

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ И ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

DOI: 10.36535/0235-5019-2020-04-1

УДК 502/504:001.8

ТЕХНОЛОГИЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Канд. физ.-мат. наук **В.Ю. Солдатов**
(Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва)

GEOECOLOGICAL MONITORING TECHNOLOGY

V.Yu. Soldatov

Ключевые слова: ГИС, ГИМС, мониторинг, принятие решения

Key words: GIS, GIMS, monitoring, decision making

Обсуждены информационно-моделирующие и инструментальные средства организации многопрофильного мониторинга окружающей среды. Предложено расширение функций ГИС путем подключения моделей функционирования объектов мониторинга и принятия статистических решений с применением последовательного анализа. Перечислены основные принципы геоэкологического мониторинга. Предложенное расширение функций ГИС основано на рассмотрении подсистем окружающей среды как элементов природы, взаимодействующих через биосферные, климатические и социально-экономические связи с глобальной системой природа/общество. Такой подход обеспечивает максимальный учет прямых и косвенных связей изучаемой системы с глобальной системой климат-биосфера-общество.

Данная работа выполнена по госзаданию № 0030-2015-0195.

Information-modeling and instrumental tools are discussed to be as environment monitoring instruments. Widening of the GIS function is supposed by means of the connection of the models describing the monitoring objects and using decision making sequential procedure. Basic principles of geoecological monitoring are listed. A widening of the GIS functions is proposed on the base of consideration of environmental subsystems as natural elements that interact with global nature-society system through biosphere, climate and socio-economic correlations. Such approach provides maximal taking into account of direct and indirect correlations between studied systems and global climate-biosphere-society system.

Введение

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 дан-

ных, 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 состояния 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. Основной недостаток ГИС - технологии состоит в том, что она не ориентирована на многоплановый прогноз состояния объекта мониторинга.

Важный шаг в развитии ГИС - технологии сделан в работах [1-19], где теоретически обоснована и практически применена ГИМС – технология (рис. 1 и 2). Эта технология устраняет многие недостатки ГИС - технологии и дает возможность синтеза систем мониторинга с функциями прогноза. Обобщенно основная концепция ГИМС - технологии представлена в (Крапивин, Потапов, 2002). Ее ключевым звеном является дистанционное определение с помощью зондирования со спутников максимально возможного числа параметров глобальной модели. Именно такое сочетание эмпирической и теоретической частей ГИМС - технологии позволяет оперативно оценивать текущие и прогнозные изменения окружающей среды в планетарных масштабах.

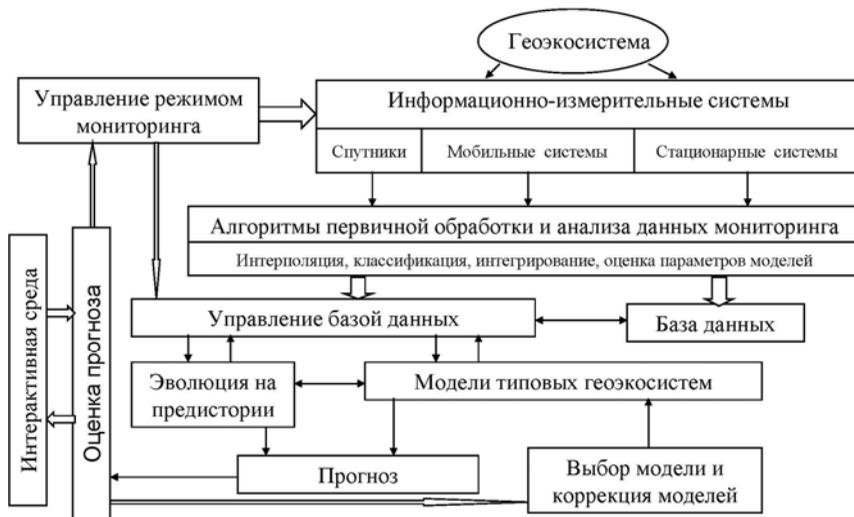


Рис. 1. Концепция адаптивно-эволюционной технологии использования информационно-измерительных систем.

Технология синтеза систем геоэкологического мониторинга (ГИМС-технология)

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 на основе применения единой координатно-временной системы, использования единой системы классификации, кодирования, форматов и структуры данных.

4) Централизация доступа к информации через международные информационные сети с максимальным расширением списка пользователей.

5) Обеспечение межнационального характера глобального геоинформационного мониторинга, не зависящего от несовпадения государственных границ с границами экосистем.

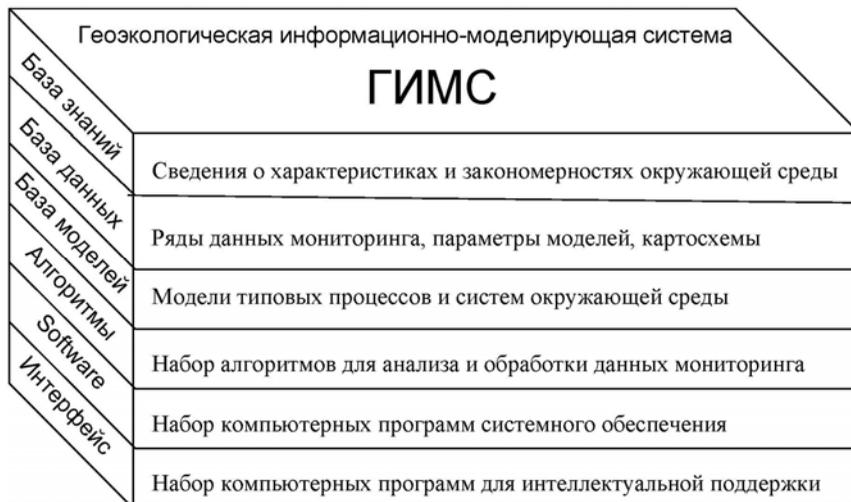


Рис. 2. Архитектура ГИМС.

Состояние природных объектов характеризуется большим разнообразием параметров. Среди них, такие как характеризующие тип почвы и растительности, водный режим территории, солевой состав почво-грунтов, уровень залегания грунтовых вод 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. Она может быть адаптирована к требуемым объектам, таким, например, как богарные земли, поливные площади, заливные и пойменные территории, системы река-бассейн водосбора, река-дельта реки, канал - орошаемая территория, океанская акватория, региональная аквагеосистема, биогеоценоз и другие [2,16]. Некоторые примеры таких систем рассмотрены в [17].

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 с последующими проверками ее адекватности путем сравнения измеренных и рассчитанных состояний изучаемой системы. В зависимости от уровня расхождения этих данных принимается решение о коррекции либо модели, либо режима измерений (частота измерений во времени и размещение измерений в пространстве).

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

ГИМС-технология и мобильные исследовательские платформы дистанционного зондирования

В институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН совместно с другими российскими и зарубежными организациями созданы мобильные платформы дистанционного микроволнового зондирования, которые обеспечивают реализацию функций ГИМС-технологии при решении конкретных задач мониторинга природных и природно-техногенных систем, включая задачи мелиорации, гидрологии, океанологии, экологии и эпидемиологии [2,13,15,16,17]. Например, применение бесконтактной технологии позволяет оперативно получать данные о состоянии влажности почвы, оценивать возможность возникновения критических гидрологических ситуаций и проводить мониторинг состояния гидротехнических сооружений в регионах с повышенной гидрологической опасностью. В частности, ГИМС-технология может обеспечить надежный контроль зон возможного подтопления шоссейных и железнодорожных дорог, а также утечек через дамбы и плотины.

Практическая реализация ГИМС-технологии возможна с применением платформ-носителей сенсоров дистанционного зондирования. Такие платформы были созданы и испытаны в различных регионах земного шара [1,16,17]. На рис. 3 приведен пример такой платформы.

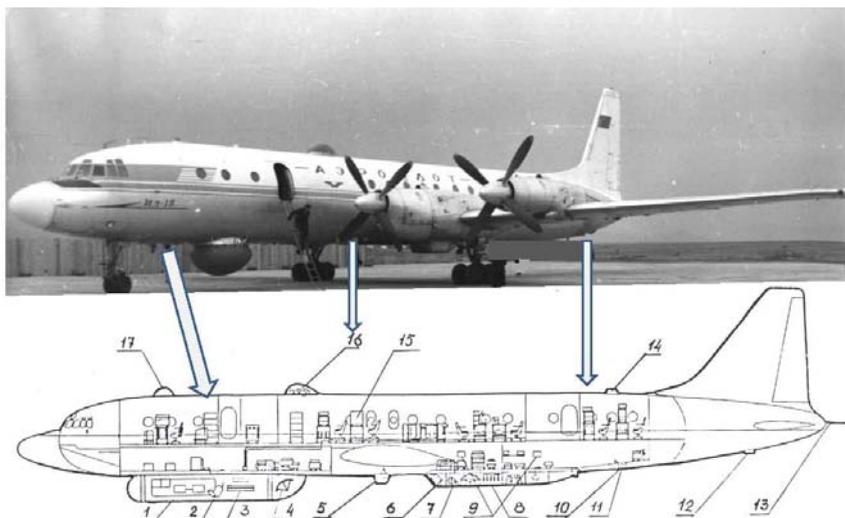


Рис. 3. Схема расположения антенных систем и фотолюков на самолете-лаборатории ИЛ-18 (Бородин и др., 1982, 1987).

Антенны: 1,3 – радиолокаторов с синтезированной апертурой диапазона 2м и 10 см.; 2,6 – трассовых поляриметров диапазона 0.8 и 2.25 см.; 4 – шестиканального сканирующего поляриметра диапазонов 0.8; 1.35 и 2.25 см.; 8 – трассовых радиометров диапазонов 0.8; 1.35; 2.25; 10; 20 и 27 см.; 7,9 – прецизионного высотомера и интерферометра бокового обзора на волне 2.2 см.; 13 – станции подповерхностного зондирования декаметрового диапазона. Фотолюки: 5,10,12 – широкоформатного и кадрового телевидения, аэрофотоаппарата; 11, 14 – аппаратуры миллиметрового диапазона; 16 – трассовых радиометров диапазона 0.8; 1.35 и 2.25 см.; 15 – гравиметрическая и инерциальная аппаратура; 17 – астролюк.

В любом случае получение надежных оценок состояния геоэкологической системы регионального масштаба с помощью этих платформ предполагает наличие априорных данных о геоэкологической системе и проведение синхронных измерений контактными методами. ГИМС-технология обеспечивает восстановление пространственного распределения характеристик геоэкологической системы по данным трассовых и наземных измерений, которые характеризуются фрагментарностью по пространству и эпизодичностью во времени. ГИМС-технология позволяет преодолевать ситуации неустранимой информационной неопределенности, используя для этого методику эволюционного моделирования. Использование оптических сенсоров и технологии спектроскопии позволяет рассчитывать индикаторы качества водных ресурсов, оценивая содержание химических элементов в воде и наличие пятен загрязнителей на водной поверхности.

Глобальные системы мониторинга окружающей среды

Недавно NASA завершило начатое в 1997 г. развёртывание системы наблюдения Земли (**EOS** – Earth Observing System), самого совершенного и всеобъемлющего инструмента определения изменений глобального климата в мире (<http://earthobservatory.nasa.gov>). Система EOS содержит серию спутников (табл. 1), ориентированных на долговременное наблюдение за атмосферой, сушей и океанами.

На протяжении будущего десятилетия NASA и партнеры Агентства по исследованиям будут анализировать данные, полученные с помощью EOS, чтобы охарактеризовать, понять, и спрогнозировать возможность и тенденции изменений в системе Земля, как для научных целей, так и для практического применения. Цель программы EOS - развить научное понимание процессов на планете Земля, её реакций на естественные изменения или на деятельность человека, а также усовершенствовать прогнозирование изменений климата и стихийных бедствий.

Таблица 1.

Перечень некоторых характерных компонентов системы EOS

Система	Характеристика системы
Aqua (EOS PM-1)	<p>Запущена 4 мая 2002 г. для изучения осадков, испарения и элементов глобального круговорота воды. Оснащена сенсорами:</p> <ul style="list-style-type: none"> • AMSR-E для измерения параметров облачности, ТПО, скорости приводного ветра, потока радиационной энергии, характеристик водной поверхности, льда и снега. • MODIS для измерения параметров облаков, аэрозолей, земной поверхности, вулканов, пожаров и потока радиационной энергии. • AMSU-A для измерения температуры и влажности атмосферы. • HSB для измерения содержания влаги в атмосфере. • CERES для измерения радиационной энергии в широком диапазоне спектров.
Aura (EOS CH-1)	<p>Спутник запущен 15 июля 2004 г. на синхронизированную с солнцем орбиту для измерения характеристик озонового слоя и химии атмосферы, а также других параметров климатической системы. Оснащен:</p> <ul style="list-style-type: none"> • HIRDLS для измерения инфракрасного излучения озонового слоя, парами воды, метанов, азотом и CFCs. • MLS для измерения излучения от озона, хлора и других химических элементов. • OMI для формирования двумерных изображений с использованием ультрафиолета и видимой радиации. • TES для измерения тропосферного озона, CO, метана и окислов азота в инфракрасном диапазоне.
GRACE	<p>Спутник запущен 17 марта 2002 г. Оснащен микроволновой дальномерной системой для измерения с высокой точностью (до 10 мкм) расстояния между двумя космическими объектами на полярной орбите.</p>
OSTM (Jason-1,2)	<p>Два океанографических спутника, запущенных 7 декабря 2001 г. и в июне 2008 г. для оценки характеристик океана – уровня в пределах нескольких сантиметров, скоростей течений, запасенном в океане тепле, а также ряда других параметров системы океан-атмосфера (Эль-Ниньо и др.). Оснащены альтиметром и микроволновой дальномерной системой.</p>

OCO	Спутник запущен 24 февраля 2009 г. на близкую к полярной орбиту для глобального наблюдения за круговоротом CO ₂ в атмосфере с оценкой пространственного распределения и мощности его источников и стоков. Оснащен тремя запараллеленными спектрометрами высокого разрешения.
Aquarius	Спутник запущен в мае 2010 г. для измерения солености морской поверхности с покрытием всей земной поверхности за 7 суток. С пространственным разрешением 150 км и точностью до 0,2 ‰.
SMAP	Программа НАСА предусматривает регулярный запуск серии спутников типа Hydros для глобального наблюдения за состоянием элементов водного баланса, включая влажность почв, параметры зон замерзания и оттаивания, характеристики обменных процессов водой и энергией в засушливых зонах и бореальном поясе.
SORCE	Спутник был запущен 25 января 2003 г. для измерения приходящей солнечной радиации с выделением ряда диапазонов: ультрафиолет, видимый, ближний инфракрасный, x-лучи.

Особое место в глобальном мониторинге окружающей среды занимает космическая метеорология, которая является разделом метеорологии, изучающим физическое состояние атмосферы и метеорологические явления с помощью специализированных искусственных спутников Земли. В состав бортовых метеорологических комплексов, установленных на спутнике, обычно входят телевизионные камеры, приёмники инфракрасного излучения для измерения температуры поверхности Земли, океана и облаков, актинометрическая аппаратура для измерения отражённой и излучённой тепловой энергии Земли и атмосферы, спектрометрические приборы для определения вертикального профиля температуры атмосферы. Телевизионные изображения облачности позволяют распознавать и проследживать в глобальном масштабе различные синоптические объекты, такие, как циклоны, воздушные течения и др. Особенно важна спутниковая информация для прогнозирования возникновения, эволюции и перемещения тропических циклонов, для анализа атмосферных процессов, на котором базируются современные методы прогноза погоды. Достоверный прогноз погоды имеет существенное значение для сельского хозяйства, мореплавания, воздушного транспорта и т. п.

Первый российский метеорологический спутник был запущен 28 августа 1964 г., получив наименование «Космос-44». Впоследствии из спутников «Космос-122, -144 и -156» и наземной системы приёма, сбора, обработки и распространения метеорологической информации была образована метеорологическая космическая система «Метеор» (1967). С 1969 г. начались запуски серийных спутников «Метеор».

В 1965 г. впервые в истории метеорологии была получена картина облачного покрова почти над всей земной поверхностью. Заметим, что на спутнике ведется съёмка и в ночное время. При этом следует вспомнить, что наземные наблюдения дают подробные сведения лишь об 1/5 земной поверхности, следовательно, 4/5 остаются освещёнными очень слабо — это поверхность океанов, особенно на севере и юге планеты, горы, внутренние моря и т. д.

Наблюдения за облачностью с Земли охватывают лишь 10—20% всего покрова и зондируют атмосферу до высоты 20—25 км. Метеорологические спутники показывают общее распределение ряда метеорологических элементов всего Зем-

ного шара. Ширина обзора спутника до 1000 км и выше. С помощью телевизионной аппаратуры спутника можно узнать формы и распределение облачности, снежного покрова и ледяных полей в океанах, температуру верхней границы облаков и открытых участков Земли и океанов. На очереди получение информации о зонах выпадения осадков, их интенсивности, распределении очагов грозовой деятельности. Спутники открыли возможность получения качественно новых сведений о состоянии погоды.

В целом роль аэрокосмических методов при изучении СОА принципиальна, поскольку существующие наземные и буйковые метеорологические станции не могут физически обеспечить надежное информационное сопровождение всех процессов в СОА. Особое место здесь занимают геостационарные спутники.

Геостационарные спутники наблюдения за окружающей средой (GOES) вращаются вокруг Земли по геосинхронной орбите со скоростью, соответствующей скорости вращения Земли. Это позволяет им непрерывно наблюдать за одной и той же позицией на поверхности земли. Находясь на высоте 35800 километров (22300 миль) над Землей, например, спутники GOES-8 и GOES-9 обеспечивают информацией о состоянии поверхности Земли и окружающей среды через каждые полчаса.

GOES спутники используются и обслуживаются Национальной океанской и атмосферной Администрацией (НОАА-NOAA), в то время как Национальная администрация по авиации и космическому пространству (NASA) управляет разработкой, созданием и запуском космических кораблей. Запустив спутник, НОАА становится ответственной за его работу.

Первый геостационарный метеорологический спутник (GOES-1) был запущен 16 октября 1975 г. и сразу же стал неотъемлемой частью Национального Бюро Погоды. В течение последних 30 лет, агентства по услугам окружающей среды установили потребность в непрерывных, своевременных и высококачественных наблюдениях за поверхностью Земли и окружающей средой. Новое поколение спутников GOES (GOES от I до M) предоставляет именно такие данные. У этих спутников на борту установлены инструменты, которые позволяют измерять испущенное Землей и отраженное излучение, зная которое можно легко определить атмосферную температуру, скорости ветров, влажность и плотность облаков. GOES-8 и GOES-9 были первыми представителями этого нового спутникового поколения, которые были запущены, заменив орбиты более старых спутников GOES-6 и GOES-7.

Получаемые с помощью GOES данные, которые являются очень точными и представляют собой краткосрочное прогнозирование, затем распространяется Национальным информационным спутниковым центром по окружающей среде (NESDIS) по целому ряду действующих научно-исследовательских центров. Сегодня эти данные используются очень большим числом пользователей.

Системы наблюдения за мировым океаном

Глобальная система наблюдения за океаном (ГСХО) была создана по решению межправительственной океанографической комиссии (МОК) ЮНЕСКО, принятому на 16-й сессии Ассамблеи МОК в 1991 г. (Резолюция XVI-8). Развитие ГСХО осуществляется в сотрудничестве с Всемирной метеорологической организацией (ВМО), Программой ООН по окружающей среде (ЮНЕП) и Международным советом по науке. ГСХО обеспечивает океанический компонент глобальной системы наблюдений за климатом и морской прибрежный компонент глобальной

системы наблюдений за сушей. ГСНО представляет собой программу по формированию глобальной унифицированной международной системы для систематических наблюдений, сбора и распространения океанографических данных, подготовки анализов и прогнозов, и другой продукции в целях обеспечения правительств, отраслей экономики, науки и общественности информацией, необходимой для морской деятельности, включая влияние океана на климат.

Вся акватория Мирового океана разделена на 13 зон для контроля с использованием возможностей всемирных и региональных центров изучения в основном тропических циклонов. Информация об этих центрах представлена в табл. 2.

В основном все перечисленные центры наблюдения за процессами в океанах функционируют под эгидой Всемирной метеорологической организации, программа которой по изучению тропических циклонов имеет пять компонент, так или иначе ориентированных на научные и технические возможности региональных центров.

Глобальная система наблюдения за процессами в океанах (GOOS) ориентирована на решение широкого спектра задач, стоящих в первую очередь перед межправительственной океанографической комиссией ЮНЕСКО (ИОС), а также перед Всемирной метеорологической организацией (ВМО), Программой по окружающей среде ООН (UNEP) и международным советом научных союзов (ICSU). Эта система стратегически нацелена на решение таких важных задач, как:

- координация совместных действий различных международных и региональных организаций по развитию и обслуживанию глобальной системы накопления, архивирования и распределения всех типов данных о состоянии морей и океанов;
- разработка и реализация технологий для получения и анализа данных глобального мониторинга для решения задач сохранения в безопасном для человечества состоянии морей и океанов;
- распространение знаний о морях и океанах в развивающемся мире с ориентацией на его собственные потребности в использовании ресурсов Мирового океана.

Таблица 2.

**Региональные специализированные метеорологические центры
предупреждения о тропических циклонах**

Регион	Зона действия центра	Наименование и принадлежность центра
I-II	Атлантический океан и западные акватории Тихого океана	Национальный США центр ураганов в Майами (RSMC)
III	Центральные акватории Тихого океана	Центр ураганов в Гонолулу (RSMC)
IV	Северо-западные акватории Тихого океана	Японское метеорологическое агентство (RSMC, Токио)
V	Север Индийского океана	Метеорологический департамент Индии (RSMC, Нью Дели)
VI	Юго-запад Индийского океана	Метеорологическое агентство Франции (RSMC, La Réunion)

VII-XI	Юго-запад Тихого океана и юго-восток Индийского океана	VII- Метеорологическое бюро Австралии (TCWC, Perth); VIII- Метеорологическое агентство Индонезии (TCWC, Джакарта); IX- Метеорологическое бюро Австралии (TCWC, Дарвин); X- Метеорологическая служба Папуа Новая Гвинея (TCWC, Port Moresby); XI- Метеорологическое бюро Австралии (TCWC, Brisbane).
XII-XIII	Южные акватории Тихого океана	XII- Метеорологическая служба Фиджи (RSMC, Nadi); XIII- Метеорологическая служба Новой Зеландии (TCWC, Веллингтон).

Структура GOOS включает разнообразные модули, отвечающие за планирование и реализацию предметно ориентированных программ:

- I-GOOS – межправительственный комитет, осуществляющий разработку и исполнение стратегических планов по изучению Мирового океана.
- PICO – подкомитет в рамках GSSC, образованный на 24-й ассамблее ИОС в 2007 г. в Париже и который обеспечивает выполнение программ по вопросам функционирования наземного сектора GOOS.
- GSC – комитет, который отвечает за разработку и использование новых технологий в целях повышения эффективности систем мониторинга Мирового океана.
- OPC – экспертная группа, занимающаяся разработкой рекомендаций по стратегическому планированию исследований Мирового океана.
- GRA – комитет, отвечающий за измерительные подсистемы.
- GPO – комитет, контролирующий инфраструктуру баз данных.
- JCOMM – комитет, занимающийся рассмотрением экспертных и прогнозирующих подсистем.

Структура GOOS имеет две подсистемы регионального уровня ROOS и RCOOS, каждая из которых, как правило, имеет национальный характер. Подсистема ROOS состоит из национальных систем мониторинга океанов и морей, а подсистема RCOOS управляет наземным сектором GOOS. Одним из важных элементов ROOS является ее арктический сектор, который был основан Нансеновским Центром дистанционного зондирования (Норвегия) в 2005 г. Основными компонентами арктической системы мониторинга являются научно-исследовательские суда, плавающие и дрейфующие буйковые измерительные системы, спутники с полярными орбитами. Базовым инструментом обработки получаемых данных измерений являются климатические модели различной сложности. Именно через климатические модели можно проследить корреляционные связи между процессами в Арктике и тропических широтах Мирового океана. В работе [14] показано размещение заякоренных измерительных систем в арктическом бассейне.

Другим большим блоком GOOS является образованная в 1994 г. европейская секция, охватывающая 34 национальных правительственных агентства и исследовательских организаций из 16 европейских стран. Объектом внимания европей-

ского сектора GOOS являются воды Арктики, Балтийского, Черного и Средиземного морей, Бискайский залив, весь северо-западный шельф.

Дистанционное исследование геофизической среды в зонах зарождения ТЦ наряду с решением многих задач эволюции СОА в первую очередь важно для понимания механизмов возникновения первичных форм возмущения и последующего их перехода в развитую форму ТЦ. Ясно, что для решения этой задачи необходимо получать детальные данные о структурных, динамических и термодинамических характеристиках тропического возмущения непосредственно в момент этого перехода. Однако, существующие средства дистанционного мониторинга и их организация не могут удовлетворить это условие в силу малой частоты измерений над данной акваторией. Ведь зарождение ТЦ связано со стохастической природой геофизической среды и, поэтому, любой алгоритм или модель, претендующие на решение задачи прогнозирования ТЦ, должны корректно описывать пространственно-временную изменчивость набора стохастических процессов, которые, так или иначе, влияют на тропический циклогенез.

Критический анализ существующих физических гипотез и теоретических подходов, на основе которых формируются многие космические программы по исследованию физических условий генезиса и эволюции тропических циклонов дан Шарковым [12].

Одним из перспективных, по оценкам Захарова и др. [3], методов дистанционной диагностики СОА является использование спутниковой радиолокации поверхности океана. В этом случае могут быть получены параметры поля ветра (скорость и направление), что позволяет построить и визуализировать поле ветра в конкретной акватории и увидеть начало формирования кольцевых структур с оценкой их радиуса и направления движения. Эти данные могут служить отправной точкой для применения дополнительных средств технического и алгоритмического характера для уточнения и прогнозирования эволюции таких структур. В частности, применение индикатора нестабильности СОА является одним из таких средств [10,11,19]. Спутниковая информация в виде снимков в оптическом диапазоне важна для отслеживания трассы ТЦ и оценки тренда в изменении его интенсивности. Изображения дают информацию о верхней структуре циклона. Спутниковые измерения также позволяют составить карты с отражением направления и скорости ветра над поверхностью океана. Эти карты могут формироваться с помощью ASCAT. Измерения в ИК-диапазоне обеспечивают оценку температуры облаков и приповерхностного воздуха.

Основная система наблюдения за слоем перемешивания в тропических широтах Мирового океана и контроля границы воздух-море размещена на заякоренных буйковых метеорологических станциях. С 1980 г. специалисты NOAA/PMEL и JISAO совместно с учеными других стран создали эту сеть и продолжают ее улучшать и расширять ее возможности во всех трех тропических океанах, обеспечивая оперативное измерение океанических и метеорологических переменных, которые ответственны за фазовое состояние СОА. Глобальная сеть заякоренных буйковых станций GTMBA (Global Tropical Moored Buoy Array) включает (http://www.clivar.ucar.edu/organization/other/images/tao_new.jpg):

- TAO (Tropical Atmosphere Ocean) – сеть заякоренных буйковых станций для контроля атмосферных процессов над тропическими широтами Атлантического океана.

- TRITON (TRIangle Trans-Ocean buoy Network) – сеть заякоренных буйковых станций в тропическом секторе Тихого океана.

- PIRATA (PredIction and Research moored Array in the Tropical Atlantic) – сеть заякоренных буйковых станций в Атлантическом океане, ориентированная на решение задач прогнозирования СОА.

- RAMA (ReseArch Moored Array) – сеть из 46 заякоренных буйковых станций в тропических широтах Индийского океана, созданная для расширения системы GOOS/CLIVAR (Global Ocean Observing System/) и поддержки системы IndOOS (Indian Ocean Observing System). Восемь станций снабжены функцией FRS (Flux Reference Sites), а 24 станции были подготовлены в рамках программы ASCLME (Aguhas and Somali Current Large Marine Ecosystem).

Сеть станций TAO/TRITON была развита в период 1985-1994 гг. в рамках программы TOGA (Tropical Ocean Global Atmosphere) с целью обеспечения оперативными данными задач обнаружения, понимания и предсказания явления ENSO. В настоящее время в этой сети насчитывается 67 поверхностных и 5 подтопленных заякоренных вдоль экватора буев. 12 буев в западной части Тихого океана были созданы Японией. Пять станций были усовершенствованы для измерения падающей длинноволновой радиации и барометрического давления, а также были поставлены дополнительные сенсоры для измерения вертикального распределения температуры воды, солёности и скорости течения. Общая характеристика этих данных дана в табл. 3.

Центральная сеть PIRATA из 10 станций была создана в 1999 г., а заякоренная ADCP было добавлена в 2001 г. и размещена в точке с координатами 0° и 23°W. Сеть теперь имеет 17 долговременных позиций с 4-мя FRS и поддерживается с участием Франции и Бразилии. Южная Африка спонсировала создание одной станции к юго-востоку от PIRATA, но она просуществовала только один год (2006-2007 гг).

Таблица 3.

Перечень параметров СОА, измеряемых станциями сети TAO/TRITON/PIRATA/RAMA и использованных при определении моментов зарождения тропических ураганов

Параметр	Символ	Характеристика параметра
Температура поверхности океана, °С	x_1	Температура измеряется на глубине 1 м или 1,5 м в зависимости от станции с точностью $\pm 0,003^\circ\text{C}$ - $\pm 0,02^\circ\text{C}$.
Скорость ветра (м/с) и его направление (в градусах по часовой стрелке от направления на север)	x_2, x_3	Параметры ветра измеряются на высоте 3,5 м. Скорость ветра измеряется с точностью 3%. Направление ветра измеряется с точностью 5.0°-7,8°.
Осадки (мм/час)	x_4	Осадки регистрируются каждые 10 мин на высоте 3,5 м с точностью $\pm 0,4$ мм/час.
Плотность морской воды (кг/м ³)	x_5	Плотность морской воды автоматически рассчитывается как функция её солёности.
Глубина изотермы 20°С (м)	x_6	Глубина изотермы рассчитывается на основе данных измерений температуры через каждые 20 м путем линейной интерполяции.
Температура воды на фиксированных глубинах $\{h_i\}$, °С	$x_7(h_i)$	Температура воды измеряется до глубины 750 м. На фиксированных горизонтах с точностью $\pm 0,02^\circ\text{C}$.

Продолжение таблицы 3

Относительная влажность атмосферного воздуха, %	x ₈	Влажность воздуха измеряется на высоте 2,2 м от уровня океана с точностью $\pm 2,7\%$.
Атмосферное давление, атм.	x ₉	Атмосферное давление фиксируется на высоте 3 м с точностью $\pm 0,01\%$.
Температура атмосферы, °С	x ₁₀	Температура атмосферы измеряется на высоте 2,2 м над уровнем океана с точностью $\pm 0,2^\circ\text{C}$.
Соленость морской воды, ‰	x ₁₁	Соленость оценивается по данным температуры воды и проводимости с точностью $\pm 0,02\text{‰}$.
Высота волнения, м	x ₁₂	Высота волнения рассчитывается как средняя высота волн за 20-минутный период измерения.
Период преобладающей волны, с	x ₁₃	Этот период соответствует волне с максимальной энергией.
Период средней волны, с	x ₁₄	Этот период определяется усреднением за 20 минут регистрации волнения.
Направление, от которого преобладающая волна начинает движение, градусы	x ₁₅	Направление отсчитывается от севера (0°) к востоку (90°).
Температура точки росы, °С	x ₁₆	Температура точки росы измеряется на высоте измерения температуры атмосферы.
Зона обзора станции, км	x ₁₇	Зона обзора станций может изменяться от 0 до 3 км.

Специалисты JISAO ответственны за контроль качества данных, их планирование и поддержку работоспособности web-сервера, обеспечивающего свободный доступ к данным в реальном времени. Предполагается, что эти данные используются специалистами для своих исследований климата, валидации различных моделей, калибровки спутниковых измерений и решения многих других задач.

GTMBVA, состоящая в настоящее время из подсистем TAO/TRITON, PIRATA и RAMA, поставляет данные как интегральная часть GOOS и GCOS для фундаментальных исследований и понимания глобальной климатической системы. Несмотря на существенный прогресс в развитии этой системы остается множество нерешенных проблем, связанных с расширением возможностей отдельных ее элементов и поддержкой высоких стандартов данных всей глобальной сети.

Методы интерферометрии в задачах оценки геоопасности

Основными компонентами геоопасности являются землетрясения, вулканические извержения, оползни и просадки грунта. Ущерб, наносимые природными бедствиями такого типа, ежегодно оцениваются миллиардами американских долларов. Поэтому во многих странах и на глобальном уровне создаются системы геоинформационного мониторинга с функциями раннего предупреждения о возможной опасности. При этом возникает множество проблем организации своевременной, надежной и недорогой информации, использование которой могло бы повысить эффективность таких систем. К сожалению, в настоящее время отсутствует интегрированный подход к организации потоков необходимой информации, системы контроля фундаментальных геологических процессов недостаточно развиты, информационные системы не обеспечивают должного уровня распространения данных наблюдений и нет глобального механизма оценки геоопасности.

Ясно, что важнейшей задачей является развитие космических и наземных средств мониторинга изменений земной коры, которые являются источниками многих опасных геофизических и геологических процессов, регулярно приводящих практически во всех странах к человеческим жертвам, разрушениям сооружений и изменению локальной топографии. В связи с этим проблема развития высокоточных средств и методов глобального мониторинга геофизических, геодинамических и сейсмических явлений с помощью наземно-космических методов в настоящее время является весьма актуальной. Такие средства предлагает интерферометрия. В частности, в настоящее время существует несколько различных проектов по созданию спутниковых систем предупреждения землетрясений и появления других опасных явлений типа оползней. В космическом агентстве США готовится развертывание обширной сети сейсмических спутников, оснащенных технологией InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar). За ближайшие 20 лет планируется охватить наблюдением все сейсмически опасные зоны Земли.

Основной принцип организации измерений с помощью InSAR основан на измерении интенсивности и временной задержки сигналов обратного рассеивания в микроволновом и радио - диапазонах волн. Интенсивность измеренного обратного рассеяния является функцией ряда параметров окружающей среды, таких как шероховатость поверхности, диэлектрические постоянные, влагосодержание и структура контролируемого пространства. Как правило, геометрия спутниковой интерферометрической системы основана на использовании двух спутников, что позволяет получать изображения объектов с пространственным разрешением, равным единицам метров (8-30 м), а колебания поверхности обнаруживать в пределах нескольких миллиметров. Схематически возможные геометрии измерений представлены на рис. 4 [7-9].

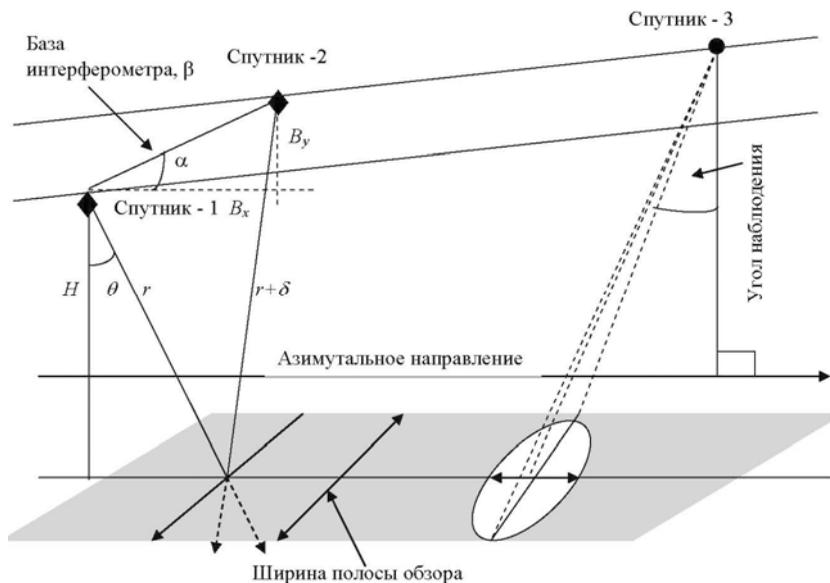


Рис. 4. Геометрия спутниковой интерферометрии.

Так как изображение, полученное с помощью установленного на спутнике радара, имеет фазу φ и амплитуду η , которые характеризуют отраженный сигнал, то топографическая информация может быть получена на основе различия между характеристиками двух изображений одного и того же объекта. Например, изменение поверхности на величину Δ за время между двумя измерениями можно оценить по формуле $\Delta = 0,5\lambda(2\pi)^{-1}(\varphi_2 - \varphi_1)$, где λ - длина волны радара, $\varphi_2 - \varphi_1$ - фаза интерферограммы.

В случае двух-антенного интерферометра высота центра рассеивания излучения радара может быть рассчитана по формуле:

$$\Delta = H - r [\cos \alpha \cos(\theta - \alpha) - \sin \alpha \sin(\theta - \alpha)].$$

Ясно, что эта формула не является абсолютно точной, так как при измерениях всегда присутствуют как систематические ошибки, так и неучтенные изменения фазы отраженного сигнала за счет влияния атмосферы и других факторов. В частности, использование двух антенн в InSAR за счет измерения разности фаз достаточно точно оценивается высота каждого пикселя пространственного разрешения: $\varphi = 2\pi\beta\lambda^{-1}\sin(\theta - \alpha)$, $\Delta = H - r\cos\theta$, где погрешность σ_{Δ}^u , ($u = r, b, H, \varphi$) расчета зависит от уровня неопределенности параметров орбиты спутников. Вклад каждого параметра в эту погрешность оценивается следующими формулами:

$$\sigma_{\Delta}^r = \sigma_r \cos \theta; \sigma_{\Delta}^b = \frac{r(\sin \theta)^2}{\sin(\theta - \alpha)} \sigma_b; \sigma_{\Delta}^H = \sigma_H; \sigma_{\Delta}^{\varphi} = \frac{\lambda r \sin \theta}{2\pi \sin(\theta - \alpha)} \sigma_{\varphi};$$

Наряду с определением высоты поверхности над определенным уровнем или изменения уровня поверхности при повторном зондировании технология InSAR позволяет оценивать наклон местности. Синтез двумерных карт топографического превышения и наклона реализуется с использованием параметров Стокса. Топографическая структура описывается матрицей Стокса обратного рассеивания. В результате комбинирование двух и более радарных изображений одного и того же объекта позволяет оценить его смещение буквально на миллиметры.

Повышение эффективности спутниковой интерферометрии во многом зависит от много-профильности решаемых задач. Ведь в процессе измерений фазы φ и амплитуды η отраженного сигнала с течением времени создаются два информационных ряда: $\{\varphi_i\}$ и $\{\eta_i\}$. На основе этих данных могут быть решены многие задачи оценки топографических и биометрических характеристик земной поверхности, волнения моря, биомассы растительного покрова, толщины снежного покрова и гидрологических параметров ледяного покрова. Но наиболее важной и ответственной задачей является обнаружение аномальных процессов, решение которой требует также снижения ложных тревог. Поэтому процедура принятия решения о возможном возникновении землетрясения, оползня, схода ледника, тропического урагана, провала грунта и т.п. должна иметь высокую надежность.

Приближение момента возникновения чрезвычайной ситуации, безусловно, характеризуется попаданием векторов $\{\varphi_i\}$ и $\{\eta_i\}$ в некоторые кластеры многомерного фазового пространства X_c . Другими словами, переходя от чисто словесных рассуждений к количественному определению этого процесса, введем обобщенную характеристику $I(t)$ окружающей среды и отождествим ее с градуиро-

ванной шкалой Ξ , 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 чрезвычайной ситуации данного типа: $\Xi \rightarrow \rho = f(\Xi)$, где f – некоторое преобразование понятия «чрезвычайная ситуация» в число. В результате величина $\varepsilon = |I(t) - \rho|$ определяет ожидаемый промежуток времени до наступления нежелательного изменения контролируемого объекта окружающей среды.

Попытаемся найти удовлетворительную модель для отображения словесного портрета “чрезвычайная ситуация” в область понятий и признаков, подчиняющихся формализованному описанию и преобразованию. Поскольку измерения $\{\varphi_i\}$ и $\{\eta_i\}$ в общем случае являются случайными последовательностями, то целесообразно под индикатором $I(t)$ понимать показатель нестабильности этих последовательностей. Определим индикатор $I(t)$ следующим образом:

$$I(t_s) = \frac{1}{N+2} \sum_{j=s}^{N+s} \sum_{i=1}^2 \alpha_i(t_j), \quad s = 1, 2, \dots,$$

где N – количество измерений, s – показатель текущего дискретного времени,

$$\alpha_1(t_j) = \begin{cases} 1 & \text{если } \Delta\varphi(t_j) \cdot \Delta\varphi(t_{j-1}) \leq 0; \\ 0 & \text{если } \Delta\varphi(t_j) \cdot \Delta\varphi(t_{j-1}) > 0; \end{cases} \quad \alpha_2(t_j) = \begin{cases} 1 & \text{если } \Delta\eta(t_j) \cdot \Delta\eta(t_{j-1}) \leq 0; \\ 0 & \text{если } \Delta\eta(t_j) \cdot \Delta\eta(t_{j-1}) > 0; \end{cases}$$

$$\Delta\varphi(t_j) = \bar{\varphi}(t_j) - \varphi(t_{j+m+1}); \quad \Delta\eta(t_j) = \bar{\eta}(t_j) - \eta(t_{j+m+1});$$

$$\bar{\varphi}(t_j) = \frac{1}{m} \sum_{i=j}^{m+j} \varphi_i; \quad \bar{\eta}(t_j) = \frac{1}{m} \sum_{i=j}^{m+j} \eta_i;$$

Введение характеристики $I(t)$ позволяет предложить схему мониторинга и прогнозирования чрезвычайных природных ситуаций, представленную в [17].

Эффективность такой системы мониторинга зависит от параметров измерительных технических средств и алгоритмов обработки данных наблюдений. Важную роль здесь играет модель окружающей среды, используемая параллельно с формированием и статистическим анализом ряда $\{I(t_s)\}$ и адаптируемая к режиму мониторинга.

Из введенного выше критерия приближения аномального изменения объекта мониторинга видно, что форма и поведение $I(t)$ 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 состояния гидросети позволяют их предсказывать за несколько суток до реализации. InSAR технология здесь может использоваться как средство повышения надежности обнаружения аномалии. Однако ограниченные возможности оптического диапазона в условиях облачности или растительного покрова следует расширить внедрением систем дистанционного зондирова-

ния в микроволновой области электромагнитного спектра. Тогда дополнительно к указанным индикаторам оползней и селевых потоков можно добавить такие информативные параметры, как влажность почвы и биомасса. Ведь 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 аномалии 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 ее наступления.

Многочисленные примеры применения InSAR технологии показывают ее высокую эффективность из-за пространственного разрешения в пределах десятков метров и практической независимости от состояния атмосферы, что является наиболее важным обстоятельством во всех системах спутникового базирования. Однако изолированное использование InSAR технологии без привлечения дополнительных методов сбора данных об изучаемых процессах и объектах, как показывает опыт многих исследователей, может приводить к неоправданным потерям из-за высокого уровня ложных тревог. Предложенный выше индикатор нестабильности окружающей среды и схема его применения позволяют значительно снизить вероятность ложных тревог. В дальнейшем следует рассмотреть его применение к изучению уже произошедших чрезвычайных событий типа землетрясений, оползней и ураганов и на этой основе оптимизировать значения параметров m и N , а также создать универсальную объектно ориентированную структуру кластерного пространства.

Принятие статистических решений в системах мониторинга окружающей среды

Режим мониторинга окружающей среды может предусматривать ситуации принятия решений в реальном времени на основе накопленной до момента принятия решения информации или в результате анализа фрагментов базы данных без привязки к текущему времени. Статистический анализ рядов событий, которыми сопровождается функционирование системы мониторинга может быть осуществлен многочисленными методами, применимость которых в каждом случае определяется совокупностью вероятностных параметров, характеризующих изучаемое явление. Однако нестационарность и параметрическая неопределенность в ситуациях, когда каждое измерение требует больших усилий и затрат средств, заставляет искать новые методы принятия решений на основе фрагментарных во времени и отрывочных по пространству данных измерений.

С развитием альтернативных методов принятия статистических решений задача поиска объективных оценок параметров происходящих в окружающей среде процессов получила новое обоснование. Представляется возможным рассмотреть и сравнить два подхода к этой задаче: классический, основанный на процедуре априорного ограничения числа наблюдений, и последовательный анализ, бази­рующийся на процедуре пошагового принятия решения. Развитие компьютерных

технологий позволяет реализовать оба подхода в виде единой системы принятия статистических решений [17].

Классическая процедура принятия статистических решений по методу Неймана-Пирсона основывается на заранее фиксированном числе n измерений, задаваемом из априорных предположений о вероятностном характере ряда наблюдений $X = \{x_1, \dots, x_n\}$. При этом принятие одной из гипотез H_0 или H_1 основывается на построении границы оптимальной критической области E_1 в форме гиперповерхности

$$L_n = L_n(x_1, \dots, x_n) = f_{a1}(x_1, \dots, x_n) / f_{a0}(x_1, \dots, x_n) = C \quad (1)$$

где $f_a(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n f_a(x_i)$ - плотность распределения вероятностей для переменной x с неизвестным параметром a ; C - постоянная величина, выбираемая из условия, чтобы E_1 имела определенный уровень ошибки первого рода α .

Отношение (1), называемое коэффициентом правдоподобия, служит ключом к окончательному выбору между гипотезами:

- 1) если $L_n \leq C$, то принимается гипотеза H_0 ;
- 2) если $L_n > C$, то принимается гипотеза H_1 .

Содержание и смысловая нагрузка гипотез H_0 и H_1 зависит от конкретной задачи. В реальных экспериментах на основе выборки $\{x_i\}$ строится эмпирическое, а затем непрерывное распределение $F(X)=f(x)$, но при предположении о неопределенности одного или нескольких значений параметра. Как правило на основе одного из критериев согласия выбирается конкретный вид распределения и по измеренным значениям $\{x_i\}$ оцениваются его параметры.

Для методов Неймана-Пирсона и последовательного анализа возможно построение оперативных характеристик для принятия решений без конкретизации вида плотности $f_a(x)$. Для этого рассмотрим случай однородной независимой выборки, когда выборочные значения x_i ($i = 1, \dots, n$) являются независимыми реализациями одной и той же случайной величины ξ с плотностью $f_{a0}(x)$ при гипотезе H_0 и плотностью $f_{a1}(x)$ при гипотезе H_1 . При этом параметр a истинной плотности $f_a(x)$ может не совпадать с a_0 или a_1 . Показано, что имеют место следующие соотношения для ошибок первого и второго рода (α и β):

$$\alpha \approx \exp[-0,5 \{(E_{a1}\xi - E_{a0}\xi)(D_{a0}\xi)^{-1/2}\}^2 n], \quad \beta \approx \exp[-0,5 \{(E_{a1}\xi - a_0\xi)(D_{a1}\xi)^{-1/2}\}^2 n],$$

где

$$E_a \xi = \int_{-\infty}^{\infty} \ln [f_{a1}(x) / f_{a0}(x)] f_a(x) dx$$

$$D_a \xi = \int_{-\infty}^{\infty} \{\ln [f_{a1}(x) / f_{a0}(x)]\}^2 f_a(x) dx - (E_a \xi)^2$$

В случае последовательной процедуры оперативная характеристика имеет вид: $L(a) \approx [A^{h(a)} - 1] / [A^{h(a)} - B^{h(a)}]$, где $h(a)$ является корнем уравнения:

$$\int_{-\infty}^{\infty} [f_{a1}(x) / f_{a0}(x)]^{h(a)} f_a(x) dx = 1$$

A и B - два порога для коэффициента правдоподобия $L_n(x)$, для которых справедливы оценки [1]: $B \approx \beta / (1 - \alpha)$, $A \approx (1 - \beta) / \alpha$. В соответствии с этим, как и в классическом алгоритме $L(a_0) = 1 - \alpha$, $L(a_1) = \beta$. Отсюда следует, что среднее число наблюдений в последовательном анализе можно оценить величиной:

$$E_a v = [(1 - \alpha) \ln[\beta / (1 - \alpha)] + \alpha \ln[(1 - \beta) / \alpha]] / E_a \xi, \text{ при } a = a_0;$$

$$E_a v = [\beta \ln[\beta / (1 - \alpha)] + (1 - \beta) \ln[(1 - \beta) / \alpha]] / E_a \xi, \text{ при } a = a_1 \quad (2)$$

При значении $a = a^*$, когда $E_a \xi = 0$ и $E_a \xi^2 > 0$ имеем

$$E_a v \approx [- \ln[\beta / (1 - \alpha)] \ln[(1 - \beta) / \alpha] / E_a \xi^2 \quad (3)$$

Согласно (2) и (3) в последовательной процедуре число наблюдений для вынесения решения является случайной величиной v , среднее значение которой $E_a v$ может быть меньше или больше n . Чтобы судить о возможных значениях v , необходимо знать распределение $P\{v=n\} = P_a$, для которого Башаринов и Флейшман [1] нашли выражение:

$$E_a v \cdot P_a(n) = W_c(y) = c^{1/2} y^{-3/2} (2\pi)^{-1/2} \exp[-0.5c(y + y^{-1} - 2)], \quad (4)$$

где

$$0 \leq y \leq n \mid E_a \xi \mid < \infty, \quad c = K \mid E_a \xi \mid / D_a \xi = (E_a v)^2 / D_a v > 0,$$

$$D_a v = K D_a \xi / (E_a \xi)^3, \quad E_a v = K / E_a \xi,$$

$$K = \begin{cases} \ln A & \text{при } E_a \xi > 0, \\ \ln B & \text{при } E_a \xi < 0 \end{cases}$$

Функция распределения (4) в русскоязычной литературе получила название распределения Вальда:

$$W_c(x) = \int_0^x w_c(z) dz, \quad (5)$$

где $w_c(z) = (c/2\pi)^{1/2} z^{-3/2} \exp[-0.5c(z + z^{-1} - 2)]$.

Универсальность распределения Вальда следует из его двойственности нормальному распределению:

$$W_c(x) = \Phi[(x-1)(c/x)^{1/2}] + \Phi[-(x+1)(c/x)^{1/2}] \exp\{2c\}, \quad (6)$$

где

$$\Phi(x) = 1/(2\pi) \int_{-\infty}^x \exp\{-t^2/2\} dt.$$

Заметим, что в случае если $|E_a \xi|$ и $|D_a \xi|$ малы по сравнению с $\ln A$ и $\ln B$, то распределение относительной величины $v/E_a v$, определенное выражением (4), будет хорошо аппроксимировать реальное распределение этой величины, даже если ξ распределена не по нормальному закону.

Теоретические построения относительно универсальности распределения (5) важны для общей оценки эффективности последовательной процедуры принятия решений, что детально выполнено в работе Башаринова и Флейшмана [1]. Однако эти построения не являются важными при практическом использовании распределения Вальда. Поэтому синтез системы автоматизации принятия решений, как блока ГИМС, осуществлен без учета корреляции (6). Это сделано в связи с тем, что в реальности часты случаи, когда число наблюдений оказывается малым и эффект ассимптотической нормальности не срабатывает. Возникающая при этом ситуация разрешается принятием решения либо по процедуре эволюционного алгоритма, либо в соответствии с алгоритмом принятия решения в условиях ограниченного объема данных.

Схема организации наблюдений в условиях применения последовательного анализа отличается от классического варианта. Принятие решения об обнаружении того или иного эффекта в процессе непрерывного мониторинга окружающей среды зависит от схемы организации измерений. Классический подход ориентирует систему наблюдения на сбор фиксированного объема данных, после реализации которого осуществляется их обработка с целью выявления определенных эффектов или свойств в изучаемом пространстве. Методика последовательного анализа не разделяет эти этапы, а чередует их. Другими словами обработка данных мониторинга осуществляется после каждого измерения. Отсюда видно, что алгоритмическая нагрузка в последовательной процедуре динамически изменяется, в то время как в классическом случае обращение к методикам обработки данных осуществляется на завершающем этапе. С точки зрения формирования структуры адекватной автоматизированной системы принятия решений эти подходы следует реализовывать в виде отдельных блоков, выбор между которыми должен осуществляться в режиме диалога с оператором ГИМС. Решение оператора может меняться в динамике мониторинга, однако для этого от него требуется высокий профессионализм. Поэтому в структуре системы принятия решений действия оператора сводятся к управлению параметрами n , α и β .

Литература

1. Башаринов А.Е., Флейшман Б.С. Методы статистического последовательно-го анализа и их приложения. М.: Сов. Радио. 1962. 352 с.
2. Верба В.С., Гуляев Ю.В., Шутко А.М., Крапивин В.Ф. СВЧ-радиометрия земной и водной поверхностей: от теории к практике. София: Академическое Изд-во им. Проф. Марина Дринова, 2014. 296 с.
3. Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов В.М. Спутниковый мониторинг Земли: радиолокационное зондирование поверхности. М.: УРСС, 2011. 218 с.
4. Крапивин В.Ф., Кондратьев К.Я. Глобальные изменения окружающей среды: экоинформатика. СПб: Изд-во СПб гос. ун-та, 2002. 724 с.
5. Крапивин В.Ф., Мкртчян Ф.А., Шутко А.М. ГИМС-технология и мобильные исследовательские платформы дистанционного зондирования // Экологические системы и приборы, 2015. № 1. С. 10-17.

6. Крапивин В.Ф., Потапов И.И. Методы эоинформатики. М.: ВИНТИ, 2002. 496 с.
7. Потапов И.И., Крапивин В.Ф. Моделирование глобального цикла азота // Экологические системы и приборы, 2010. № 9. С. 45-53.
8. Потапов И.И., Крапивин В.Ф., Солдатов В.Ю. Оценка риска в режиме геоинформационного мониторинга // Экологические системы и приборы, 2006. № 8. С. 11-18.
9. Потапов И.И., Назарян Н.А., Солдатов В.Ю. Предсказание землетрясений с помощью методов техники InSAR // Экологические системы и приборы, 2008. № 1. С. 60-62.
10. Солдатов В.Ю. Многофункциональная информационно-моделирующая система для гидрофизических исследований // Кандидатская диссертация. М.: ИРЭ РАН, 2011. 150 с.
11. Солдатов В.Ю. Диагностика физических явлений и процессов в гидрофизических системах // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2014. № 5. С. 50-57.
12. Шарков Е.А. Спутниковые исследования тропического циклогенеза: особенности и достижения современного этапа // В сб. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2010. С. 29-48.
13. Шутко А.М., Крапивин В.Ф. Оперативная диагностика, оценка масштабов и уменьшение последствий стрессовых природных процессов. София: Академическое издательство им. Проф. Марина Дринова, 2011. 287 с.
14. Dickson R.R. The integrated Arctic Ocean Observing System (iAOOS): an AOSB CliC Observing Plan for the International Polar Year // Oceanologia, 2006. V. 48. Nr. 1. P. 5-21.
15. Haarbrink R., Krapivin V.F., Krisilov A., Krisilov V., Novichikhin E.P., Shutko A.M., Sidorov I. Intelligent data processing in global monitoring and security. Sofia-Kiev: ITHEA, 2011. 410 pp.
16. Krapivin V.F., Shutko A.M. Information technologies for remote monitoring of the environment. Chichester U.K.: Springer/Praxis, 2012. 498 pp.
17. Krapivin V.F., Varotsos C.A., Soldatov V.Yu. New Ecoinformatics Tools in Environmental Science: Applications and Decision-making. London: Springer, 2015. 903 pp.
18. Soldatov V.Yu. (2014) Detection of tropical cyclones in their earlier stage // Proceedings of the XXI International Symposium "Ecoinformatics Problems" (with the School-Seminar for Young Scientists). 2-4 December 2014, Moscow. Moscow: The Russian Sciences Engineering A.S. Popov Society for Radio, Electronics and Communication. 2014. P. 18-23.
19. Soldatov V.Yu. (2015) Remote sensing monitoring of the atmosphere-ocean system as generator of tropical cyclones // Proceedings of the 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice. 15-19 February 2015. Mombetsu, Hokkaido, Japan. Mombetsu, Hokkaido, Japan: The Okhotsk Sea & Cold Ocean Research Association, 2015. P. 199-202.