степень влияния всех антропогенных объектов на качество водной среды. Для этого используются алгоритмы, априори заложенные в базу знаний.

Блок *STSI* обеспечивает процедуру адаптации *ESECEZ* к реальному образу конкретного эстуария. Для пользователя создаются следующие доступные процедуры.

- Пользователь вводит в память компьютера карту территории, охватывающей акваторию эстуария. Это может быть реализовано с помощью сканера или пользователь рисует карто-схему территории с помощью графического редактора.

- Акватория эстуария обрамляется квадратом с координатами левого верхнего угла  $(\phi_1, \lambda_1)$  и правого нижнего угла  $(\phi_N, \lambda_N)$ . Задаются шаги дискретизации территории по широте  $\Delta\phi$ , долготе  $\Delta\lambda$  и глубине  $\Delta z$ .

- Пользователь получает возможность формировать множество идентификаторов различных сечений образа окружающей среды эстуария на каждом уровне  $z_i = z_{i-1} + \Delta z$ .

- Определяются:

(а) идентификатор акватории  $I_1 = \left\| a_{ij}^1 \right\|$ , где

$$a_{ij}^1 = \begin{cases} 0, & \text{если } (\phi, \lambda) \notin \Omega; \\ 1, & \text{если } (\phi, \lambda) \in \Omega \text{ и имеет место вродная поверхность;} \\ 2, & \text{если } (\phi, \lambda) \in \Omega \text{ и имеет место суша (острова).} \end{cases}$$

(б) идентификатор структуры акватории  $I_2 = \left\| a_{ij}^2 \right\|$ , где  $a_{ij}^2$  является двоичным вектором, позиции которого определяют наличие или отсутствие на территории  $\Omega$  того или иного явления или объекта. Например,  $a_{ij}^2 = (i_1, \dots, i_m)$ , то можно задать такую конфигурацию этого вектора, в которой присутствие (отсутствие)  $j$ -го явления соответствует условию  $i_j = 1$  (0). В частности:

$i_1$ : в акваторию  $\Omega_{ij}$  впадает ( $i_1=1$ ) или не впадает ( $i_1=0$ ) водный поток типа ручья, сточной канавы, канализации, речки и т.п.;

$i_2$ : акватория  $\Omega_{ij}$  граничит (1) или не граничит (0) с сельскохозяйственным полем (предприятием);

$i_3$ : в акватории  $\Omega_{ij}$  расположен (1) или не расположен (0) порт;

$i_4$ : через акваторию  $\Omega_{ij}$  проходят (1) или не проходят (0) транспортные пути.

В случае, если в акватории  $\Omega_{ij}$  присутствуют все возможные и учитываемые экспертной системой ситуации с описанием ее конфигурации имеем вектор  $a_{ij}^2 = (1, 1, 1, \dots, 1)$ . Другими словами здесь необходимо составить перечень возможных элементов образа окружающей среды эстуария.

*Блок HDC* формирует отчетную документацию в соответствии с формами, принятыми в международных, государственных, региональных и местных службах контроля окружающей среды.

*Блок IPCS* обеспечивает компьютерную сигнализацию о нарушении экологической обстановки с выдачей на дисплей сопутствующей информации о координатах, характере и причинах такого нарушения.

*Блок SAWQ* формирует информацию о комплексной оценке качества воды, как по совокупности ряда критериев, так и по пространству. Также рассчитываются параметры «пятнистости» акватории эстуария с выделением характерных ее участков. Пользователю предоставляется возможность сформировать индекс качества воды в виде одного числа, отражающего идеологию пользователя относительно оценки качества воды.

*Блок CDMP* обеспечивает принятие решения о наличии того или иного эффекта в соответствии с классической процедурой Неймана-Пирсона. Другими словами, пусть ESECEZ получает от оператора задание следить за процессом  $\{\xi_i^j\}$ , где индексы  $i$  и  $j$  означают соответственно номер наблюдения и номер процесса. Переменная  $\xi_i^j$  может характеризовать содержание химического элемента, показатель качества воды, показатель экологического состояния акватории эстуария или ее части и т.п. Классическая процедура предусматривает принятие решения после регистрации конечного заранее фиксированного числа  $n$  значений  $\xi_i^j$ . Величина  $n$  задается оператором по требованию ESECEZ.

*Блок SDMP* обеспечивает решение о наличии какого-то явления в соответствии с процедурой последовательного анализа Вальда [4]. По существу процедура Неймана-Пирсона реализуется на каждом шаге функционирования экспертной системы при наблюдении за параметром  $\xi_i^j$ .

*Блок SC* обеспечивает контроль функций экспертной системы, проверяя правильность действий оператора, корректность направлений информационных потоков, согласованность параметров моделей и процедур анализа данных. В случае возникновения недоразумений оператор получает предупреждение и подсказку о его возможных действиях.

#### **Экспертная система для интеграции глобальных баз данных на основе ГИМС-технологии**

Конец двадцатого и начало текущего столетий характеризуются обострением ситуации с оценкой качества окружающей среды и прогнозными оценками последствий антропогенных воздействий на ее подсистемы в глобальных масштабах. Особенно это обострение усилилось после принятия Протокола Киото об ограничении выбросов парниковых газов. Разрешение возникающих споров о направленности тенденций развития процессов изменения окружающей среды, безусловно, связано с эффективностью систем мониторинга окружающей среды, формирование которых в последнее время тесно связано с дистанционными технологиями пассивного и активного зондирования.

Систематическое обеспечение систем дистанционного зондирования земных покровов и станций радиосвязи данными о характере экранирующего эффекта растительного покрова в фиксированный момент времени и в конкретной географической точке наряду с экспериментальными исследованиями требует развития технологии, которая позволяла бы по фрагментарной в пространстве и эпизодической во времени информации восстанавливать полную пространственную и динамическую зависимость этого эффекта от параметров окружающей среды. Создание такой технологии возможно за счет синтеза методик и алгоритмов, развиваемых в экоинформатике. Наиболее эффективными при решении подобных задач реконструкции пространственно-временных распределений параметров природно-техногенных систем оказались ГИМС-технология и эволюционное моделирование. Уже развитые в них методики и алгоритмы позволяют решать многие из указанных задач с высокой эффективностью, используя их адаптивный характер.

ГИМС является информационной системой экспертного уровня, обеспечивающей сбор, анализ и интерпретацию данных о различных объектах, явлениях и

процессах в окружающей среде, как ограниченной территории, так и в глобальных масштабах. Источниками данных для системы служат наземные стационарные и подвижные средства наблюдения за окружающей средой, а также спутниковая информация. Поступающие в систему данные анализируются в соответствии с критериями оценки их достоверности и представительности. Пользователь информируется об этих оценках и может получить от системы рекомендации относительно процедуры управления системами наблюдения. ГИМС обеспечивает оперативный комплексный синтез обновляемой базы данных о физических, химических, биологических, демографических и социально-экономических процессах на контролируемой территории и на ее основе осуществляет сервисное обслуживание через пользовательский интерфейс, обеспечивая решение следующего спектра задач:

- Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха с выделением опасных зон и прогнозом их динамики на данной территории.
- Оценка общей эпидемиологической обстановки, выявление и предупреждение о возможных негативных трендах.
- Расчет зависимостей между экологическими и социально-экономическими процессами на контролируемой территории с учетом ее взаимодействия с другими территориями.
- Контроль качества водных ресурсов региона и информационное обеспечение о пространственном распределении потоков сточных вод с идентификацией их источников.
- Слежение в режиме реального времени за уровнем воды в речных системах и прогнозирование катастрофических изменений в водном балансе региона.
- Типизация почвенно-растительных покровов и антропогенных ландшафтов с определением их роли в формировании пространственной структуры окружающей среды на территории региона.
- Прогнозирование последствий для окружающей среды контролируемой территории реализации антропогенного проекта или изменений окружающей среды за ее пределами, в том числе при изменении климатических параметров.
- Оценка динамических индикаторов биологической сложности региональной системы *Природа - Общество* как функций взаимодействия физических, химических, биологических и социальных процессов и факторов.
- Пространственно-временная реконструкция образа исследуемого объекта окружающей среды за счет применения алгоритмов интерполяции данных между измерениями, прогноз его динамики и вероятностная оценка прогноза.

ГИМС создается по формуле «ГИС+ Модель» на основе имеющейся информации о параметрах, процессах и элементах окружающей среды региона. В режиме эксплуатации происходит непрерывное обучение системы за счет критериальных оценок ее эффективности осуществлять свои функции. ГИМС оснащается типовыми моделями функционирования подсистем окружающей среды, такими как модели биогеохимических циклов углерода, азота, фосфора, тяжелых металлов, углеводородов нефти и других веществ, модели динамики почвенно-растительных формаций с детализацией типов почв и растительности. Ориентация ГИМС - технологии на решение задачи оценки пространственно – временно-го распределения характеристик экранирующего влияния растительности в задачах микроволновой радиометрии потребует расширения базы знаний и базы дан-

ных ГИМС за счет сведений о значениях этих характеристик для различных типов растительности в различных фазах ее состояния.



Рис. 8. Функциональная структура экспертной системы.

Рассмотрим одну из задач оценки окружающей среды, а именно задачу повышения достоверности прогноза содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере и связанного с этим расчета динамических характеристик земных покровов. Принципиальная структура экспертной системы представлена на рис. 8. Центральный блок управления имитационным экспериментом обеспечивает согласование информационных потоков между блоками системы, запросами пользователя и базами данных. Входными данными являются: размеры сетки дискретизации пространства по широте  $\varphi$  и долготе  $\lambda$ ; набор предметных и ситуационных идентификаторов (табл. 2) и коэффициенты уравнений. Система обеспечивает формирование гибкой структуры выходных данных, включая:

- Графическое и табличное представление зависимостей таких характеристик как  $C_A$ ,  $C_U$ ,  $C_L$ ,  $C_P$ ,  $C_F$ ,  $C_{S1}$ ,  $C_{S2}$  от времени  $t$  и пространственных координат  $(\varphi, \lambda)$ . Время и координатная сетка могут изменяться дискретно в широком диапазоне по сезонам, годам, географическим зонам и поясам.
- Обеспечивается визуализация элементов баз данных и идентификаторов с возможностью их модификации в любой момент времени.
- Пользователю предоставляется право управления пространственным распределением и биогеоценотическими параметрами почвенно-растительных форма-

ций с помощью создаваемого сценария. Процедура управления имитационным экспериментом и связанные с этим действия оператора экспертной системы включают следующие элементы и этапы подготовки данных.

- Пользователь задает пространственную сетку дискретизации пространства:  $\Delta\varphi$  - шаг по широте  $\varphi$ ,  $\Delta\lambda$  - шаг по долготе  $\lambda$  (по умолчанию  $\Delta\varphi=\Delta\lambda=5^\circ$ ). Если пользователь задает другие значения, то система запрашивает у него всю входную информацию, определяемую набором перечисленных в табл. 2 идентификаторов. При невозможности задать некоторые фрагменты данных пользователь может использовать режим пересчета хранящихся в базе данных системы сведений на заданную пространственную сетку. При этом имеется возможность коррекции частных фрагментов идентификаторов.

Таблица 2

### Идентификаторы экспертной системы

Идентификатор	Функции идентификатора
DEPTH	$\ h_{ij}\ $ - распределение глубин под водной поверхностью
FLOW	$\ R_{s,ij}\ $ - объем речного стока в Мировой океан
VOLCANO	$\ V_{ij}\ $ - размещение действующих вулканов
TEMP	$\ T_{ij}\ $ - распределение температуры приземной атмосферы, °С
PEOPLE	$\ G_{ij}\ $ - пространственное распределение плотности населения (чел./кв. км)
ANIMAL	$\ F_{ij}\ $ - пространственное распределение плотности животных (ед./ кв. км)
OCEAN	$\ O_{ij}\ $ - распределение зон Мирового океана (апвеллинги, течения, шельф, дивергенция, вихри, ледовые поля и т.п)
RAIN	$\ W_{ij}\ $ - распределение осадков
SALINITY	$\ S_{ij}\ $ - распределение солености морской воды
PHYTO	$\ \Phi_{ij}\ $ -распределение интенсивности фотосинтеза в Мировом океане
PLANTS	$\ a_{ij}\ $ - типы почвенно-растительных формаций

- В каждом пикселе поверхности  $\Omega_{ij} = \{(\phi, \lambda) : \phi_{i-1} \leq \phi < \phi_i, \lambda_{j-1} \leq \lambda < \lambda_j\}$  с площадью  $\sigma_{ij} = \sigma = k_\varphi k_\lambda \Delta\varphi \Delta\lambda$  (км<sup>2</sup>) реализуется схема распределение растительности и состояния зон поверхности Мирового океана. Здесь  $k_\varphi$  и  $k_\lambda$  - количество километров в одном градусе широты и долготы соответственно ( $k_\varphi \approx k_\lambda \approx 111$  км).

- Расчетный шаг по времени имеет двойственный смысл. Один шаг выбирается пользователем. Имеется еще расчетный шаг по времени  $\Delta t$ , который доступен

только диспетчеру системы. Этот шаг выбирается в процессе отладки системы из условия совпадения результатов моделирования, полученных при  $\Delta t$  и  $\Delta t/2$ . Точность совпадения является выходным параметром системы.

- Расчетные процедуры расчленены на два этапа: сначала осуществляется пересчет всех резервуаров углерода по одному шагу во времени от  $t$  до  $t+\Delta t$  во всех ячейках  $\Omega_{ij}$ , а затем осуществляется перемешивание атмосферы и водной среды. В зависимости от заданного пользователем шага дискретизации времени перемешивание атмосферы либо реализуется, либо она считается равномерно перемешанной (при временном шаге более трех месяцев). Перемешивание Мирового океана реализуется по схеме Тарко [5]. По умолчанию временные масштабы могут принимать размеры сезона и более.

### Экспертная система для изучения глобальных изменений

Современный этап научно-технического прогресса, сопряженный с осознанием глобальной экологической ситуации на Земле с характерной для нее ограниченностью энергетических, геологических, биогеоценологических и других ресурсов, выдвигает на первый план проблему информационного ресурса, взятого по отношению к глобальному экологическому знанию - знанию об условиях коэволюции человека и природы. Уровень этого ресурса на протяжении тысячелетий определялся слабо коррелированной суммарной деятельностью *Homo Sapiens* и вплоть до начала индустриальной эры был относительно небольшим. Затем с довольно быстрым в историческом плане приближением к ситуации, когда коммерческое отношение к биосфере стало определяющей стратегией человечества и когда стал виден экологический тупик, информационный ресурс поднялся на шкале значимости до близких к предельным значениям.

Данный ресурс включает в себя не только «академическое» знание. Любая экологическая проблема обладает «открытостью», включенностью в систему глобальных проблем современности, главная из которых состоит в сохранении гомеостаза человечества. Это означает, что возникшая и осознанная в конце двадцатого века «гроза над биосферой» поставила перед цивилизованным миром проблему выживаемости вида *Homo Sapiens*, а следовательно, проблему ответственного отношения к природе. При этом во взаимодействие вступили одновременно экологические и нравственные проблемы. Риторический вопрос - зачем живем и трудимся? - приобрел неожиданно глубокий социальный аспект и вступил в область взаимодействия с проблемами гармонии во взаимоотношениях между обществом и природой. От того, как население Земли быстро решит эти проблемы и найдет оптимальный баланс между «разумным» и «неразумным» отношением к окружающей среде, будет зависеть судьба биосферы. Причем, как показали модельные оценки в этом должно принять 90% всего человечества. Но вряд ли на данном этапе истории такая часть населения способна осознанно по своим моральным и нравственным устоям безболезненно и добровольно переключиться с позиции покорения природы на позиции развития новых гармонических взаимосвязей природы и общества. Для достижения глобальной гармонии необходима фокусировка внимания на негативных экологических и социально-экономических изменениях, чтобы экологическое знание внедрялось в практику, т.е. оно должно быть доведено до стадии конструктивных приложений в виде конкретных технологий, обеспечивающих высокое качество принятия решений в области природоохранной деятельности.

На современном этапе научно-технического прогресса в этой области ведутся интенсивные разработки, анализ которых позволяет выявить характерные особенности экологического знания и проблемы применяемых методов с тем, чтобы установить основные требования к эффективной информационной технологии. Одной из предпосылок создания систем слежения за состоянием окружающей среды послужили наличие разнокачественных данных и множества порожденных ими математических моделей различного типа (балансовых, оптимизационных, эволюционных, статистических и т.д.). Синтезированные на основе параметризации и, как правило, линеаризации закономерностей природных явлений эти модели включают широкий арсенал детерминированных и вероятностных описаний геологических, экологических, океанографических, биогеохимических и биогеоценотических процессов глобального, регионального и локального характера. Подавляющее большинство из них ориентировано на теоретическое осмысление особенностей живых систем высокого уровня с использованием имеющихся знаний и лишь малая часть нацелена на первые шаги к объективной оценке современной глобальной экологической ситуации. Отличаясь целями и математическим аппаратом описания, многие модели оказываются вынужденно грубы из-за ограниченности, неполноты и недоопределенности информационной базы, а также в силу отсутствия современных инструментальных систем в области имитационного эксперимента. Увеличение числа рассматриваемых компонентов биосферы и их связей с целью повышения адекватности изучаемых моделей, как известно, приводит к их многопараметричности, т.е. к проблеме «проклятия многомерности» [8, 13].

В качестве основного инструмента разрешения указанных особенностей ряд авторов обоснованно рассматривает метод имитационного моделирования, который позволяет осуществлять «стыковку» разнокачественных данных, относящихся к различным математическим формализмам, и снимать многопараметричность. Искомая модель строится при этом по эмпирической информации, которая не ограничена заранее рамками какого-либо математического аппарата, что обуславливает «мягкость» формализации, неизбежную в тех случаях, когда неизвестны существенные закономерности явлений. В некоторых случаях применяются генетические алгоритмы для моделирования неопределенных систем со стохастическими элементами и не имеющих единственного решения. Одним из таких алгоритмов является генетический алгоритм предсказания критерияльного ряда [7]. Также имеется множество нетрадиционных алгоритмов, базирующихся на технологии эволюционного моделирования [18] и самоорганизующихся математических моделях [21].

Развитие имитационного моделирования путем расширения информационной базы, сочетания формальных и неформальных методов в процессе поэтапного синтеза требуемой модели и, наконец, активного подключения человека к диалогу с компьютером, по мнению многих исследователей, обеспечит эффективную технологию системно-экологического моделирования. Однако уже сейчас оказывается, что положение дел не столь однозначно. В самом деле, если сопоставить имеющиеся информационные запросы в области экологических проблем и существующее информационное обеспечение их решения (различные математические и имитационные модели, принципы обработки экологической информации), то легко заметить, что не все уровни природных и антропогенных комплексов имеют развитый аппарат для своего описания, а тем более для конструирования эффективных информационных технологий с целью получения необходимых оце-

нок проблемных ситуаций. Трудности, возникающие в этой связи, имеют не только и не столько технический характер накопления моделей различного типа. Наиболее ярко эти особенности проявляются в глобальном моделировании, опыт которого показал существенную и принципиально неустранимую неполноту наших знаний о происходящих в природе процессах, которая проявляется как в фрагментарности эмпирических данных, так и в отсутствии адекватных представлений о закономерностях эволюции природных процессов. Уже сейчас ясно, что механический набор иерархий моделей и стремление к накопительству банков эмпирических данных - это попытка оживления примитивных схем рассуждений о целостной картине развития биосферных процессов без надежды на успех, без возможности объяснения способности живых систем к перманентной самоорганизации и без существенного продвижения к пониманию отлаженного механизма функционирования СПО. Ситуация такова, что необходимо применение компьютерных технологий, соединяющих методы эволюционного и имитационного моделирования, как это описано в работе [14]. Это позволит учитывать внутреннюю динамику (эволюцию) структуры моделируемых процессов и адаптивно синтезировать модели в условиях неполноты и частичной достоверности данных.

Традиционные подходы к построению глобальной модели сталкиваются с трудностями алгоритмического описания многих социально-экономических и климатических процессов, так что в результате приходится иметь дело с информационной неопределенностью. Развитые подходы к глобальному моделированию просто игнорируют эту неопределенность, в результате чего структура моделей не охватывает реальные процессы адекватным образом. Совместное использование эволюционного и имитационного моделирования позволяет устранить этот недостаток путем синтеза комбинированной модели, структура которой подвергается адаптации на основе предистории комплекса биосферных и климатических компонентов, приобретая функции экспертной системы. При этом реализация модели также может быть комбинированной в разных классах моделей, с использованием программных средств на традиционных компьютерах и спецпроцессорах эволюционного типа. Форма такого комбинирования многообразна и зависит от пространственно-временной полноты глобальных баз данных.

Накопленный опыт глобального моделирования изобилует примерами непреодолимых трудностей при попытке найти способы описания научно-технического прогресса и человеческой деятельности в различных ее проявлениях. Не меньшие сложности возникают при моделировании климата, характеризующегося суперпозицией процессов с различными временными темпами изменчивости. Что касается полноты описания в глобальной модели, то и здесь невозможно четко очертить пределы информационной обеспеченности и границы необходимой пространственной и структурной детализации. Поэтому, не углубляясь в натурфилософский анализ глобальных проблем и не стараясь дать исчерпывающий рецепт для глобального моделирования, обсудим лишь один из возможных путей, отражающих каким образом эволюционное моделирование в спецпроцессорной реализации позволяет преодолеть упоминавшиеся выше трудности.

Настройка эволюционной модели по предистории природных ритмов позволяет получить модель, которая неявно отслеживает различные закономерности динамики СПО в прошлом и дает возможность прогноза в том же временном ритме. Спецпроцессорный вариант модели полностью снимает все затруднения алгоритмического и вычислительного характера, возникающие из-за большой раз-

мерности глобальной модели и наличия множества параметрических неопределенностей.

Ясно, что полностью преодолеть противоречия между потребностями исследователей и моделями СПО невозможно из-за недостаточности информации о закономерностях функционирования элементов окружающей среды и человеческого общества. Поэтому и возникло огромное количество типов моделей, каждая из которых отвечает определенному уровню требований адекватности. Наиболее распространенными являются малоразмерные модели, в основном базирующиеся на эмпирических зависимостях. Среди успешно применяемых подходов к преодолению информационных неопределенностей являются нейронные сети, которые аналогично эволюционному моделированию позволяют синтезировать модели в условиях, когда соотношения между характеристиками систем окружающей среды плохо известны. Другими словами, нейронные сети позволяют устанавливать связь между причинами и следствиями без написания уравнений. Конечно, потери в точности моделирования изучаемого процесса с помощью нейронных сетей происходят не по причине неадекватности параметрического описания, а из-за других входных предположений о характеристических функциях нейронных сетей. Например, Aitkenhead и др. [6] испробовали функцию активации  $y$  в форме кривой с насыщением:  $y = 1/[1 + \exp(-cx)]$ , где  $x$  – входная переменная. Подход, основанный на нейронных сетях, позволил для небольшого горного потока Brocky Burn (длиной 2,7 км) на северо-востоке Шотландии получить более 50% предсказаний с точностью до 10% и свыше 90% прогнозов внутри интервала точности до 30%. Этот локальный пример подтверждает эффективность моделей, основанных на нейронных сетях, для синтеза некоторых блоков ГМСПО, имеющих высокую степень функциональной неопределенности, но располагающих рядами наблюдений за динамикой их характеристик.

Синтез ГМСПО основывается на представлении о ней, как о самоорганизующейся и самоструктурирующейся системе, согласованность действий элементов которой во времени и пространстве обеспечивается процессом естественной эволюции. Антропогенная составляющая в этом процессе направлена на нарушение этой целостности. Попытки параметризовать на формальном уровне процесс коэволюции природы и человека, как элементов биосферы, связаны с поиском единого описания всех процессов в СПО, которое бы объединяло усилия различных отраслей знания в познании окружающей среды. Такое синергетическое начало лежит в основе многих работ по глобальному моделированию.

Синтез глобальной модели, как элемента экспертной системы, требует выбора сетки пространственной дискретизации климатических, биосферных и антропогенных процессов. Обычно принимается равномерная географическая сетка с шагами  $\Delta\varphi$  по широте и  $\Delta\lambda$  по долготе. Удобство такого выбора связано с упрощением процесса вычислений, но приводит к потере данных, избыточности и вызывает трудности согласования накопленных знаний с имеющимися глобальными базами данных. Одна из первых попыток отражения в модели пространственной неоднородности СПО была предпринята в работе [12], где пространство СПО было разделено на атмосферу, Мировой океан и два региона суши. Принято, что на вход СПО поступает энергия солнечной радиации и невозобновимые минеральные ресурсы. Энергия Солнца используется фотосинтезирующими элементами биосферы (фитопланктон и растения). Поток этой энергии регулируется замутненностью атмосферы, формируемой естественными и антропогенными

процессами. Прозрачность атмосферы определяется количеством пылевых частиц, находящихся в атмосфере в результате пыльных бурь, извержений вулканов, сжигания твердого и жидкого видов топлива, поступающих из дымовых труб различных металлургических и химических предприятий, цементных заводов и других производств, а также из-за формирования облаков.

Численные расчеты с помощью первого варианта ГМСПО показали, что существует точка равновесия, обеспечивающая баланс сил взаимодействия между двумя регионами суши. Этот результат вызвал необходимость дальнейшей дискретизации территории суши, что было реализовано в работе [3]. В результате было обнаружено, что принятая схема взаимодействия человека и окружающей среды (взаимного влияния экологических и производственных процессов) является классическим примером гермейеровской системы. В самом деле, нарушение равновесия биоты или необратимое изменение климата, выведет все человечество из области гомеостаза, условие которого можно сформулировать в терминах показателей качества среды. Следовательно, какой бы ни был контингент субъектов рассматриваемой СПО, среди критериев, которыми определяются субъективные решения, всегда присутствует критерий, общий для всех субъектов (регионов, государств или их групп). Одним из таких критериев является выживаемость всего человечества.

Поскольку в настоящее время естественно постулировать тезис Вернадского – “ни один живой вид не может существовать в среде, состоящей из своих отбросов”, – то мы не будем обсуждать возможности создания полностью искусственной среды обитания всего населения Земли. Все же, кажется, что необходимо постулировать стремление сохранить устойчивость окружающей среды, сохранить гомеостазис, общий для всех субъектов СПО, описывающий совместное функционирование природы и человека. Но для гермейеровской системы становится оправданным рассмотрение задачи поиска устойчивых коллективных решений, принадлежащих множеству Паретто. К сожалению, последние международные форумы по проблеме устойчивого развития не следуют по этому пути, т.е. не ставят задачу синтеза ГМСПО, способной подсказывать пути поисков допустимых решений в процессах взаимодействия производственной деятельности людей и окружающей среды. Ярким отрицательным примером этого является уже неоднократно обсужденный Протокол Киото, хотя вопрос о парниковом эффекте, обусловленном углекислым газом, с каждым годом становится все более актуальным.

Одна из причин наблюдающегося разрыва между предложениями ученых и решениями политиков состоит в отсутствии международной программы, которая бы объединяла их и приводила бы к принятию научно-обоснованных критериев оценки тенденций развития СПО и ее отдельных элементов. Именно по этой причине продолжается наращивание глобальных баз данных без необходимого методического обеспечения.

Как уже отмечалось, существующие трудности синтеза глобальной модели СПО в основном лежат в области параметризации энергетических потоков на границах *атмосфера-суша* и *атмосфера-океан*. Благодаря серии недавних работ возникла возможность совместного использования моделей климата и биосферы. Модели SiB1 и SiB2 ориентированы на описание энергетического и теплового баланса земной поверхности. В этих моделях процессы фотосинтеза и эвапотранспирации параметризуются с учетом физиологии растений и локальных условий формирования растительного покрова. Важным также является то, что

этот тип глобальных моделей ориентирован на оценку их параметров в режиме спутникового мониторинга. Начиная с 1987 г. с помощью ряда спутников серии NOAA и использования радиометров высокого разрешения AVHRR создается глобальный ряд NDVI по географической сетке  $1^\circ \times 1^\circ$  с месячным усреднением. Также формируются данные о типах почв, видах растительности, поглощенной радиации, альбедо, облачности, влажности почв и т.п. Но эти базы данных имеют лишь экспертное обоснование.

И, наконец, одним из возможных блоков глобальной модели, имитирующих глобальную социально-экономическую структуру, может быть the модель ICLIPS (Integrated Assessment of Climate Protection Strategies) [15]. Эта модель делит экономическое сечение СПО на 11 регионов:

- Страны OECD
- Подсахарная Африка;
- Китай, Монголия, Вьетнам, Комбоджа, Лаос;
- Восточная Европа;
- Бывший Соверский Союз;
- Латинская Америка и страны Карибского бассейна;
- Средний Восток и Северная Африка;
- Северная Америка;
- Страны OECD в зоне Тихого океана (Япония, Австралия, Новая Зеландия);
- Южная Азия (главным образом Индия);
- Западная Европа.

Как уже неоднократно отмечалось, что внимание к проблеме углекислого газа и другим малым газовым составляющим атмосферы вызвано в основном беспокойством ученых, экономистов и политиков возможными последствиями из-за ожидаемого изменения климата. Поскольку сжигание ископаемого топлива и обезлесивание поверхности суши являются наиболее значимыми источниками антропогенного возрастания концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в атмосфере, то именно эти газы изучаются наиболее внимательно. Оба эти газа поглощают инфракрасное излучение земной поверхности и поэтому воздействуют на планетарный климат. Возникшая в конце XX столетия перед политиками задача уменьшения этого воздействия нашла не наилучшее решение в виде Протокола Киото. На самом деле реальное и объективное решение этой задачи лежит в глубоком изучении биогеохимических круговоротов всех газов, так или иначе связанных с круговоротом углерода. Именно на таком подходе сосредоточено внимание Проекта GCP (The Global Carbon Project), который нацелен на комплексный анализ имеющихся данных о круговороте углерода в окружающей среде и на проведение необходимых измерений. Проект объединяет усилия Международной геосферно-биосферной программы (IGBP), Международной программы по изучению человеческого фактора в глобальном изменении окружающей среды (IHDP) и Всемирной программы изучения климата (WCRP). Круговорот углерода рассматривается как центральный круговорот земной системы, связанный с климатом, круговоротом воды, круговоротами биогенных солей и производством биомассы за счет фотосинтеза на суше и в океанах. Участие человеческого фактора в круговороте углерода определяется факторами производства пищи и формирования условий среды обитания.

Синтез ГМСПО основывается на представлении о ней, как о самоорганизующейся и самоструктурирующейся системе, согласованность действий элементов

которой во времени и пространстве обеспечивается процессом естественной эволюции. Антропогенная составляющая в этом процессе направлена на нарушение этой целостности. Попытки параметризовать на формальном уровне процесс коэволюции природы и человека, как элементов биосферы, связаны с поиском единого описания всех процессов в СПО, которое бы объединяло усилия различных отраслей знания в познании окружающей среды. Такое синергетическое начало лежит в основе многих работ по глобальному моделированию.

Глобальное моделирование относится к вполне осознанному, хотя не всегда признаваемому, областям знания, об экспансии которого в нетрадиционные сферы человеческого бытия в последние десятилетия написано много работ. Несмотря на имеющиеся разногласия о роли моделей в изучении СПО нельзя отрицать того факта, что именно модель позволяет избежать непредсказуемых последствий реализации крупномасштабных экспериментов по преобразованию окружающей среды, обеспечивая синтез единого образа NSS на базе фрагментов окружающей среды. Дальнейшее совершенствование уже созданных глобальных моделей невозможно без преодоления двойственности антропогенной составляющей в современной экодинамике. Ведь человек, являясь элементом окружающей среды, свое поведение формирует на основе реакции на им же изменяемую окружающую среду. Поэтому параметризация социальных процессов является первостепенной задачей дальнейшего развития глобальной модели.

Сочленение в рамках глобальной модели блоков, описывающих протекание различных процессов в СПО, требует развития гибкой технологии согласования их пространственных и временных шкал, что в свою очередь вызывает необходимость синтеза предметно ориентированных баз данных. В результате структура глобальной модели должна допускать развитие без изменения уже сформированной иерархии блоков. Это возможно при внедрении семантических механизмов адаптации структуры модели к изменяющимся описаниям конфигурации связей в СПО. В работе [14] показана примерная схема организации такой структуры, где роль синтезирующего механизма играет базовая информационная магистраль, программное обеспечение которой создает среду согласования входов и выходов отдельных блоков с контролем их совместимости, как между собой, так и с базой данных.

Намеченные программой GCP измерения и исследования глобальных процессов в окружающей среде нацелены на преодоление трудностей, которые возникают в глобальном моделировании и при попытках адаптировать уже накопленные данные и знания к структурам имеющихся глобальных моделей. Одним из возможных путей решения возникающих здесь задач является ГИМС-технология, которая позволяет использовать глобальную модель в режиме постоянной ее адаптации к текущим данным глобального мониторинга окружающей среды, обеспечивая таким образом совместную параметризацию пространственной и временной вариабельности биосферных и геосферных процессов с процедурой планирования измерений.

На рис. 9 представлена блок-схема глобальной модели, которая встраивается в структуру ГИМС через блок DAT, который управляет интерфейсом между другими блоками модели и базой данных, обновляемой в режиме мониторинга. При этом блок CON настраивает информационную среду глобальной модели и ее внутренние связи на условия имитационного эксперимента и обеспечивает контроль согласованности информационных потоков между блоками модели. Блок REP формирует отчетные документы имитационного эксперимента и обеспечива-

ет связь глобальной модели с другими информационными системами. Все остальные блоки глобальной модели разделены на два класса, отличающихся технологиями моделирования. К блокам, реализующим технологию эволюционного моделирования относятся блоки, параметризующие демографические (DEM) и климатические процессы (CLI), создающие сценарии управления минеральными ресурсами (MRE) и развития научно-технического прогресса (STR), а также моделирования производства сельско-хозяйственной продукции (AGR). Блоки, реализующие динамические модели, основаны на реализации балансовых соотношений. Блоки, параметризующие глобальные биогеохимические циклы, охватывают все фазовое пространство СПО. Здесь модели глобального круговорота углерода (GCDC), серы (GSC), фосфора (MGPC), азота (MGNC), кислорода и озона (MGOC) и общих загрязнителей (POL). Для описания совокупности процессов в гидросфере в структуру глобальной модели включены блоки, описывающие гидродинамические процессы (HYD) и функционирование водных экосистем в различных климатических зонах (BIO). В структуре глобальной модели отдельно выделены экосистемы Охотского моря (MOSE), Перуанского течения (MPCE) и экваториального апвеллинга (MAE). Для расширения адаптационных возможностей глобальной модели в структуре многих блоков предусмотрены различные варианты параметрических описаний процессов в NSS.

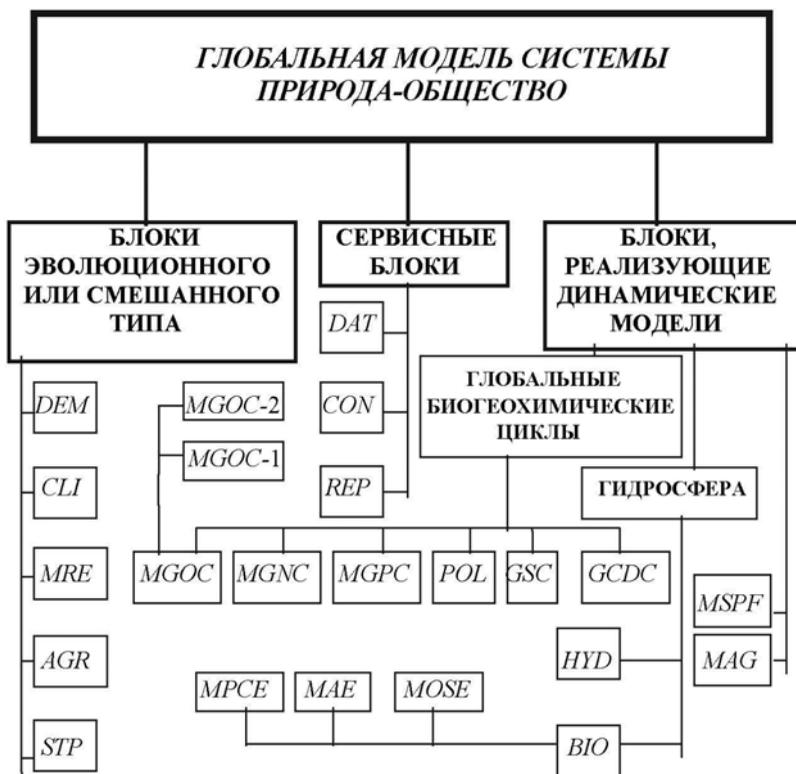


Рис. 9. Блок-схема глобальной модели системы Природа-Общество.

На схеме рис. 9 отражены основные элементы, учитываемые в описываемой здесь ГМСПО. Как видно из рис. 9 конкретная реализация каждого блока ГМСПО определяется уровнем знания отраженных в нем процессов. Так блоки, отвечающие за моделирование биогеохимических и биогеоценологических процессов, описываются дифференциальными уравнениями. Безусловно, что в этой иерархии глобальных процессов необходимо расширить описание социально-технологической части современного общества, отразив совокупность его целевых критериев. Пути возможной параметризации поведенческих процессов в современном обществе, в большинстве своем стремящемся к наиболее энергетически комфортному состоянию, описаны в монографиях [1, 2].

Параметризация процессов фотосинтеза, отмирания и дыхания растений в наземных экосистемах осуществляется с учетом внешних и внутренних системных связей растительного сообщества. Сюда относятся температурные зависимости фотосинтеза и эвапотранспирации растений, обменные газовые процессы между растениями и атмосферой, воздействие энергии солнечной радиации на обменные и ростовые процессы, соотношения между растительностью и почвенными процессами, взаимодействие растительных покровов с гидрологическим циклом.

Параметризация климатических и антропогенных процессов осуществляется смешиванием уравнений движения и баланса с эволюционной моделью.

### Литература

1. Гринченко С.Н. Метаэволюция систем неживой, живой и социально-технологической природы. М.: ИПИ РАН, 2007. – 456 с.

2. Гринченко С.Н. Системная память живого. М.: Мир, 2004. – 512 с.

3.. Крапивин В.Ф., Кондратьев К.Я. Глобальные изменения окружающей среды: экоинформатика. Санкт-Петербург: Изд-во С-Пб гос. ун-та, 2002. - 724 с.

4. Суков А.И., Солдатов В.Ю. Процедура принятия решения в задачах выбора между конкурирующими гипотезами. Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. Серия: инженерная экология. – 2007. - Вып. IV. - С. 41-49.

5. Тарко А.М. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. М.: Физматлит, 2005. - 232 с.

6. Aitkenhead M.J., McDonald A.J.S., Dawson J.J. et al. A novel method for training neural networks for time-series prediction in environmental systems. Ecological Modelling. – 2003. - Vol. 162. - P. 87-95.

7. Anderson R.P., Lew D., Peterson A.T. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models. Ecological Modelling. – 2003. - Vol. 162, No. 3. - Pp. 211-232.

8. Cracknell A.P., Varotsos C.A., Krapivin V.F. Problems of Global Climatology and Ecodynamics: Anthropogenic Effects on the State of Planet Earth. Chichester, UK: Springer/PRACTIS, 2008. - 450 pp.

9. Krapivin V.F., Varotsos C.A. Biogeochemical Cycles in Globalization and Sustainable Development. Chichester: Springer, 2008. - 562 pp.

10. Krapivin V.F., Mkrtychyan F.A. Expert system for the operative environmental diagnostics. Proc. of the 21<sup>st</sup> Int. Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu, Hokkaido, 19-24 February 2006. - Pp. 128-131.

11. Krapivin V.F., Varotsos C.A. Globalization and Sustainable Development: Environmental Agendas. Chichester: Springer, 2007. - 304 pp.

12. Krapivin V.F. Mathematical model for global ecological investigations. *Ecological Modelling*. - 1993. - Vol. 67, No. 2-4. - Pp. 103-127.
13. Krapivin V.F., Kelley J.J. Model-based method for the assessment of global change in a nature/society system. In: A.P. Cracknell, C.A. Varotsos, and V.F. Krapivin (eds.) *Problems of Global Climatology and Ecodynamics: Anthropogenic Effects on the State of Planet Earth*. Chichester, UK: Springer/PRAXIS, 2008. - Pp. 267-289.
14. Krapivin V.F., Varotsos C.A., Soldatov V.Yu. *New Ecoinformatics Tools in Environmental Science: Applications and Decision-making*. Springer, London, U.K., 2015. 903 pp.
15. Leimbach M., Toth F.L. Economic development and emission control over the long term: the ICLIPS aggregated economic model. *Climate Change*. – 2003. - Vol. 56, No. 1-2. - Pp. 139-165.
16. Mkrtychyan F.A., Krapivin V.F., Kovalev V.I. et al. An adaptive spectro-ellipsometric technology for the precise real-time monitoring of the water systems. *Proceedings of the First Workshop "Environmental Informatics and Education"*, HoChiMinh City, 23-26 June 2006, Institute of Environment and Resource. - Pp. 124-130.
17. Mkrtychyan F.A. Krapivin V.F., Kovalev V.I. et al. Spectroellipsometric adaptive identifier for ecological monitoring of the aquatic environment. *Proceedings of the 22th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice*, 18-23 February 2007, Mombetsu, Hokkaido, Japan. - Pp. 30-33.
18. Nitu C., Krapivin V.F., Pruteanu E. *Ecoinformatics: Intelligent Systems in Ecology*. Bucharest: Magic Print, 2004. - 411 pp.
19. Shahin M. *Water Resources and Hydrometeorology of the Arab Region*. Berlin: Springer, 2007. - 586 pp.
20. Sharad K.J., K.A. Pushpendra, Vijay P.S. *Hydrology and Water Resources of India*. Berlin: Springer, 2007. - 1262 pp.
21. Timoshevskii A., Yerevin V., Kalkuta S. New method for ecological monitoring based on the method of self-organising mathematical models. *Ecological Modelling*. – 2003.- Vol. 162, No. 2-3. - Pp. 1-13.