

*Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2004, №9, с.2-15*

УДК 335.58;358.238; 502.552(075.84); 614.8

## **ПРОБЛЕМЫ МОНИТОРИНГА И ПРЕДСКАЗАНИЯ ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ**

**В.Г. Бондур<sup>1</sup>, К.Я. Кондратьев<sup>2</sup>, В.Ф. Крапивин<sup>3</sup>, В.П. Савиных<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> *Научный центр проблем аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС»  
Минобразования и науки и РАН, Москва.*

<sup>2</sup> *Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН /Научно-  
исследовательский центр по окружающей среде и дистанционному мониторингу им.  
Нансена, Санкт-Петербург.*

<sup>3</sup> *Институт радиотехники и электроники РАН, Москва.*

<sup>4</sup> *Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва.*

Анализируются проблемы прогнозирования природных катастроф и синтеза систем мониторинга окружающей среды, обеспечивающих сбор, хранение и обработку необходимой информации для их решения. Предлагается трех-уровневая процедура принятия решений о появлении признаков природной катастрофы, основанная на расчете соответствующих индикаторов и математической модели процессов в окружающей среде.

## **THE PROBLEMS OF MONITORING AND FORECASTING OF NATURAL CATASTROPHES**

**V.G. Bondur, K.Ya. Kondratyev, V.F. Krapivin, and V.P. Savinykh**

*Scientific Center of Aerospace Monitoring Problems "AEROCOSMOS", Moscow.*

*Research Center for Ecological Safety, Russian Academy of Sciences/ Nansen International  
Environmental and Remote Sensing Center, Sankt-Petersburg.*

*Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Moscow.*

*Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow.*

The problems of natural catastrophes forecasting and of synthesis of environmental monitoring systems giving possibility to receive, store and process the necessary information for their solution are analysed. Three-level procedure is proposed for the decision making about the natural catastrophe appearance. It is based on the evaluation of relative indicators and mathematical model of the environment.

## ВВЕДЕНИЕ

С развитием цивилизации все более актуальной становится проблема прогнозирования масштабности ожидаемых изменений окружающей среды и связанных с ними изменений среды обитания человека. В первую очередь речь идет о возникновении и распространении опасных природных явлений, приводящих к гибели живых существ и причиняющих человеку серьезный экономический ущерб [1, 4-15, 18-21]. Такие явления получили название природных катастроф. Известно, что в историческом плане природные аномалии различного пространственного и временного масштабов играли важную роль в эволюции природы, вызывая и активизируя механизмы регуляции природных систем. Частным примером подобного рода могут служить лесные пожары [7]. С развитием промышленности и возрастанием плотности населения эти механизмы претерпели значительные изменения и приобрели угрожающий жизни характер [13,15, 18]. Это в первую очередь связано с нарастанием и распространением амплитуды антропогенных возмущений в окружающей среде. Многочисленные исследования возникающих здесь проблем, проведенные за последние годы [1, 4-15, 18-41], показали, что частота катастрофических явлений в природе и их масштабность увеличиваются (рис. 1), приводя к возрастанию риска больших потерь в экономике и человеческих жизней, а также к нарушениям социальной инфраструктуры. Так, например, только в 2001 г. в мире произошло около 650 природных катастроф, унесших жизни более 25 тыс. человек и причинивших экономический ущерб более 35 млрд. долларов. Такого рода показатели во многом зависят от готовности территории к сокращению риска потерь и существенно изменяются во времени. Например, уже в 2002 г. при сохранении числа значительных катастроф на уровне 700 погибло 11 тыс. человек при экономическом ущербе 55 млрд. долларов. Наибольшие потери вызывают наводнения. Для пространственного распределения катастроф типична сильная неоднородность и, например, по числу человеческих жертв в 2002 г. характеризуется следующими показателями: Африка – число катастроф 51 (погибло 661 человек), Америка – 181 (825), Азия – 261 (8570), Австралия и Океания – 69 (61), Европа – 136 (459) [28].

Природные катастрофы можно разделить на различные категории. К крупным масштабным катастрофам относятся явления в окружающей среде, приводящие к гибели тысяч людей и разрушению жилищ с существенным для данного региона экономическим ущербом. Отсюда, конечно, следует, что шкала масштабности

природных катастроф зависит от уровня экономического развития региона, определяющего степень защищенности населения от катастрофических природных явлений. Поэтому изучение феноменов, связанных с природными катастрофами, должно сопровождаться анализом уровня бедности населения данного региона. Результаты исследований, накопленные за последние 25 лет, показывают, что в слабо развитых странах зависимость потерь от природных катастроф существенно выше, чем в экономически развитых регионах. Если учесть, что за последнее десятилетие число и масштабность природных катастроф возросли примерно в 5 раз, а их опасность – в 9 раз, то становится ясным, какие опасности ожидают население этих стран в ближайшем будущем. Поэтому прогноз и предупреждение кризисных явлений в целом по земному шару должно быть предметом озабоченности всех стран, независимо от их экономического развития.

В настоящее время хорошо развиты теория катастроф и анализ рисков [15, 21]. Их применение к описанию событий и процессов в реальном окружающем пространстве требует исследования методов системного анализа для синтеза глобальной модели системы «Природа-Общество» (СПО) с привлечением технических средств спутникового мониторинга. Решением возникающих здесь проблем занимается экоиформатика, которая обеспечивает совмещение аналитических простых, полуэмпирических и сложных нелинейных моделей экосистем с обновляемыми глобальными базами данных [30]. Многие международные и национальные программы изучения окружающей среды, имея определенную проблемную и пространственную ориентацию, в последнее время повысили уровень тематической координации, чтобы достичь необходимого уровня эффективности. Примером такой координации являются программы Global Carbon Project (GCP) и Earth Observing System (EOS), в рамках которых сосредоточены наиболее эффективные информационные и технические средства оценки и прогнозирования динамических характеристик СПО.

Развитие конструктивных методов прогнозирования природных катастроф требует решения ряда проблем:

- Адаптация методов экоиформатики применительно к проблеме диагностики и прогнозирования природных катастроф во всем их многообразии и масштабности.
- Формирование статистических характеристик природных катастроф в их историческом аспекте, выделяя категории и определяя пространственные и временные масштабы катастрофических изменений среды обитания живых существ. Анализ

исторического катастрофизма важен для понимания современных зависимостей между кризисами в природе и обществе. Статистические характеристики природных катастроф в их динамике позволяют сформулировать базовые положения математической теории катастроф и определить приоритетные направления исследований.

- Развитие концепции и синтез модели живучести с целью ее использования для оценки влияния природных катастроф на среду обитания человека.
- Изучение закономерностей взаимодействия различных элементов и процессов в глобальной СПО во взаимосвязи с таким емким понятием, как биологическая сложность экосистем (биосложность), рассматривая ее как функцию биологических, физических, химических, социальных и поведенческих взаимодействий подсистем окружающей среды, включая живые организмы и их сообщества. Понятие биосложности связывается с закономерностями функционирования биосферы как единства образующих ее экосистем и природно-хозяйственных систем различного масштаба, от локального до глобального. В связи с этим необходимо дать совместное формализованное описание биологических, геохимических, геофизических и антропогенных факторов и процессов, происходящих на данном уровне пространственно-временной иерархии шкал и масштабов. Важно также оценить возможности использования различных индикаторов приближения природной катастрофы, таких, например, как биосложность.
- Исследование взаимосвязей между живучестью, биосложностью и эволюцией СПО с привлечением технологии глобального моделирования. Создание блоков глобальной модели, описывающих закономерности и тенденции в окружающей среде, которые приводят к возникновению стрессовых ситуаций и инициируются хозяйственной или политической активностью человека.
- Рассмотрение демографических предпосылок возникновения природных катастроф и выявление механизмов регуляции природной среды, препятствующие реализации этих предпосылок.
- Оценки информативности существующих технических средств сбора данных о состоянии подсистем СПО и имеющихся глобальных баз данных с целью определения их места в решении задач оценки условий возникновения стрессовых ситуаций в окружающей среде.

## ПРИРОДНАЯ КАТАСТРОФА КАК ДИНАМИЧЕСКАЯ КАТЕГОРИЯ ЯВЛЕНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Как справедливо заметил Walker [40], понятие природной катастрофы является весьма расплывчатым и его определение зависит от многих факторов. Григорьев и Кондратьев [4] определяют природную катастрофу как «чрезвычайную и бедственную ситуацию в жизнедеятельности населения, вызванную существенными неблагоприятными изменениями в окружающей среде», или «как скачкообразные изменения в системе, возникающие в виде ее внезапного ответа на плавные изменения внешних условий». Количество таких критических ситуаций в окружающей среде возрастает. В настоящее время к природным катастрофам относятся наводнения, засухи, тропические циклоны, ураганы, штормы, торнадо, цунами, извержения вулканов, оползни, обвалы, сели, снежные лавины, землетрясения, лесные пожары, пылевые бури, сильные морозы, жара, эпидемии, нашествия саранчи и многие другие природные явления [4, 15, 18-27, 35, 40]. В будущем, этот перечень может расшириться за счет возникновения новых видов природных катастроф, таких как столкновения с космическими телами и порожденных человеком – биотерроризм, ядерные катастрофы, резкое изменение магнитного поля земли, чума, нашествие роботов, и т.п. Поэтому важно разработать эффективные количественные технологии и критерии, которые предупреждали бы с высокой надежностью о появлении опасного катастрофического природного явления.

Понятие природной катастрофы многими авторами ассоциируется с понятием экологической безопасности, которое возникло в связи с необходимостью оценки опасности для населения какой-то территории получить ущерб для здоровья, сооружений или имущества в результате изменений параметров окружающей среды. Эти изменения могут быть вызваны как естественными, так и антропогенными причинами. В первом случае опасность возникает за счет флуктуаций в природных процессах, связанных с изменением экологической обстановки, возникновением эпидемии или за счет стихийного бедствия. Во втором случае опасность появляется как реакция природы на действия человека. Например, Gardner [27], анализируя изменения природной среды в Гималаях на территории Индии, пришел к выводу, что такие факторы, как обезлесивание и изменение растительного покрова стали возбудителями и усилителями нестабильностей в этом регионе, характеризующихся деградацией

земельных ресурсов и возрастанием последствий разрушения природной среды за счет водных потоков. Field и Raupach [25] и Abrahamson [19] связывают изменение закономерностей появления природных катастроф с нарастанием нестабильности в системе *углерод-климат-человек*. Согласно [26], подобная нестабильность может в значительной степени усилиться в ближайшие два десятилетия за счет изменения многих характеристик экосистем Мирового океана. Milne [2, 34], анализируя историю различных крупных катастроф, приходит к пессимистическому прогнозу относительно судьбы всего человечества, используя понятие «день страшного суда».

В общем случае возникновение экологической опасности на данной территории является следствием отклонения параметров среды обитания человека за пределы, где при длительном пребывании живой организм начинает изменяться по направлению не соответствующему естественному процессу эволюции. По своему существу понятия «экологическая опасность» или «экологическая безопасность» связаны с понятиями устойчивости, живучести и целостности биосферы и ее элементов [4, 8, 29, 30]. Более того, СПО, являясь самоорганизующейся и самоструктурирующейся системой и развиваясь по законам эволюции, создает внутри себя совокупности экологических ниш, степень приемлемости которых для населения данной территории определяется, как правило, национальными критериями (совокупность ПДК, религиозные догмы, национальные традиции и т.п.).

При рассмотрении перспектив жизнеобитания на Земле необходимо исходить из общечеловеческих критериев оценки уровней деградации окружающей среды, так как с течением времени локальные и региональные изменения в окружающей среде переходят в глобальные. Амплитуды этих изменений определяются механизмами функционирования СПО, которые обеспечивают оптимальность изменения ее элементов. Человечество все больше и больше отклоняется от этой оптимальности в своей стратегии взаимодействия с окружающими его косными, абиотическими и биотическими компонентами природной окружающей среды. Но в тоже время человеческое общество как элемент СПО осознанно пытается понять характер крупномасштабных взаимоотношений с природой, направляя на это усилия многих наук и изучая причинно-следственные связи в этой системе [8].

Среда обитания человека является сложной динамической системой. Ее устойчивость во времени связана с постоянством структуры, вещественного состава и энергетического баланса, а также со стабильностью ее реакций на одни и те же

внешние воздействия. Нарушение устойчивости системы может быть следствием воздействия как пассивных, так и активных внешних сил. Другими словами, в современных условиях природа  $N$  и человеческое общество  $H$ , составляя единую планетарную систему и имея иерархические структуры  $(|N|, |H|)$ , взаимодействуют, преследуя свои цели  $(\underline{N}, \underline{H})$ . С формальной точки зрения это взаимодействие можно рассматривать как случайный процесс  $\eta(x, t)$  с неизвестным законом распределения, представляющим уровень напряженности во взаимоотношениях подсистем  $N$  и  $H$  или оценивающий состояние одной из них. Здесь  $x = \{x_1, \dots, x_n\}$  – набор идентификационных характеристик подсистем  $N$  и  $H$ , являющихся компонентами возможного индикатора возникновения природной катастрофы, т.е. отклонения  $\eta(x, t)$  за пределы, где состояние подсистемы  $N$  становится угрожающим для  $H$ . Отсюда следует, что цели и поведения подсистем  $N$  и  $H$  являются функциями показателя  $\eta$ , в зависимости от которого их поведения могут быть антагонистическими, индифферентными или кооперативными. Основная цель подсистемы  $H$  состоит в достижении высокого жизненного уровня с гарантией долговременного выживания в комфортных условиях. Цель и поведение подсистемы  $N$  определяется объективными законами коэволюции (следует обратить внимание в этом контексте на концепцию биотической регуляции окружающей среды [10, 31]). В этом смысле разделение  $N$  и  $H$  является условным и его можно интерпретировать как разделение множества природных процессов на управляемые и неуправляемые. Ясно, что с ростом плотности населения природные катастрофы будут усиливать ощущение неконфортности, воздействуя на социальные и культурные условия многих регионов.

Не углубляясь в философские аспекты этого разделения, будем считать подсистемы  $N$  и  $H$  симметричными в смысле данного выше их описания и открытыми. При этом система  $H$  располагает технологиями, наукой, экономическим потенциалом, промышленным и сельско - хозяйственным производствами, социологическим устройством, численностью населения и т.д. [12]. Процесс взаимодействия систем  $N$  и  $H$  приводит к изменению  $\eta$ , уровень которого влияет на структуру векторов  $\underline{H}$  и  $\overline{H}$ . В самом деле, существует порог  $\eta_{\max}$ , за пределами которого человечество перестает существовать, а природа выживает. Несимметричность подсистем  $N$  и  $H$  в этом смысле вызывает изменение цели и стратегии системы  $H$ . Повидимому, в современных условиях взаимодействия этих систем  $\eta \rightarrow \eta_{\max}$  довольно быстрыми темпами, а потому



отдельные компоненты вектора  $\underline{H}$  можно отнести к классу кооперативных. Поскольку современная социально-экономическая структура мира представлена совокупностью государств, то в качестве функционального элемента системы  $N$  разумно рассматривать страну. Функция  $\eta(x, t)$  отражает результат взаимодействия стран между собой и с природой. Совокупность результатов этих взаимодействий можно описать матрицей  $B = || b_{ij} ||$ , каждый элемент которой несет символическую смысловую нагрузку:

$$b_{ij} = \begin{cases} + \text{ при кооперативном поведении;} \\ - \text{ при антагонистических взаимоотношениях;} \\ 0 \text{ при индифферентном поведении.} \end{cases}$$

Изучению закономерностей взаимодействия сложных систем различной природы посвящены многие теории. В рассматриваемом здесь несимметричном случае речь идет о выживании системы  $N$  и попытке найти способ оценки будущей динамики системы  $N$ . Согласно [14], рефлексивное поведение  $N$  поможет в конечном счете человечеству найти технологию поведения, способную «соизмерять выгоды и опасность, понимать принципиальные ограничения наших возможностей и своевременно осознавать новые угрозы».

## **ГЛОБАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СПО КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ**

В связи с различными аспектами изменения окружающей среды в последние десятилетия многими авторами выдвинуты многочисленные концепции глобального описания СПО и созданы модели различной сложности для параметризации динамики характеристик биосферы и окружающей среды [6]. Наличие большой информационной базы об этих характеристиках позволяет рассматривать и оценивать последствия возможной реализации различных сценариев развития подсистемы  $N$ . Традиционные подходы к синтезу глобальных моделей основаны на рассмотрении совокупности балансовых уравнений, в которые параметры  $\{x_i\}$  входят в форме функций, аргументов, коэффициентов и условий перехода между параметрическими описаниями процессов окружающей среды. Применяются также и другие подходы, использующие эволюционные и нейросетевые алгоритмы [30]. Организация глобальной модели функционирования системы  $N \cup H$  может быть представлена в виде концептуальной схемы рис. 2. Реализация этой схемы осуществляется введением географической сетки  $\{\varphi_i, \lambda_j\}$  с шагами дискретизации поверхности суши и Мирового океана  $\Delta\varphi_i$  и  $\Delta\lambda_j$  по

широте и долготе соответственно, так что внутри пикселя  $\Omega_{ij} = \{(\varphi, \lambda): \varphi_i \leq \varphi \leq \varphi_i + \Delta\varphi_i, \lambda_j \leq \lambda \leq \lambda_j + \Delta\lambda_j\}$  все процессы и элементы СПО считаются однородными и параметризуются точечными моделями. Выбор размеров пикселей определяется совокупностью условий, определяемых пространственным разрешением данных спутниковых измерений и наличием необходимой глобальной базы данных [2, 3, 16, 23, 28]. В случае водной поверхности в пикселе  $\Omega_{ij}$  осуществляется расчленение водной массы на слои по глубине  $z$ , т.е. выделяются трехмерные объемы  $\Omega_{ijk} = \{(\varphi, \lambda, z): (\varphi, \lambda) \in \Omega_{ij}, z_k \leq z \leq z_k + \Delta z_k\}$ , внутри которых все элементы распределены равномерно. Наконец, атмосфера над пикселем  $\Omega_{ij}$  по высоте  $h$  дискретизируется либо по уровням атмосферного давления, либо по характерным слоям высотой  $\Delta h_s$ .

Ясно, что создание глобальной модели возможно лишь с привлечением знаний и данных на междисциплинарном уровне. Среди множества глобальных моделей наиболее совершенной является модель, описанная в работе [29]. Блок-схема этой модели представлена на рис. 3

В работе [30] предложена адаптивная процедура встраивания глобальной модели в систему геоинформационного мониторинга. Эта процедура характеризуется схемой рис. 4.

## ПОИСК И ОБНАРУЖЕНИЕ ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ

Приближение момента возникновения природной катастрофы характеризуется попаданием вектора  $\{x_i\}$  в некоторый кластер многомерного фазового пространства  $X_c$ . Другими словами, переходя от чисто словесных рассуждений к количественному определению этого процесса, введем обобщенную характеристику  $I(t)$  природной катастрофы и отождествим ее с градуированной шкалой  $\Xi$ , для которой постулируем наличие отношений типа  $\Xi_1 < \Xi_2$ ,  $\Xi_1 > \Xi_2$  или  $\Xi_1 \equiv \Xi_2$ . Это означает, что всегда имеет место такое значение  $I(t) = \rho$ , которое определяет уровень близости возникновения природной катастрофы данного типа:  $\Xi \rightarrow \rho = f(\Xi)$ , где  $f$  – некоторое преобразование понятия «природная катастрофа» в число. В результате величина  $\theta = |I(t) - \rho|$  определяет ожидаемый промежуток времени до наступления катастрофы.

Попытаемся найти удовлетворительную модель для отображения словесного портрета “природной катастрофы” в область понятий и признаков, подчиняющихся формализованному описанию и преобразованию. С этой целью выделим в системе  $N \cup H$

$m$  элементов-подсистем низшего уровня, взаимодействие между которыми определим матричной функцией  $A = \| \| a_{ij} \| \|$ , где  $a_{ij}$  является показателем уровня зависимости отношений между подсистемами  $i$  и  $j$ . Тогда характеристику  $I(t)$  можно определить как сумму

$$I(t) = \sum_{i=1}^m \sum_{j>i}^m a_{ij}$$

Ясно, что в общем случае  $I = I(\varphi, \lambda, t)$ . Для ограниченной территории  $\Omega$  площадью  $\sigma$  индикатор  $I$  определим как среднее значение:

$$I_{\Omega}(t) = (1/\sigma) \int_{(\varphi, \lambda) \in \Omega} I(\varphi, \lambda, t) d\varphi d\lambda$$

Введение характеристики  $I_{\Omega}$  позволяет предложить следующую схему мониторинга и прогнозирования природных катастроф. На рис. 5 представлена укрупненная структура мониторинговой системы с функциями поиска, прогнозирования и слежения за природной катастрофой. В системе выделяются три уровня: источники информации (*регистраторы*), система обнаружения (*решатель*) и система классификации (*искатель*), блоки которых наделены следующими функциями:

- 1) регулярный контроль элементов окружающей среды с целью сбора данных об их состоянии в режиме, допускаемом используемыми техническими средствами;
- 2) регистрация подозрительных элементов окружающей среды, значение индикатора  $I_{\Omega}(t)$  которых соответствует интервалу опасности возникновения природной аномалии данного типа;
- 3) формирование динамического ряда  $\{ I_{\Omega}(t) \}$  для подозрительного элемента с целью принятия статистического решения о его шумовом или сигнальном характере и в последнем случае проверка подозрительного элемента по критериям следующего уровня точности (попадание вектора  $\{x_i\}$  в кластер и т. п.);
- 4) принятие окончательного решения о приближении момента возникновения природной катастрофы с выдачей информации соответствующим службам контроля окружающей среды.

Важную роль системы мониторинга играют аэрокосмические средства [2, 3, 16, 17]. Более детальные принципы построения систем мониторинга содержатся, например, в [2, 3, 16].

Эффективность системы мониторинга зависит от параметров измерительных технических средств и алгоритмов обработки данных наблюдений [3, 16]. Важную роль

здесь играет модель окружающей среды, используемая параллельно с формированием и статистическим анализом ряда  $\{I_{\Omega}(t)\}$  и адаптируемая к режиму мониторинга в соответствии со схемой рис. 4.

Из введенного выше критерия приближения природной катастрофы видно, что форма и поведение  $I_{\Omega}(t)$  имеют характерный вид для каждого типа процессов в окружающей среде. Одна из сложных задач состоит в определении этих форм и соответствующей их классификации. Например, такие часто возникающие опасные природные явления, как оползни и селевые потоки, имеют характерные признаки предварительного изменения рельефа и ландшафта, которые успешно регистрируются со спутников в оптическом диапазоне, а в совокупности с данными аэрофотосъемки и наземными измерениями уклонов рельефа, экспозиции склонов и состоянии гидросети позволяют предсказывать их за несколько суток до реализации. Однако ограниченные возможности оптического диапазона в условиях облачности или растительного покрова следует расширить внедрением систем дистанционного зондирования в микроволновой области электромагнитного спектра. Тогда дополнительно к указанным индикаторам оползней и селевых потоков можно добавить такие информативные параметры, как влажность почвы и биомасса, поскольку нарастание влажности почвы ведет к появлению оползней, а увеличение биомассы свидетельствует о повышении сдерживающей роли растительного покрова по отношению к перемещению горных пород. Особенно это важно при контроле снежно-каменных или просто снежных лавин. Создание каталога таких признаков для всех возможных природных катастроф и внесение его в базу знаний мониторинговой системы является необходимым этапом повышения ее эффективности.

Знание совокупности информативных признаков  $\{x_i^j\}$  природной катастрофы  $j$ -го типа и априорное определение ее кластера  $X^j$  в пространстве этих признаков позволяет в процессе спутникового слежения рассчитать скорость  $v_j$  приближения точки  $\{x_i^j\}$  к центру  $X^j$  и, таким образом, рассчитать время наступления катастрофы. Возможны и другие алгоритмы прогнозирования природной катастрофы. Например, прогнозирование лесного пожара возможно с помощью зависимости радиотеплового излучения леса на различных длинах волн от увлажненности лесных горючих материалов, как правило, располагающихся слоями. Знание такой зависимости дает

реальную возможность оценивать пожарную опасность леса с учетом влагосодержания растительного покрова и верхнего слоя почвы [9].

Исследования многих авторов показали, что имеется реальная возможность оценивать пожарную опасность заболоченных и болотных лесов с учетом влагосодержания растительного покрова и верхнего слоя почвы, применяя микроволновое зондирование в диапазоне 0,8-30 см. Многоканальное зондирование позволяет с помощью алгоритмов кластерного анализа решать задачу классификации лесных массивов по категориям пожарной зрелости. Эффективность таких методов зависит от детальности описания в модели структуры лесного массива, отражающей состояние кроны и плотность деревьев. Наиболее опасными и трудно обнаруживаемыми являются низовые пожары. В этом случае эффективной является трехслойная модель системы *почва-стволы-крона деревьев* [7] согласованная с индикатором пожароопасности  $I(\lambda_1, \lambda_2) = [T_b(\lambda_1) - T_b(\lambda_2)] / [T_b(\lambda_1) + T_b(\lambda_2)]$ . Например, при  $\lambda_1=0,8$  см и  $\lambda_2=3,2$  см индикатор  $I$  изменяется примерно от «-0,25» в зоне отсутствия опасности возгорания леса до «0,54» в зоне пожара. В области появления первых признаков загорания подстилки  $I \approx 0,23$ . При этом величина  $I$  слабо зависит от распределения слоев лесных горючих материалов, таких как лишайники, мхи, травяная ветош, отмершие хвоя или листья.

Реализация указанного трех-уровневого режима принятия решения о приближении природной катастрофы зависит от согласованности пространственного и временного масштабов системы мониторинга с соответствующими характеристиками природного явления. Наиболее сложными для принятия решения являются природные катастрофы “замедленного действия”, реализация которых может произойти через десятилетия. К числу таких ожидаемых катастроф относятся озоновые дыры, глобальное потепление, опустынивание земель, сокращение биоразнообразия, перенаселение земли и т.д. Решение базовой задачи достоверной прогнозной оценки появления таких катастроф или инициированных их приближением нежелательных природных явлений регионального масштаба предлагается осуществлять с помощью глобальной модели СПО (ГМСПО)[9,27], входными данными которой является информация, заложенная в обновляемые базы глобальных данных, и текущие спутниковые и наземные измерения.

Использование ГМСПО в ряде исследований показало, что такая технология позволяет не только предсказывать катастрофы “замедленного действия”, но и выдвигать сценарии их предотвращения. Одним из таких примеров является

рассмотренный в [32] сценарий реконструкции водного режима системы Арал-Каспий. На рис. 6 приведен окончательный результат применения ГМСПО к решению этой задачи. Видно, что просто реализуемая процедура обводнения ряда низменностей на восточном побережье Каспийского моря без последующего антропогенного вмешательства может резко изменить гидрологию территории между Аральским и Каспийским морями. Конечно, этот результат является лишь демонстрацией возможности ГМСПО оценивать последствия реализации сценариев воздействия на окружающую среду. В связи с этим возникает множество проблем организации исследований, решение которых возможно в рамках комплексной научно-технической программы мониторинга зоны влияния Аральского и Каспийского морей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение проблемы надежного прогнозирования природных катастроф требует создания эффективной информационной технологии для ее внедрения в системы мониторинга окружающей среды. Эта технология должна включать разделы, отвечающие за планирование измерений, развитие алгоритмов комплексной обработки данных из различных предметных областей знания, создание методов принятия решений на основе анализа динамической информации и оценки риска от реализации этих решений [3, 16]. Оценка риска смертельных исходов при возникновении природной катастрофы как функции параметров региона является одним из приоритетов будущих исследований. Известно, что такой риск в пространстве распределен неравномерно. Так среднегодовой риск по отдельным территориям оценивается следующими средними показателями ( $\text{млн}^{-1}$ ): Земной шар – 1, Бангладеш (наводнения) – 50, Китай (наводнения и землетрясения) – 25, Турция/Иран/Туркменистан (землетрясения) – 20, Япония (землетрясения) – 15, Карибский регион/Центральная Америка (штормы, землетрясения, извержения вулканов) – 10, Европа –  $<1$  и США/Канада –  $<0,1$ . Следовательно, учет этой неравномерности в моделях природных катастроф позволит оптимизировать функции будущей системы мониторинга.

Предложенный в данной работе подход в определенной степени нацелен на создание такого рода технологии. Однако для успешного продвижения к достижению этой цели требуется провести ряд фундаментальных исследований и решить множество организационно-технических задач. Среди первоочередных задач следует указать на

необходимость ранжированной систематизации природных катастроф с выделением их характерных признаков, что является принципиальным условием реализации этапов указанной выше трехуровневой процедуры принятия решения о приближении природной катастрофы. Примером решения подобной задачи являются приведенные карты опасных природных зон для территории России [15] и для территории США [35] с указанием типов и уровней опасностей. Другой важной задачей является модернизация ГМСПО с адаптацией к проблематике прогнозирования природных катастроф и ее параметрическое встраивание в существующие и планируемые к созданию системы мониторинга окружающей среды. Наконец, реальное воплощение высказанных здесь идей требует сосредоточения интеллектуальных, экономических и технических ресурсов в едином центре глобального геоинформационного мониторинга (ЕЦГГМ) Федерального уровня, который может быть организован на базе Центра проблем аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС» Министерства образования и науки Российской Федерации и Российской Академии Наук. Возможная функциональная схема такого центра представлена на рис. 7. Его функционирование обеспечит получение информации о:

- влиянии глобальных изменений на окружающую среду региона;
- роли происходящих или планируемых в регионе изменений природной среды в изменениях окружающей среды и биосферы на Земле и в прилегающих регионах;
- состоянии атмосферы, гидросферы и почвенно-растительных формаций на территории региона;
- наличии необходимых данных об экологических, климатических, экономических и демографических параметрах любого региона;
- уровне экологической безопасности на данной территории;
- появлении опасных для человека и окружающей среды явлений;
- тенденциях в изменениях состояния лесов, болот, пастбищ, сельско-хозяйственных посевов, речных и озерных систем и других природных комплексов;
- риске тех или иных мероприятий по изменению окружающей среды.

ЕЦГГМ сможет решать задачи:

- долгосрочного и своевременного планирования и управления хозяйственной деятельностью с учетом ее экологической целесообразности и разработки стратегии рационального природопользования и создания комфортных условий существования человека;

- оперативного оповещения и предупреждения о появлении за пределами и внутри конкретной территории процессов, могущих ухудшить экологическую обстановку и вызвать долговременные изменения природной среды с повышением риска для здоровья населения;
- идентификации причин нежелательных изменений окружающей среды на отдельных территориях с указанием масштабов их отклонения от природного фона;
- оценки последствий для данной и других территорий земного шара реализаций антропогенных проектов;
- выработки неотложных мер по ликвидации причин возникновения экологических катастроф и стихийных бедствий.

Изложенные подходы реализованы при реальном мониторинге ряда опасных природных процессов [2, 3, 16] и продолжают внедряться в существующие и перспективные системы мониторинга природных катастроф.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Авакян А.Б., Истомина М.Н. Наводнения как глобальная проблема. Вестник РАН, 2002, том. 72, № 12, с. 1059-1068.
2. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии // В книге «Новые направления в океанологии и морской геологии» под ред. Лисицына А.П. М.: Наука, 2004, с. 55-112.
3. Бондур В.Г. Принципы построения космической системы мониторинга Земли в экологических и природно-ресурсных целях // Изв. вузов. Сер. Геодезия и аэрофотосъемка, 1995, №1-2, с.14-38.
4. Григорьев Ал. А., Кондратьев К.Я. Экодинамика и геополитика. Том II: экологические катастрофы. Изд-во НИЦ ЭБ РАН, Санкт-Петербург, 2001, 688 с.
5. Клюев В.В. (ред.) Безопасность России: экологическая диагностика. Знание, Москва, 2000, 496 с.
6. Заварзин Г.А. Антипод ноосферы. // Вестник РАН, 2003, том 73, № 7, с. 627-636.
7. Кондратьев К.Я., Григорьев Ал. А. Лесные пожары как компонент глобальной экодинамики. Оптика атмосферы и океана, 2004, том. 136, вып. 4, с. 279-292.
8. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Перспективы развития цивилизации: многомерный анализ. Логос, Москва, 2003, 574 с.



9. Крапивин В.Ф., Кондратьев К.Я. Глобальные изменения окружающей среды: экоинформатика. Изд-во СПб гос. ун-та, Санкт-Петербург, 2002, 724 с.
10. Кондратьев К.Я., Лосев К.С., Ананичева М.Д., Чеснокова И.В. Естественнонаучные основы устойчивости жизни. Изд-во ЦСАГО, Москва, 2003, 340 с.
11. Крапивин В.Ф., Мкртчян Ф.А. Эффективность мониторинговых систем обнаружения. Экологические системы и приборы, 2002, № 6, с. 3-5.
12. Малинецкий Г.Г. Сценарии, стратегические риски, информационные технологии. // Информационные технологии и вычислительные системы, 2002, № 4, с. 83-108.
13. Назаретян А.П. Антропогенные кризисы: гипотеза технико-гуманитарного баланса. Вестник РАН, 2004, том. 74, № 4, с. 319-330.
14. Подлазов А.В. Самоорганизованная критичность и анализ риска. // Известия Вузов. Прикладная нелинейная динамика 2001, том 9, № 1, с. 49-88.
15. Природные опасности России. Монография в 6 томах. Под общей ред. Осипова В.И., Шойгу С.К.: М.: «КРУК», т.1, 2002, 246 с., т.2, 2000, 296 с.; т.3, 2002, 246 с.; т.4, 2000, 316 с.; т.5, 2001, 296 с., т.6, 2003 г., 316 с.
16. Савин А.И., Бондур В.Г. Научные основы создания и диверсификации глобальных аэрокосмических систем. // Оптика атмосферы и океана, №1, 2000, с. 46-62.
17. Савиных В.П., Малинников В.А., Цыпина Э.М., Сладкопевцев С.А. География из космоса. М.: Московский государственный университет геодезии и картографии, 2000, 224 с.
18. Шахрамантян М.А. Новые информационные технологии в задачах обеспечения национальной безопасности России (природно-техногенные аспекты). Изд-во РЦ ВНИИ ГОЧС России, 2003, 358 с.
19. Abrahamson D.E. Challenge of Global Warming. Island Press, Washington, 1989, 376 pp.
20. Braun R.A., Todd R.M., and Wallace N. A general equilibrium interpretation of damage-contingent securities. // *The Journal of Risk and Insurance*, 1999, vol. 66, No. 4, pp. 583-595.
21. Brebbia C.A. Risk Analysis IV. WIT Press, Southampton, 2004, 400 pp.
22. Changnon S.A. Flood prediction: Immersed in the quagmire of national flood mitigation strategy. Chapter in Prediction: Science, Decision Making, and the Future of Nature. Island Press, Washington, DC, 2000, pp. 85-106.

23. Changnon S.A. Thunderstorms Across the Nation: An Atlas of Storms, Hail and Their Damages in the 20<sup>th</sup> Century. Changnon Climatologist and Office of Global Programs, NOAA, Washington, 2001, 93 pp.
24. Changnon S.A. (ed.) The Great Flood of 1993: Causes, Impacts, and Responses. Westview Press, Boulder, CO, 1996, 321 pp.
25. Field C.B. and Raupach M.R. (eds.) Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate, and the Natural World. Island Press, Washington, 2004, 584 pp.
26. Field J.G., Hempel G., and Summerhayer C.P. (eds.) Oceans 2020: Science Trends and the Challenge of Sustainability. Island Press, Washington, 2002, 296 pp.
27. Gardner J.S. Natural hazards risk in the Kullu District, Himachal Pradesh, India. // The Geographical Review, 2002, vol. 92, pp. 172-177.
28. Kondratyev K.Ya., Grigoriev Al. A. Environmental Disasters: Antropogenic and Natural. Springer/PRAXIS, Chichester U.K., 2002, 484 pp.
29. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Savinykh V.P., and Varotsos C.A. Global Ecodynamics: A Multidimensional Analysis. Springer/PRAXIS, Chichester U.K., 2004, 658 pp.
30. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Phillips G.W. Global environmental change: Modelling and Monitoring, Springer, Berlin, 2002, 319 pp.
31. Kondratyev K.Ya., Losev K.S., Ananicheva M.D., Chesnokova I.V. Stability of Life on Earth. Springer/PRAXIS, Chichester U.K., 2004, 162 pp.
32. Krapivin V.F. and Phillips G.W. A remote sensing-based expert system to study the Aral-Caspian aquageosystem water regime // Remote Sensing of Environment, 2001, vol.75, pp. 201-215.
33. McGuire B., Mason I., Kilfurn C. Natural Hazards and Environmental Change. Arnold/Oxford University Press, Southampton, 2004, 187 pp.
34. Milne A. Doomsday: The Science of Catastrophic Events. Praeger Publisher, Westport, CT, 2004, 194 pp.
35. Monmonier M. Cartographies of Danger: Mapping Hazards in America. The University of Chicago Press, Chicago and London, 1997, 363 pp.
36. Morgen K., Spector M.J., Brebbia C.A. (eds.) New Learning. Paradogms and Tools. WIT Press, Southampton, 2004, 250 pp.
37. Munich Re. Annual review of natural catastrophes 1997, 1998.  
<http://www.munichre.com>.

38. Pelling M. *Natural Disasters and Development in a Globalizing World*. Routledge, London, 2003, 272 pp.
39. Ruck M. *Natural Catastrophes 2002: Annual Review*. Munich Re Topics, Dresden, 2002, 50 pp.
40. Walker G. *Snowball Earth: The Story of the Great Global Catastrophe that Spawned Life as We Know It*. Crown Publishers, New York, 2003, 269 pp.
41. Watson, R.T., Noble, I.R., Bolin, B., Ravindranath, N.H., Verardo, D.J., Dokken, D.J. (eds.) *Land use, land-use change, and forestry*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000, 377 pp.

**Таблица 1.** Характеристика блоков глобальной модели системы *Природа-Общество* [6,24-27 ].

Идентификатор блока на рис.3	Характеристика функций блока
DEM	Набор моделей динамики численности населения с учетом возрастной структуры.
CLI	Набор моделей климатических процессов с различной детальностью учета параметров и корреляций между ними.
MRE	Модель управления минеральными ресурсами.
AGR	Модель производства сельскохозяйственной продукции.
MSTP	Модель научно-технического прогресса.
DAT	Управление интерфейсом между блоками глобальной модели и базой данных.
CON	Настройка глобальной модели на условия имитационного эксперимента и его контроль.
REP	Подготовка результатов имитационного эксперимента к визуализации или другим формам отчета.
MBWB	Модель водного баланса биосферы.
MGCDC	Модель глобального биогеохимического круговорота углекислого газа.
MGSC	Модель глобального биогеохимического круговорота соединений серы.
MGOC	Модель глобального биогеохимического круговорота кислорода и озона.
MGNC	Модель глобального биогеохимического круговорота азота.
MGPC	Модель глобального биогеохимического круговорота фосфора.
POL	Набор моделей кинетики некоторых типов загрязнителей в различных средах.
BIO	Набор моделей водных экосистем в различных климатических зонах.
HYD	Модель гидродинамических процессов.
SPF	Набор моделей почвенно-растительных формаций.
MAG	Модель процессов в магнитосфере.

## Количество крупнейших природных катастроф

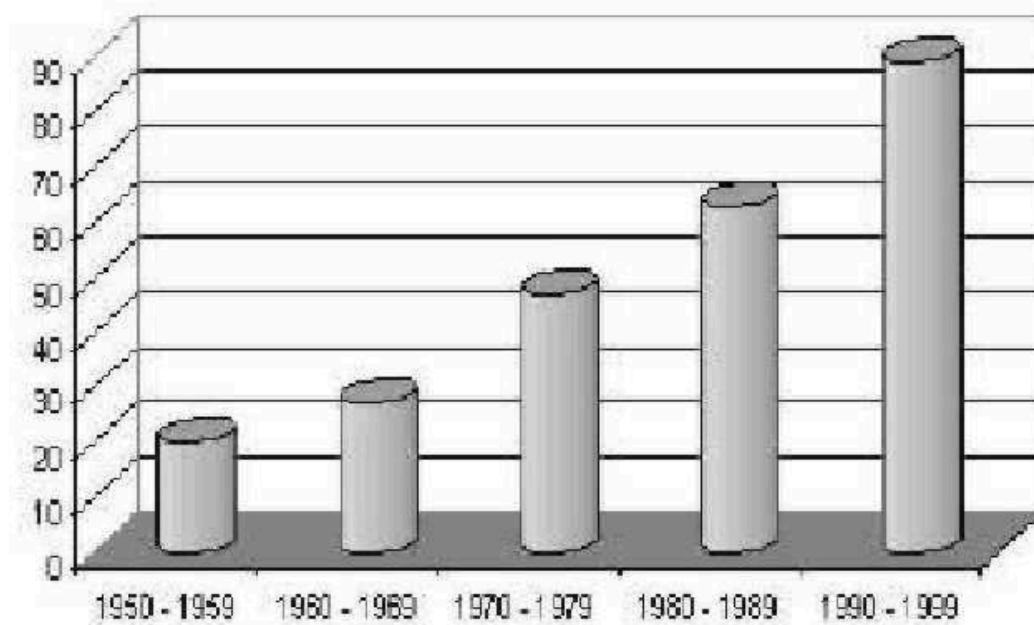


Рис. 1. Динамика количества крупнейших природных катастроф [32].

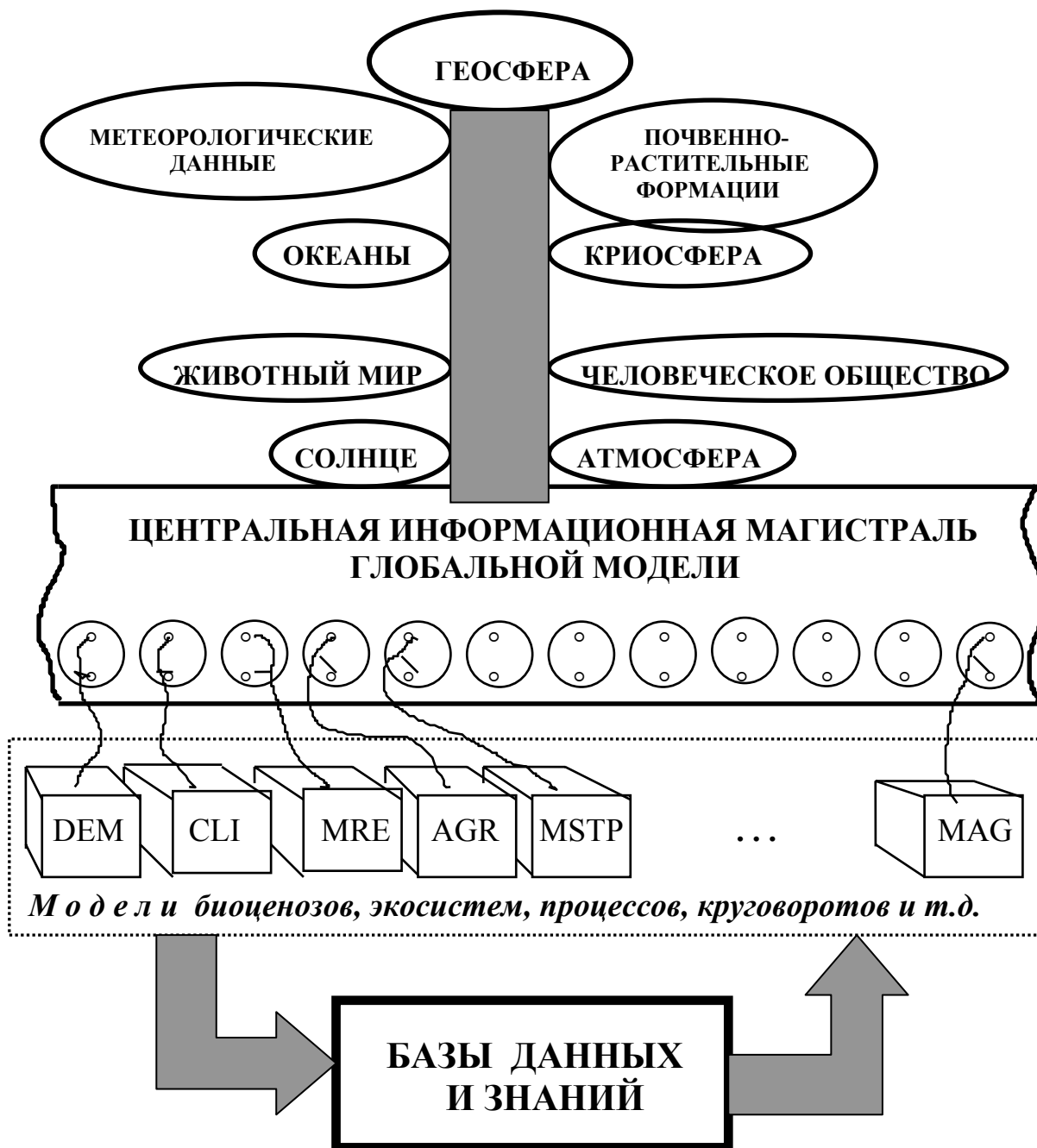


Рис.2. Информационно-функциональная структура глобальной модели СПО.  
Обозначения даны в табл. 1.

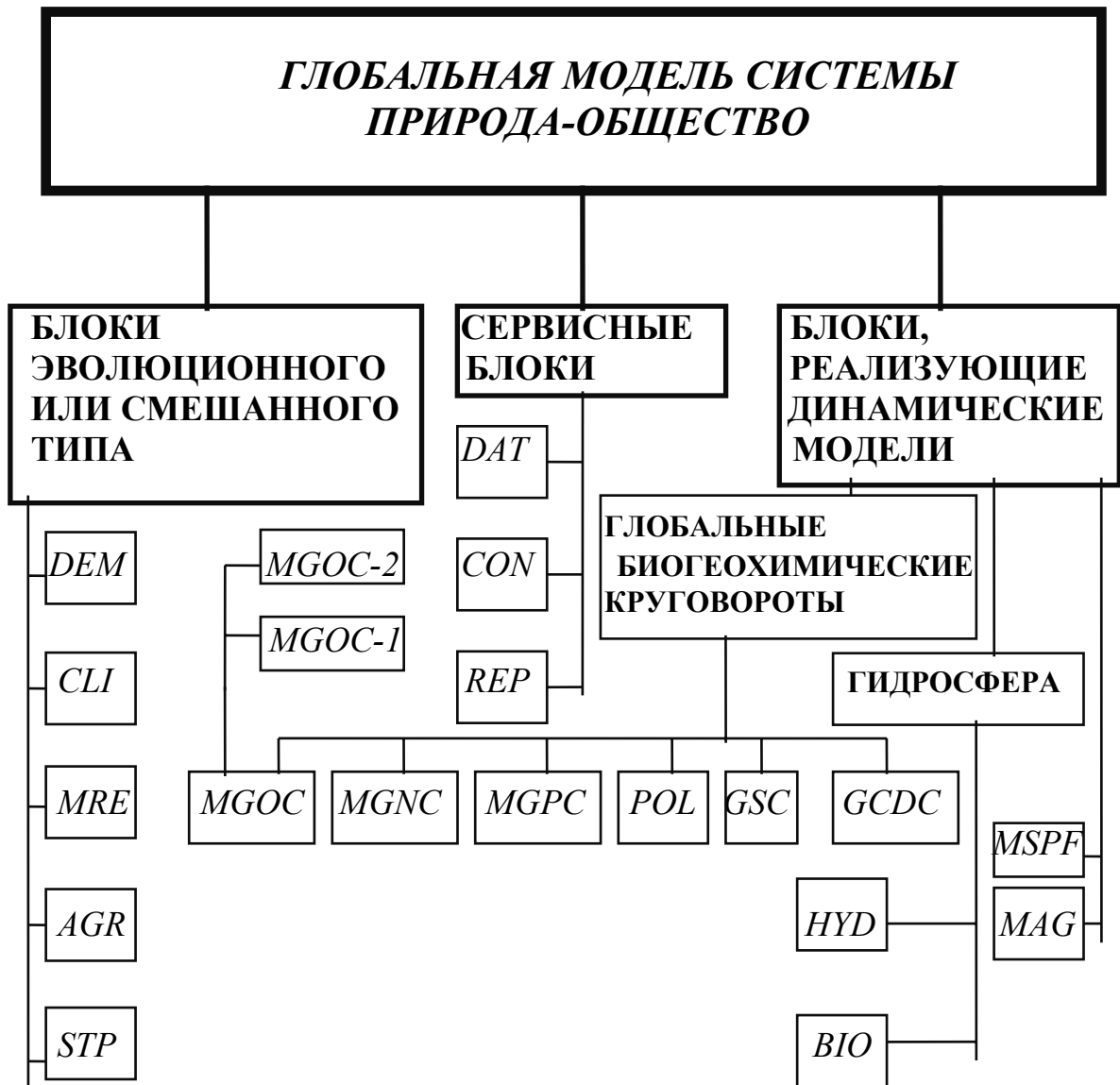


Рис. 3. Состав блоков глобальной имитационной модели функционирования СПО [24 ].



Рис.4. Концепция адаптивной настройки глобальной модели СПО в условиях геоинформационного мониторинга.



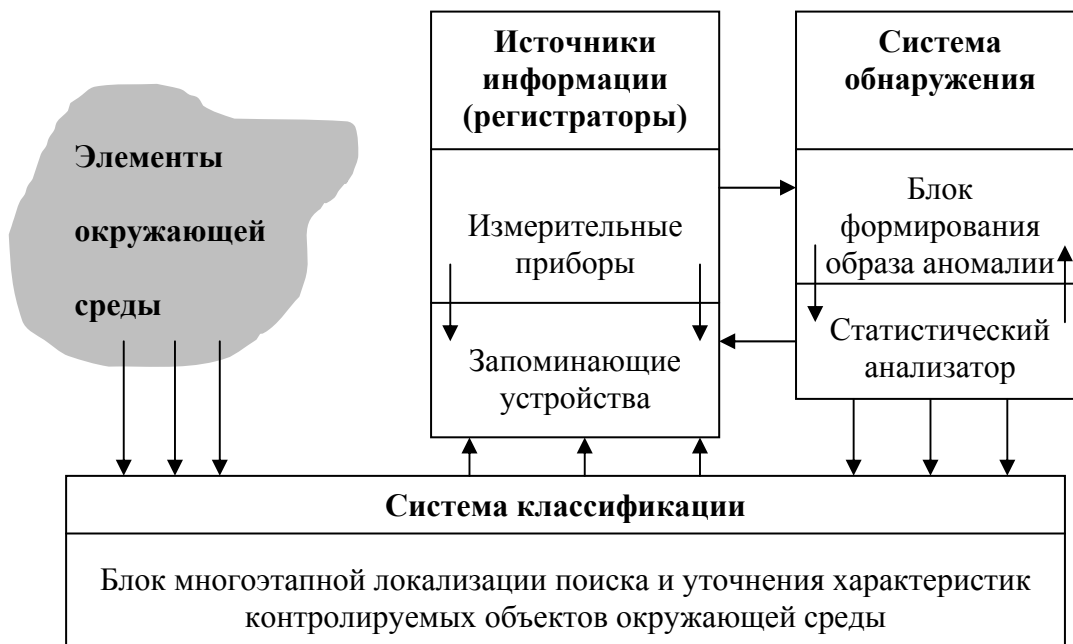


Рис. 5. Укрупненная структурная схема системы мониторинга, поиска и обнаружения природных аномалий.

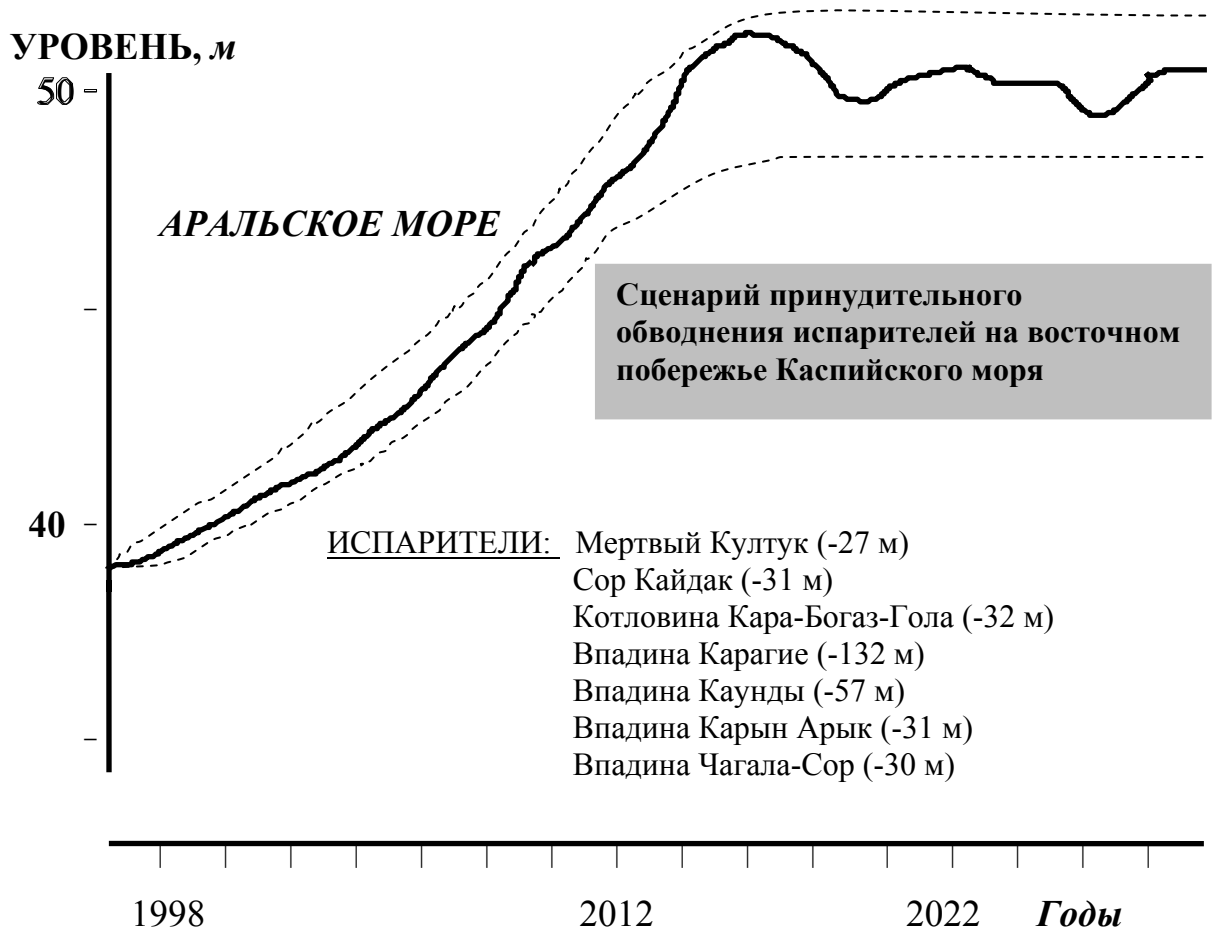


Рис. 6 . Возможная динамика уровней Аральского моря (в метрах по отношению к уровню Мирового океана) в результате воздействия испарителей и принудительного обводнения на гидрологический режим территории Аральско- Каспийской аквагеосистемы начиная с 1998 г. [25].

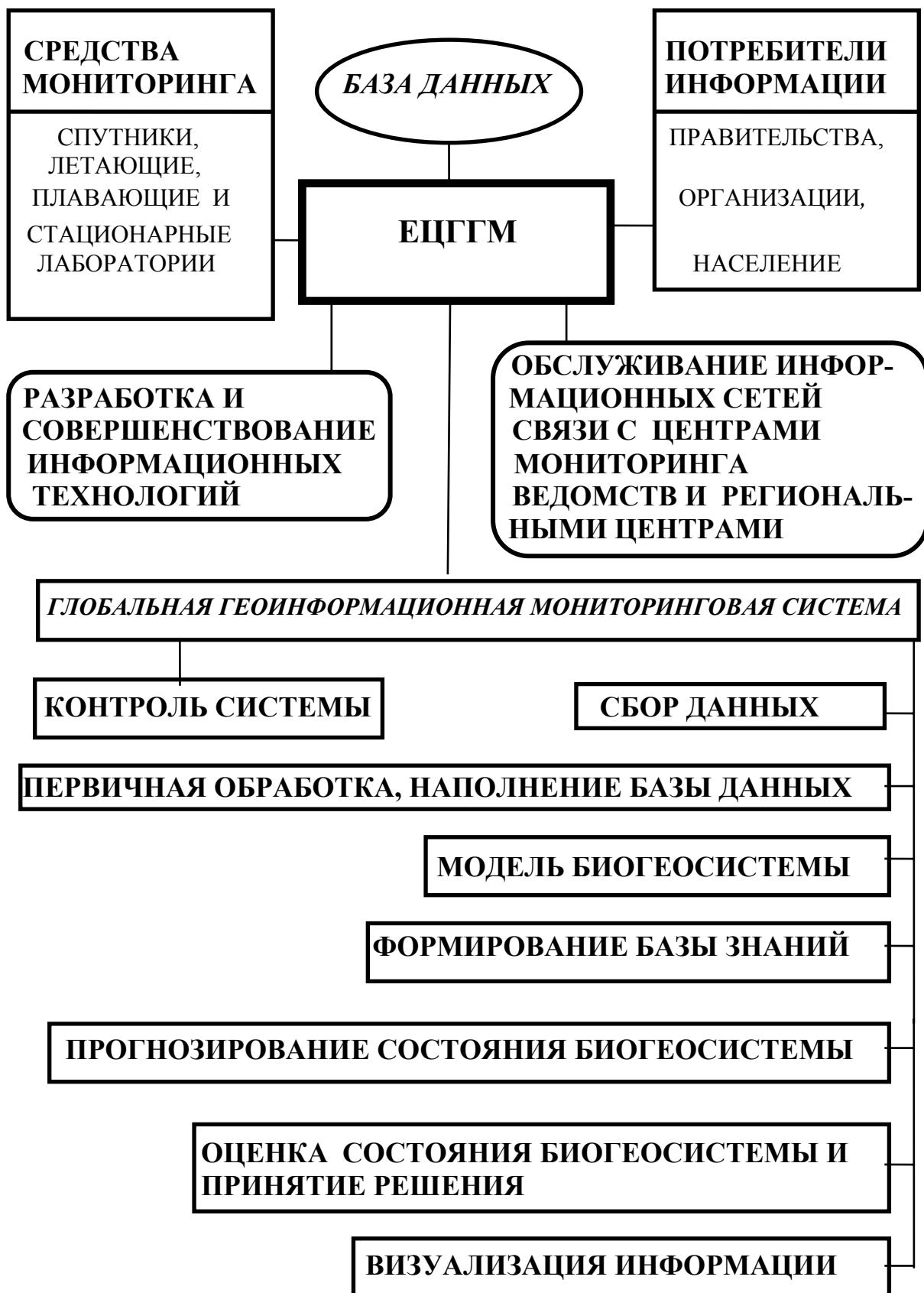


Рис. 7. Функциональная схема единого центра глобального геоинформационного мониторинга.