

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ И ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

DOI: 10.36535/0235-5019-2020-05-1

УДК 502/504:001

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩАЯ СИСТЕМА

Д-р физ-мат. наук, проф. **Крапивин В.Ф.**¹,
канд. техн. наук **Потапов И.И.**²,
канд. физ-мат наук **Солдатов В.Ю.**¹

¹ Институт радиотехники и электроники РАН им. В.А. Котельникова, Москва

² Всероссийский институт научное и технической информации РАН, Москва

GEOECOLOGICAL INFORMATION-MODELING SYSTEM

V.F. Krapivin, I.I. Potapov, V.Yu. Soldatov

***Ключевые слова:** информация, мониторинг, принятие решения, окружающая среда, моделирование.*

***Key words:** information, monitoring, decision making, environment, modeling.*

Описана информационная технология, ориентированная на обработку данных природного мониторинга в условиях наличия неустранимых неопределенностей, связанных с невозможностью проведения измерений в определенных координатах или в некоторые моменты времени. Технология базируется на соединении функций географических информационных систем с приемами математического моделирования. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (Грант РФФИ № 19-07-00443).

Information technology is described to be oriented on the nature data monitoring processing under the conditions when unremovable uncertainties exist and they are related with the impossibility to realize the measurements in certain coordinates or in some times. Technology is based on the combination of functions of geographical information systems and mathematical modeling techniques.

Введение

Геоэкосистема относится к сложным объектам, имеющих огромное хозяйственное значение и мониторинг которых необходим не только для оценки их текущего состояния, но и для прогнозирования динамики развития всей совокупности процессов в зоне их влияния. Это важно в условиях, когда процесс деградации региональной социально-экологической системы развивается и нет данных о сокращении потоков загрязняющих веществ в воды, например, моря. Поэтому проблема синтеза системы геоинформационного мониторинга региона такого

моря требует решения огромного спектра задач, входящих в компетенцию многих областей знания. Комплексный характер этой проблемы обусловлен совокупностью разнородных и разноплановых теоретических и прикладных исследований, которые ведутся во многих странах по национальным и международным программам исследования окружающей среды. Основная цель всех подобных исследований состоит в попытке ответить на единственный базовый вопрос: какова должна быть структура и режим работы системы наблюдения за элементами окружающей среды, чтобы обеспечивались надежные оценки ее текущего состояния и прогноз ее развития на ближайшее и перспективное будущее. К сожалению, ответа на этот вопрос пока нет. Развитие в работах [8,9] подходы к решению этой проблемы дают теоретическую основу новой стадии развития науки об окружающей среде. Одним из препятствий здесь является отсутствие научной базы, которая бы объединяла усилия ученых в направлении развития новых информационных технологий, которые бы давали механизмы оптимизации информационных потоков в системах геоинформационного мониторинга и способствовали бы поиску методов решения указанной задачи. Одним из перспективных научных направлений, дающих фундаментальные основы для развития новых информационных технологий, является эоинформатика [3,4].

Различные разделы эоинформатики затрагиваются многими научными направлениями, так или иначе связанными с изучением глобальных или региональных изменений окружающей среды под воздействием современной цивилизации. Эти направления находят отражение в некоторых международных научных журналах, публикации в которых в той или иной мере способствуют решению базовой задачи геоинформационного мониторинга. Анализ публикаций в них за последние несколько лет показывает, что 95% научных статей затрагивают частные вопросы, непосредственно не увязываемые с проблемой геоинформационного мониторинга и не имеющие комплексного характера. Поэтому предлагаемый в [6,7] подход преодолевает недостатки разрозненных научных направлений в области формализации процессов окружающей среды, опираясь на опыт многих авторов по исследованию комплексных проблем геоинформационного мониторинга с рассмотрением широкого спектра пространственных шкал и временных масштабов.

Эоинформатика изучает проблемы, возникающие при применении методов информатики для решения задач контроля окружающей среды. Сюда входят такие области, как разработка новых информационных технологий обработки данных мониторинга, создание и развитие алгоритмов пространственно-временной интерполяции, анализ корреляционных связей в природно-антропогенных системах с учетом иерархии пространственных и временных шкал и поиск наиболее эффективных методов синтеза структур систем мониторинга. Эоинформатика отдает приоритет технологиям, в которых методами информатики изучаются динамические характеристики систем окружающей среды, оцениваются крупномасштабные последствия антропогенной активности, прогнозируется развитие биогеохимических и биогеоэкологических процессов от локального до глобально-глобальных масштабов.

Область интересов эоинформатики также включает создание и применение математических моделей природных и антропогенных процессов в окружающей среде, поиск критериев достоверной оценки качества среды обитания человека и выявления областей и причин нарушения санитарно-эпидемиологической обстановки.

Экоинформатика исследует теоретические и прикладные задачи, которые нацелены на понимание роли методов математического моделирования, теории сложных систем, теории игр и нелинейного программирования, компьютерной картографии, технологии дистанционного зондирования и экспертных систем в изучении процессов, происходящих в окружающей среде. Она охватывает сферу синтеза пакетов software, реализующих алгоритмы решения задач экологического мониторинга и обеспечивающих управление информационными потоками в системах контроля окружающей среды.

Экоинформатика объединяет знания специалистов в области физики, математики, биологии, химии, социологии, экономики и права, занимающихся проблемами окружающей среды, и нацеливает их на решение базовой задачи геоинформационного мониторинга. Одной из задач экоинформатики является содействие указанным специалистам во взаимном проникновении в смежные области знания с целью расширения возможностей разрабатываемых ими технологий и методов. Особенно это важно для внедрения высокоэффективных методов искусственного интеллекта, планирования эксперимента и математического моделирования.

Создание технологии синтеза информационно-моделирующей системы для изучения Азовского моря базируется на принципах, методиках, алгоритмах и моделях экоинформатики.

Технология синтеза геоэкологической информационно-моделирующей системы (ГИМС-технология)

Область географических информационных систем (ГИС) является наиболее развитой частью природного мониторинга. Во многих странах ГИС-технология пользуется большим успехом и приносит ощутимые экономические эффекты. ГИС лежит на стыке компьютерной картографии с базами данных и дистанционным зондированием. Элементами ГИС являются компьютерная сеть, база данных, сеть передачи данных и система отображения реальной ситуации на дисплее компьютера. Многочисленные примеры ГИС позволяют утверждать, что ГИС-технология обеспечивает удобное для массового пользователя средство контроля за состоянием объекта мониторинга и служит эффективным механизмом объединения многофакторной информации об объекте. Однако ГИС-технология имеет серьезные ограничения, когда речь идет о сложных задачах природного мониторинга, требующих создания динамичного образа среды в условиях отрывочных данных по пространству и во времени. Основным недостатком ГИС - технологии состоит в том, что она не ориентирована на многоплановый прогноз состояния объекта мониторинга.

Важный шаг в развитии ГИС-технологии сделан в работе [5], где теоретически обоснована и практически применена ГИМС-технология. Эта технология устраняет многие недостатки ГИС-технологии и дает возможность синтеза систем мониторинга с функциями прогноза. Обобщенно основная концепция ГИМС-технологии представлена на рис. 1-4. Ее ключевым звеном является дистанционное определение с помощью зондирования со спутников максимально возможного числа параметров модели контролируемой геоэкологической системы. Именно такое сочетание эмпирической и теоретической частей ГИМС - технологии позволяет оперативно оценивать текущие и прогнозные изменения окружающей среды в масштабах региона ее влияния.



Рис. 1. Концепция адаптивно-эволюционной технологии использования информационно-измерительных систем для контроля зоны аквагеоэкосистемы.

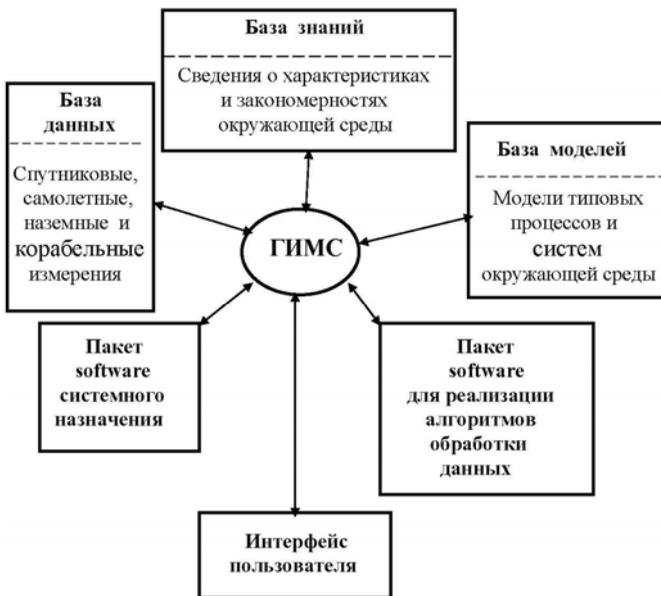


Рис. 2. Архитектура ГИМС-технологии.



Рис. 3. Составляющие ГИМС-технологии.

Основными принципами ГИМС - технологии являются:

- 1) Объединение, интеграция и координация уже существующих государственных, ведомственных и отраслевых систем сбора первичной информации об окружающей среде на единой организационной и научно-методической основе.
- 2) Оптимизация материальных и финансовых затрат на создание, функционирование и совершенствование системы контроля окружающей среды.
- 3) Согласование и совместимость информационных потоков в системе на основе применения единой координатно-временной системы, использования единой системы классификации, кодирования, форматов и структуры данных.
- 4) Централизация доступа к информации через международные и региональные информационные сети с максимальным расширением списка пользователей.
- 5) Обеспечение межнационального характера глобального геоинформационного мониторинга, не зависящего от несовпадения государственных границ с границами экосистем. Это обстоятельство важно для региона, например, Азовского и Каспийского морей.

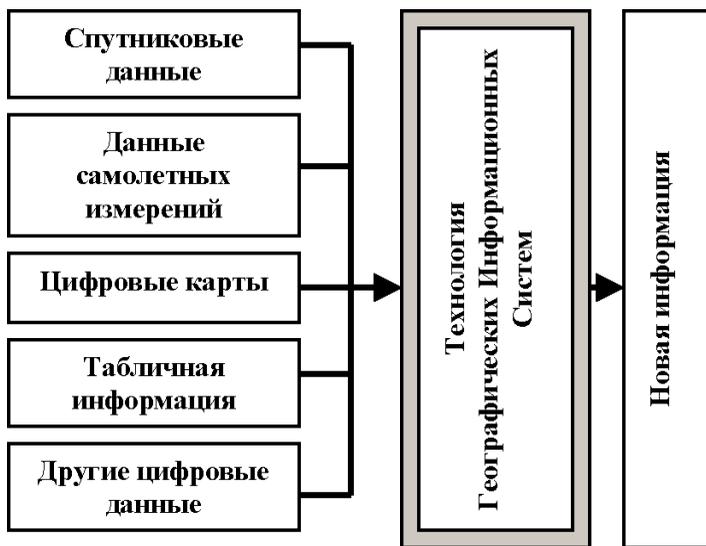


Рис. 4. Интеграция данных об окружающей среде, поступающих из различных источников и в различной форме.

Состояние аквагеосистемы, например, любого моря характеризуется большим разнообразием параметров, определяющих динамику функционирования не только непосредственно морской экосистемы, но и прилегающих территорий. Среди них, такие как характеризующие тип почвы и растительности, водный режим территории, солевой состав почво-грунтов, уровень залегания грунтовых вод, структура расположения антропогенных объектов и многие другие. В принципе, требуемая информация об указанных параметрах может быть получена с различной степенью достоверности и производительности из данных наземных наблюдений, дистанционных измерений и из банков данных географических информационных систем, где содержится априорная информация, накопленная в прошлые

годы. Проблема, возникающая перед лицом, ответственным за принятие соответствующего решения, заключается в получении ответов на следующие вопросы:

- какие приборы целесообразно использовать для проведения наземных и дистанционных измерений;
- какие финансовые средства выделить для проведения наземных и дистанционных измерений;
- как сбалансировать количество наземных измерений и объем дистанционных данных с учетом их информационного содержания и стоимости;
- какие математические модели пространственно-временных изменений параметров природных объектов целесообразно использовать для интерполяции и экстраполяции данных контактных и дистанционных наблюдений с целью уменьшения объема (количества) последних и, соответственно, уменьшения стоимости работы в целом, а также для получения прогноза функционирования наблюдаемого объекта.

ГИМС - технология позволяет ответить на поставленные вопросы путем адаптации ее функций к предистории функционирования объекта мониторинга. По своей структуре ГИМС включает несколько блоков, которые выполняют следующие функции:

- сбор информации об объекте мониторинга;
- обработка, сортировка, запоминание и хранение информации;
- моделирование (имитация, организация взаимосвязей, обучение) физико-химических процессов;
- оценка текущего состояния геоэкосистемы;
- прогноз состояния геоэкосистемы;
- обратная связь, оценка дефицита информации, ее оптимизация;
- выполнение специфических операций по обработке данных в рамках требований потребителя (оценка и прогноз состояния объектов при реализации антропогенного сценария и т.п.).

Любая подсистема окружающей среды рассматривается как элемент природы, взаимодействующий через биосферные, климатические и социально-экономические связи с глобальной системой *природа/общество* (СПО). Для конкретного объекта мониторинга создается модель, описывающая это взаимодействие и функционирование различных уровней пространственно-временной иерархии всей совокупности процессов в окружающей среде, влияющих по предварительным оценкам на состояние объекта. Модель охватывает характерные для данной территории процессы природного и антропогенного характера и в начале своей разработки опирается на существующую информационную основу. Структура модели ориентируется на адаптивный режим ее использования согласно схеме рис. 1.

В результате соединения системы сбора информации об окружающей среде, модели функционирования геоэкосистемы данной территории, системы компьютерного картографирования и средств искусственного интеллекта синтезируется единая ГИМС территории, обеспечивающая прогнозные оценки последствий реализации техногенных проектов и другие оценки функционирования геоэкоистемы.

Построение ГИМС связано с выделением компонентов биосферы, климата и социальной среды, характерных для данного уровня пространственной иерархии.

Последовательность действий по организации работ и реализации проекта ГИМС ориентируется на создание следующих ее подсистем:

- сбор и экспресс анализ данных;
- первичная обработка и накопление данных;
- компьютерное картирование;
- оценка состояния атмосферы;
- оценка состояния почвенно-растительных покровов;
- оценка состояния водной среды территории;
- оценка уровня экологической безопасности и риска для здоровья населения территории;
- идентификация причин нарушения экологической и санитарной обстановки;
- интеллектуальная поддержка компьютерных операций и принятия решений.

Подсистема сбора и экспресс анализа данных

Эта подсистема обеспечивает систематический сбор, обобщение, хранение, использование и распространение информации о параметрах окружающей среды в форме, максимально адаптированной к практическому использованию ее потребителями. Решается задача планирования эксперимента с указанием структуры системы сбора данных об окружающей среде региона с использованием спутников, самолетов-лабораторий, передвижных и стационарных наземных пунктов наблюдения. Лаборатории оснащаются измерительными средствами, позволяющими определять степень загрязнения окружающей среды, картировать экологическую обстановку, фиксировать нарушения природной среды, отображать на карте местности характерные образования, обнаруживать подповерхностные очаги экологических нарушений, осуществлять всепогодную типизацию покровов, нарушений почвенных покровов, разливов нефти, состояния лесов, загрязнения водных систем и оперативно выявлять критические ситуации, а также указывать на источники экологической опасности.

Техническое воплощение функций данной подсистемы легко осуществимо с применением средств дистанционного зондирования [11], а также волоконно-оптических датчиков и измерительных систем на их основе [1,2]. Использование оптоволоконных линий связи для передачи данных природного мониторинга может резко повысить его надежность и живучесть информационно-измерительных систем. Эти эффекты могут быть достигнуты благодаря тому, что оптоволоконные измерительные системы не оказывают взаимного влияния, и их функционирование не зависит от электромагнитного излучения и других физических полей. При этом обеспечивается синхронизация наземных волоконно-оптических датчиков с работой спутниковых систем, особенно тех, которые оснащены СВЧ радиометрами, без каких-либо помех, вызванных электромагнитными полями, высокими температурами и агрессивными средами. Это важно в зоне Азовского моря, где влияние антропогенных факторов на электромагнитные поля может быть не всегда прогнозируемым, а потому информационные каналы системы мониторинга могут блокироваться случайным образом.

Подсистема первичной обработки и накопления данных

Подсистема анализирует информацию об окружающей среде и оценивает фактическое состояние природных систем в конкретных пространственно-временных границах. Реализуются методика и алгоритм синхронного анализа аэрокосмиче-

ской информации и наземных измерений. За счет методов пространственно-временной интерполяции осуществляется восстановление данных по региону и приведение их к единому моменту времени. Проводится тематическая классификация данных и осуществляется пространственно-временное совмещение изображений в оптическом, ИК и СВЧ диапазонах трассовых измерений, получаемых аппаратурой разнотипных центров измерений.

Особенностью измерений с использованием летающих лабораторий или спутников является трассовость и малые объемы статистически достоверных выборок, а также нестационарность получаемых рядов данных. Формирование входной информации для моделей и систем интерпретации данных о пространственно неоднородных природных структурах по результатам отрывочных по пространству и нерегулярных во времени измерений требует решения задачи восстановления данных в межтрассовом пространстве. Эта задача может быть решена методом динамического программирования, эволюционного моделирования и другими методами пространственного интерполирования. Выбор одного из этих способов восстановления данных зависит от типа решаемой задачи. Крупномасштабные задачи картографического представления данных измерений с ИСЗ решаются методом сплайн-интерполяции, более детальное изучение двумерных объектов обеспечивается методом дифференциальной аппроксимации, а восстановление данных в условиях отсутствия какой-либо априорной информации может быть выполнено методом эволюционного моделирования [10,11].

К универсальным подходам в теории приближения функций относится метод дифференциальной аппроксимации, который часто используется для анализа динамической информации. В случае, когда речь идет о восстановлении трассовых измерений, задача становится идентичной задаче приведения измерений к единому моменту времени и определения значений параметров объекта в межтрассовом пространстве. За время измерений изучаемый объект в силу своей динамичности изменяется, а потому невозможность получения статистически достоверных выборок очевидна. Метод дифференциальной аппроксимации наилучшим образом отвечает такой задаче восстановления, так как в нем заложена механика имитации динамики данных. Комбинация этого метода со сплайн-аппроксимацией в условиях, когда в структуре трассовых измерений имеются пересечения траекторий полета носителя системы наблюдения, за счет оптимизации режима интерполяции повышает эффективность восстановления данных по всему пространству, занятому изучаемой системой.

В связи с изучением природных объектов дистанционными методами была выдвинута парадигма «эволюционной вычислительной технологии» - технологии знания, ориентированной на возобновляемую адаптацию. Эта парадигма легла в основу ГИМС-технологии. Следование этой парадигме требует усовершенствования «сверхинтеллекта» с учетом неустраняемой информационной неопределенности в задачах эоинформатики. Таким сверхинтеллектом является эволюционное моделирование - метод адаптивной структурной идентификации объекта, основанный на синтезе структурированных моделей путем имитации механизмов естественной эволюции и их самоорганизации.

Эволюционная интеллектуальная технология позволяет создавать модель объекта или процесса, изменяющегося во времени непредвиденным образом, чем и обеспечивает устранение информационной неопределенности в любой момент мониторинга. Эта технология в общем плане описывается иерархической двухуровневой процедурой (рис. 5). На первом уровне имеется два постоянно чере-

дующихся процесса, условно названных процессом структурной адаптации и процессом использования. На произвольном шаге адаптации синтезируются модели, которые используются для прогнозирования, интерполяции и других действий над отрывочными данными. От шага к шагу в процессе адаптации выбирается наиболее эффективная модель.

Процедура эволюционного отбора моделей обеспечивает практически неограниченное во времени функционирование системы в условиях неустранимой информационной неопределенности.

Подсистема компьютерного картирования

Подсистема реализует алгоритмы формирования компьютерных карт с нанесением на них оцениваемых характеристик экологической обстановки в регионе. Предусматривается многоуровневое масштабирование и фрагментирование территории. Информационное наполнение выходных карт обеспечивается через пользовательский интерфейс и зависит от потребностей пользователя. Также осуществляется подготовка оперативных информационных сводок по изменяющейся текущей ситуации для организаций всех уровней и общественности. Картографическая идентификация объектов окружающей среды реализуется в соответствии со схемой рис. 6 и 7

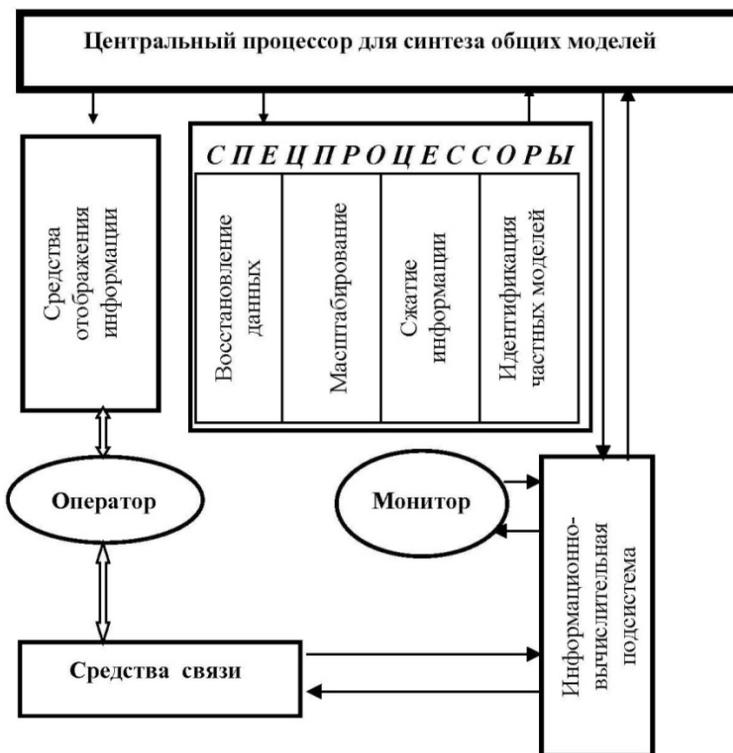


Рис. 5. Принципиальная структура схемы подключения эволюционной нейротехнологии к бортовой информационно-вычислительной подсистеме мониторинга.

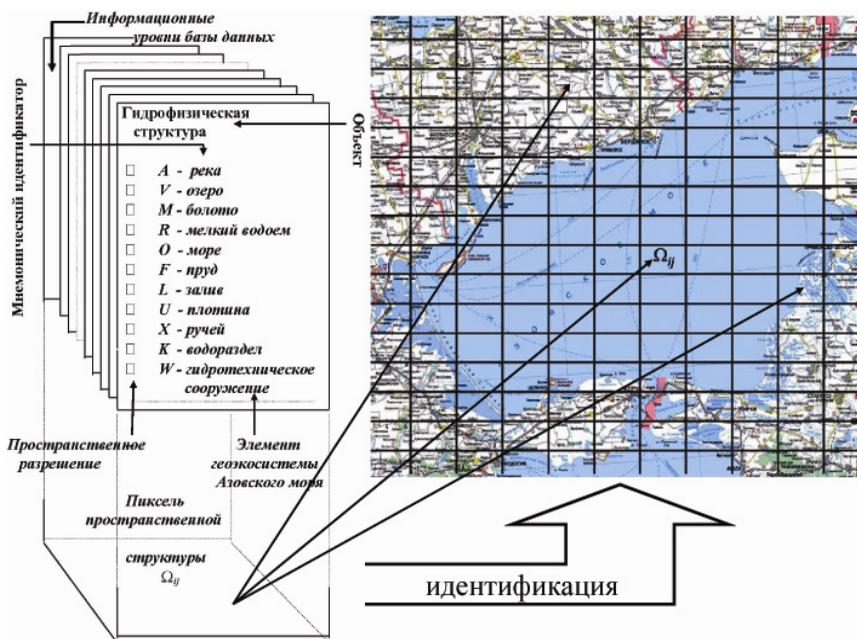


Рис. 7. Информационные уровни базы данных ГИМС и схемы их картографической идентификации на примере Азовского моря.

В зоне невозмущенной дисперсии распределение потока загрязнителя формируется под влиянием однородного и устойчивого слоя:

$$C(\varphi, \lambda, h) = \frac{Q}{2\pi V \sigma_\lambda \sigma_h} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{\sigma_\lambda} \right)^2 \right\} \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h-Z}{\sigma_h} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h+Z}{\sigma_h} \right)^2 \right] \right\}$$

где φ - направление ветра, λ - координата в горизонтальной декартовой системе, h - вертикальная координата, σ_φ и σ_p - горизонтальная и вертикальная дисперсия (рассеивание).

Во второй зоне поведение облака загрязнителя формируется в условиях неустойчивости и поэтому вычисление концентрации загрязнителя требует расширения информационной базы. Обозначим через φ' - подветренное расстояние в пересечении облака и верхней части пограничного слоя, σ' - среднее значение рассеяния на границе между устойчивой и неустойчивой зонами, $p' = [L(\varphi) - Z] / \sigma_h$, $L(\varphi)$ - высота пограничного слоя в подветренном направлении φ . Тогда справедливо соотношение:

$$C(\varphi, \lambda, h) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2}} \int_0^\varphi \frac{1}{\sigma' \sigma_h(V, \varphi, \varphi') V} \exp \left\{ -\frac{(p')^2}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{\sigma'} \right)^2 \right\} \\ \left\{ \exp \left[\frac{-(h-Z)^2}{2\sigma_h^2(V, \varphi, \varphi')} \right] + \exp \left[-\frac{(h+Z)^2}{2\sigma_h^2(V, \varphi, \varphi')} \right] \right\} \frac{\partial p'}{\partial \varphi'} d\varphi'$$

Третья зона имеет свою специфику, связанную с условиями формирования облака загрязнителя. Это облако полностью находится внутри пограничного слоя атмосферы и концентрацию загрязнителя в нем можно рассчитать по формуле:

$$C(\varphi, \lambda, h) = \frac{Q}{2\pi V \sigma_\lambda \sigma_h} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{\sigma_h} \right)^2 \right] \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h-Z}{\sigma_h} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h+Z}{\sigma_h} \right)^2 \right] \right\}$$

для $\sigma_h < 0.47L(\varphi)$;

$$C(\varphi, \lambda, h) = \frac{Q}{\pi V \sigma_\lambda L(\varphi)} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{\sigma_\lambda} \right)^2 \right]$$

для $\sigma_h > 0.8L(\varphi)$. Внутри интервала $0.47 \leq L(\varphi) \leq 0.8L(\varphi)$ концентрация C рассчитывается по интерполяционной формуле между точками $\sigma_h = 0.47L(\varphi)$ и $\sigma_h = 0.8L(\varphi)$.

Гауссовская модель хорошо описывает поля загрязнителя над территориями с масштабами до 100 км. Для больших территорий применяются другие типы моделей.

Подсистема оценки состояния почвенно-растительных покровов

В зоне влияния на Азовское море расположено многообразие природных и природно-техногенных систем. Поэтому подсистема включает средства измерения характеристик земных покровов, алгоритмическое и программное обеспечение, а также технологии синтеза образов почвенно-растительных формаций по совокупности измерений и на основе накопленных в базах данных сведений о них. В результате решаются задачи:

- типизации флористического фона с учетом микрорельефа, типа почвы и ее засоления, увлажнения и степени минерализации почвенного раствора;
- выявления особенностей микро - и макрорельефа, подповерхностных аномалий;
- определения топологии структуры земных покровов;
- индикации состояния лесов, болот, сельскохозяйственных посевов, пастбищ и других биоценозов.

Подсистема оценки состояния водной среды на примере Азовского моря

Водный режим любого моря зависит в основном от притока пресных речных вод, выпадающих над морем атмосферных осадков и поступающих в него соленых вод Черного моря, с одной стороны, и от расхода воды из Азовского моря на испарение и на сток через Керченский пролив в Черное море - с другой. Дон, Ку-

бань и остальные реки, впадающие в Азовское море, приносят 38,8 км³ воды. Средний многолетний объем атмосферных осадков на его поверхности составляет 13,8 км³. Через Керченский пролив ежегодно вливается 31,2 км³ вод Черного моря, кроме того, через пролив Тонкий из Сиваша в море поступает 0,3 км³ воды. Общий приход воды равен всего 84,1 км³. Расход же воды из Азовского моря складывается из испарения с его поверхности 35,3 км³, стока через Керченский пролив в Черное море 47,4 км³ и стока через пролив Тонкий в Сиваш 1,4 км³. Общий расход вод Азовского моря тоже равен 84,1 км³. При малых размерах это море получает сравнительно много речной воды, количество которой составляет около 12% его объема. Отношение речного стока к объему Азовского моря - наибольшее из всех морей земного шара. Превышение поступления речных и атмосферных вод над испарением с поверхности моря повело бы к его нарастающему опреснению и повышению его уровня, если бы не было водообмена с Черным морем. В результате этого водообмена в Азовском море установилась соленость, благоприятная для обитания в нем ценных промысловых рыб. Однако существующий сейчас водный режим Азовского моря будет все больше нарушаться вследствие зарегулирования стока Дона, строительства гидротехнических сооружений и рисовых оросительных систем на Кубани, в связи с увеличением расходов речной воды на водоснабжение растущего населения и развивающейся промышленности.

Подсистема реализует комплексную имитационную модель водного режима региона с учетом сезонной изменчивости поверхностного и речного стока, воздействия снежного покрова, режима осадков и эвапотранспирации (рис. 8). Строится модель динамики качества вод гидрологической сети региона с учетом возможных источников ее загрязнения. Подсистема дает данные для моделей описания функционирования систем *почва-растительность* и *атмосфера-море*. В целом рассмотрение гидрологической сети региона влияния на Азовское море сводится к расчету потоков загрязнителей в морскую среду и последующий расчет их динамики в море. Этот расчет осуществляется с учетом гидрохимических, гидрологических и биологических процессов. В результате прослеживается судьба загрязнителей в водной среде и дается прогноз возможных уровней накопления их в различных компонентах экосистемы в зависимости от внешней антропогенной нагрузки.

Среди загрязнителей, представляющих опасность для экосистемы Азовского моря и населения прилегающих территорий, являются углеводороды нефти, тяжелые металлы и радионуклиды. Для функционирования экосистемы важным является кремний, который играет значительную роль в жизнедеятельности диатомовых водорослей. Тяжелые металлы отличаются тем, что способны длительное время находиться в водоеме, мигрируя из одной формы в другую, сменяя локальные циклы круговорота химических веществ и существенно деформируя биогеохимические циклы других соединений. Попадание нефтепродуктов в море вызывает ряд негативных изменений в экосистеме за счет нарушения газового обмена и снижения продуктивности.

Подсистема оценки уровня экологической безопасности и риска для здоровья населения

Подсистема решает задачи разработки краткосрочных и долгосрочных прогнозов, выдачи данных в звенья управления о состоянии окружающей среды, оповещения о катастрофах, стихийных бедствиях и экологически опасных явлениях.

Осуществляется подготовка рекомендаций по нормализации и оздоровлению экологических ситуаций, а также совершенствованию систем экологической безопасности. Реализуются алгоритмы оценки ущербов для природы, экономической стабильности, здоровья населения, зданий и других сооружений в зависимости от изменений в окружающей среде региона Азовского моря, связанных с естественными трендами метеорологических, биогеохимических, микробиологических, радиологических и др. природных процессов, а также с возникновением стрессовых состояний антропогенного происхождения. Оцениваются показатели биосложности, биоразнообразия, выживаемости и биоприспособленности.

В качестве базовой используется глобальная модель системы *биосфера/общество*, структура реализации которой представлена на рис. 9.

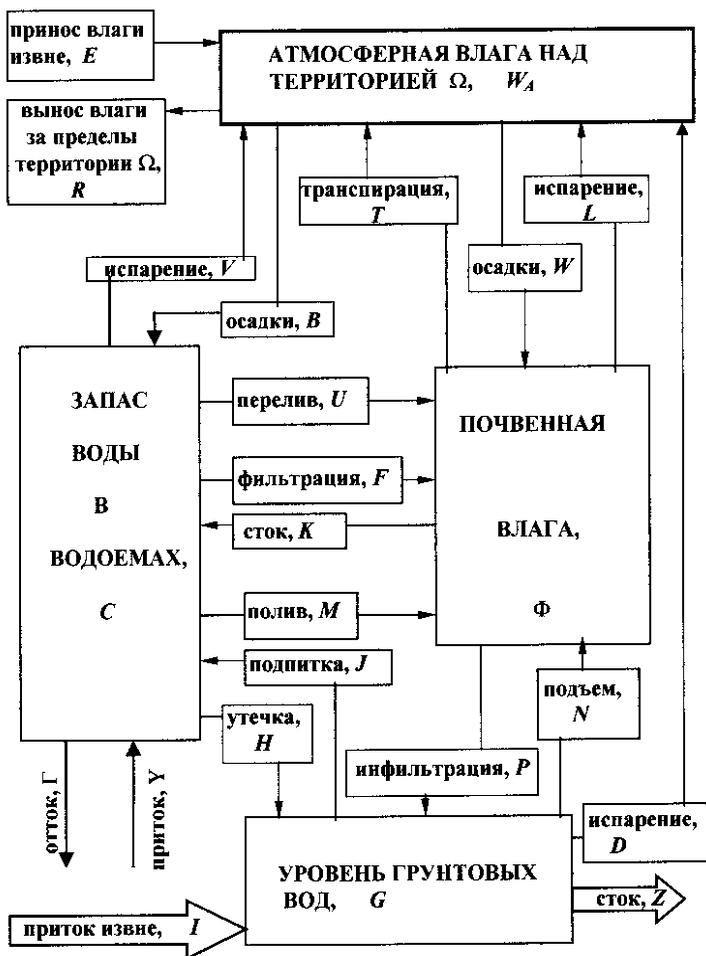


Рис. 8. Блок-схема типовой модели водного баланса в каждом пикселе ограниченной территории.



Рис. 9. Концепция глобального моделирования как средства изучения причинно-следственных связей в окружающей среде и оценки состояния различных ее подсистем.

Подсистема идентификации причин нарушения экологической и санитарной обстановки

Подсистема осуществляет контроль состояния окружающей среды и источников антропогенного воздействия на нее, обеспечивает непрерывное слежение за состоянием и качеством среды обитания, природно-территориальных комплексов и экосистем с учетом ответных реакций биосферы и климата, в том числе изменений состояния здоровья человека. Решается задача выявления источников загрязнения окружающей среды (атмосферы, водоемов, почвы) по данным мониторинга. Определяются координаты источников, их мощности и время возможного незапланированного выброса загрязняющих веществ. Даются динамические характеристики источников загрязнения и выявляются априори неизвестные места выбросов загрязнителей. Определяются направления возможного трансграничного переноса загрязнений через атмосферу и с речным стоком.

Подсистема интеллектуальной поддержки

Подсистема реализует алгоритмы программно-математического обеспечения интеллектуальной поддержки пользователя (оператора) при комплексном анализе объективной информации, формируемой ГИМС. Обеспечивается предметный диалог с системой, позволяющий запрашивать необходимую информацию в

удобном для использования виде, и вносить корректировки в процесс обработки данных.

Формируется база знаний о природных, антропогенных, демографических и социально-экономических процессах на исследуемой территории. Создается библиотека сценариев развития инфраструктуры территории и обеспечивается software для его интерактивного использования. Создается возможность гибкого использования информационных банков с учетом дискретной классификации потоков данных.

Синтез ГИМС базируется на использовании концепции банков данных для реализации непрерывной процедуры информационного обеспечения базовой модели. Построение модели на этом этапе является одной из плохо формализуемых процедур и включает такие этапы выполнения необходимых работ:

- первичное содержательное описание объекта мониторинга;
- формулировка целей исследования;
- содержательный анализ априорной информации об объекте;
- построение математической (формализованной) модели функционирования объекта;
- разработка моделирующего алгоритма;
- синтез пакета software для компьютерной привязки модели;
- верификация модели и оценка ее параметров;
- выбор альтернативных вариантов модели с их адаптацией к структуре имеющихся баз данных;
- разработка сценариев для компьютерных экспериментов с моделью, отражающих цели исследования модели и ее практического использования;
- использование модели в реально функционирующей системе мониторинга.

Построение модели, как элемента ГИМС, связано также с задачей вычленения объекта мониторинга из окружающей среды. На этом этапе важно найти границы, разделяющие собственно объект моделирования и окружающую среду, которая в ГИМС определяется моделью более высокого уровня. Количество этих уровней зависит от многих факторов и, в частности, от типа модели, а также и от пространственного разрешения системы мониторинга. Среди типов моделей наиболее широко используются аналитические, самоорганизующиеся, имитационные, эмпирико-статистические и логико-лингвистические.

Разработка модели функционирования геоэкосистемы требует придания ей многих функций. Среди них наиболее важными являются следующие шесть функций:

- 1) Измерительная функция, которая использует свойство подобия модели и объекта моделирования.
- 2) Описательная функция модели характеризует свойства объекта моделирования в различных его состояниях.
- 3) Интерпретаторская функция описывает границы применимости модели и получаемых с ее помощью решений.
- 4) Объяснительная функция модели - это ее способность интерпретировать данные мониторинга в терминах формального аппарата использованных в модели математических методов.
- 5) Предсказательная функция модели связана с возможностью прогнозирования с заданной точностью по отрывочным данным мониторинга поведение и свойства природной системы для условий, в которых эта система не наблюдалась.

б) Критериальная функция модели позволяет проверять истинность знаний о природной системе или процессе и предполагает возможность экспериментирования над моделью с целью получения новой информации.

Литература

1. Бурков В.Д., Крапивин В.Ф. Экоинформатика: методы, алгоритмы и модели. Изд-во МГУЛ, Москва, 2009, 432 с.

2. Бурков В.Д., Самарцев И.Э., Крапивин В.Ф., Ковалев В.И. Применение технологии гибких информационно-моделирующих систем при создании оптических и волоконно-оптических устройств и метрологических систем в нанотехнологиях // Экологические системы и приборы, 2008, №12, с. 57-63.

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. Крапивин В.Ф., Потапов И.И. Методы экоинформатики. Изд-во ВИНТИ, Москва, 2002, 496 с.

5. Крапивин В.Ф., Шутко А.М. Исследования в области микроволнового мониторинга земных покровов // Пробл. окружающей среды и природных ресурсов, 2002, № 4, с. 44-52.

6. Крапивин В.Ф., Шутко А.М., Иванов Д.С. Новая технология синтеза систем мониторинга окружающей среды // Пробл. окружающей среды и природных ресурсов, 2002, № 4, с. 7-16.

7. Крапивин В.Ф., Шутко А.М., Чухланцев А.А. и др. Информационные системы экологического мониторинга // Экологические системы и приборы, 2004, № 4, с. 3-

8. Krapivin V.F. and Varotsos C.A. Globalization and Sustainable Development: Environmental Agendas: Springer/PRAXIS, Chichester, UK, 2007, 304 pp.

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

10. Krapivin V.F., Nitu C., Varotsos C.A. Remote sensing tools and ecoinformatics. Matrix Rom, Bucharest, Romania, 2019, 332 pp.

11. 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.