

Министерство образования и науки Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

*На правах рукописи*

Александрова Лидия Владимировна

**ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ И КОНЦЕПЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО  
МОНИТОРИНГА ПРИБРЕЖНЫХ РЕГИОНОВ НА ПРИМЕРЕ  
ФИНСКОГО ЗАЛИВА**

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Специальность: 25.00.35 – Геоинформатика

Санкт-Петербург 2014

Работа выполнена на кафедре информационных технологий и систем безопасности  
Российского государственного гидрометеорологического университета

*Научный руководитель:*

доктор технических наук, профессор  
Митько Валерий Брониславович  
Российский государственный  
гидрометеорологический университет

*Официальные оппоненты:*

доктор технических наук, профессор  
Илюхин Виктор Николаевич  
Государственный  
научно-исследовательский  
навигационно-гидрографический институт

кандидат технических наук,  
Веремьев Владимир Иванович,  
Научно-исследовательский институт систем  
прогнозирования и мониторинга  
чрезвычайных ситуаций «Прогноз» (НИИ  
«Прогноз»)

*Ведущая организация:*

Институт озероведения РАН

Защита состоится «29» апреля 2014 года на заседании диссертационного  
совета ДС 212.197.03 в Российском государственном гидрометеорологическом  
университете по адресу: 195196, Санкт-Петербург, пр. Металлистов, д.3, аудитория 406

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного  
гидрометеорологического университета по адресу: г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр-  
т, д. 98

Автореферат диссертации разослан «    »                      2014 года

Ученый секретарь диссертационного совета  
Доктор географических наук, доцент



Попова Е.С..

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность темы*

Интенсивное развитие прибрежной зоны требует наличия системы комплексного мониторинга, которая могла бы использоваться как при планировании стратегии развития и управления прибрежной зоны, так и для наблюдения за экосистемой и решения проблем, связанных с антропогенным влиянием на окружающую среду. В данной области существуют международные нормы, направленные на сохранение природных экосистем и биоразнообразия, а именно – Рамочная директива морской стратегии ЕС (MSFD), присоединение к которой предполагает в том числе наличие комплексного мониторинга, направленного на получение данных по всем необходимым параметрам, описывающим морскую экосистему. Также в России создается и развивается система комплексного освещения обстановки в Арктическом и Балтийском регионах с целью формирования единого информационного пространства систем государственного и военного управления Российской Федерации путем интеграции информационных ресурсов, систем и средств мониторинга обстановки различного ведомственного подчинения. И в первом и во втором случае существует необходимость в системе комплексного мониторинга гидрофизических, гидробиологических, гидрохимических параметров.

Подобные исследования требуют большого количества информации с географической привязкой из различных источников. Все вышеизложенное является основанием для проведения исследований, направленных на разработку концепции комплексного мониторинга прибрежной зоны с использованием ГИС.

### *Состояние исследования проблемы*

Необходимость в комплексном мониторинге экосистемы в том числе с использованием геоинформационных систем привело к интенсивной разработке многих аспектов этой области. Применительно к рассматриваемому направлению можно указать на работы в области объектно-ориентированных геоинформационных систем работы РГГМУ (Бескид П.П., Куракина Н.И., Истомин Е.П.), лаборатории объектно-ориентированных ГИС СПИИРАН (Попович В.В., Ивакин Я.А.), УНЦ «ГИС технологии» ЛЭТИ (Алексеев В.В., Куракина Н.И.), в области методологии оценки рисков работы СПбГПУ (Гуменюк В.И., Яковлев В.В.), в области развития комплексных систем наблюдения морских объектов работы ГНИНГИ (В.Н. Илюхин), в области экологических аспектов оценки характеристик водных объектов работы СПбГУ (Погребов В.Б., Дмитриев В.В., Третьяков В.Ю.), РГГМУ (Шилин М.Б., Шелутко В.А., Фрумин Г.Т., Скакальский Б.Г.), СПбГУРП (Шишкин А.И., Епифанов А.В.), Института озераведения РАН (В.А.

Румянцев, С.А, Кондратьев), НИИ в области гидродинамического моделирования РГГМУ и ИО РАН (Неелов И.А., Рябченко В.А., Еремина Т.Р., Ванкевич Р.Е.). Из зарубежных исследователей следует указать на работы Tsanis, I. K., Boyle S., M. F. Goodchild, L. T. Steyaert, Goodwin, H., Palerud, R. , а также на работы, представленные на ежегодной конференции «Неделя воды» в Стокгольме, Швеция, «День Балтийского моря» в Санкт-Петербурге и др.

На данный момент сложно с уверенностью говорить о комплексности текущей системы мониторинга экосистемы Финского залива и Ладожского озера, существующие модели и системы обеспечивают данными, как правило, лишь по нескольким из необходимых параметров.

В такой постановке, по мнению автора, задача решается впервые.

**Основной целью** работы является разработка способов достижения требований директивы MSDF и отечественной системы освещения обстановки с помощью концепции комплексного мониторинга Финского залива с использованием методики геопространственного анализа.

**Указанная цель достигается решением ряда задач**, основными из которых являются следующие:

- определение основных параметров, требуемых в рамках мониторинга, и способов их получения и анализа;
- уточнение концепции комплексного мониторинга с учетом влияния среды и технических характеристик средств, составляющих ее основные элементы, выявление технических факторов, наиболее существенно влияющих на эффективность функционирования системы, с оценкой ее адекватности содержанию решаемых задач;
- разработка модели комплексного мониторинга с использованием геопространственного анализа;
- разработка рекомендаций по усовершенствованию модели и ее рациональному использованию с учетом имеющихся технических средств;
- обоснование целесообразности внедрения разработанных предложений.

Основной задачей работы является уточнение концепции и разработка модели комплексного мониторинга экосистемы для достижения требований директивы MSDF и с использованием в отечественной системе комплексного освещения обстановки с учётом международных критериев и наличия технических средств.

**Основными методами и инструментами исследований** являлись анализ и обобщение данных, формирование базы данных в геоинформационной системе,



аналитический расчёт, алгоритмизация и программирование, имитационное моделирование и статистический анализ. Основным инструментом реализации указанных методов явилось применение общей теории статистических решений, объектно-ориентированное моделирование, машинный эксперимент и сопоставление его результатов с данными, полученными в ходе исследования. Разработанные модели, алгоритмы и методики программно реализованы на персональном компьютере с использованием ГИС ArcView.

***Общая методика выполнения*** исследований включает в себя:

- анализ и обобщение результатов исследований по отечественным и зарубежным источникам;
- обобщение результатов работ, посвященных вопросам комплексного мониторинга морских экосистем;
- уточнение концепции и разработка модели системы комплексного мониторинга прибрежной зоны с учетом особенностей среды и технических характеристик средств, используемых для получения данных по основным параметрам, выявление технических факторов, наиболее существенно влияющих на эффективность функционирования системы;
- поиск способов улучшения качества модели и расширение потенциальных областей ее применения с помощью доработки методики вывода данных;
- экспериментальная проверка разработанной модели и концепции комплексного мониторинга Финского залива.

***На защиту выносятся:***

- Уточненная концепция комплексного мониторинга на примере района восточной части Финского залива с учетом потенциально доступных технических средств мониторинга и анализа данных.
- Геоинформационная модель комплексного мониторинга, учитывающая требования MSFD и отечественной системы освещения обстановки.
- Онтология ГИС с возможностью визуализации и анализа данных, распределенных по пространству и по глубине, а также временных рядов.

Их существо, научная новизна, практическая значимость и достоверность изложены в главах диссертации.

***Научная новизна результатов исследований*** заключается в уточнении объектно-ориентированной концепции и разработке модели комплексного мониторинга прибрежных экосистем на основе ГИС:

– в рамках уточнения концепции мониторинга прибрежной зоны предложено использовать децентрализованную структуру баз данных, позволяющую более эффективно организовать работу с данными в отличие от единой, централизованной базы, как в текущем варианте концепции комплексного мониторинга,

– впервые разработана геоинформационная модель комплексного мониторинга прибрежной зоны, позволяющая учитывать трехмерную структуру морской толщи и получать и анализировать информацию в 3D режиме, что обеспечивает повышение адекватности представления обстановки и оперативность обработки геоданных.

– впервые разработана геоинформационная система комплексного мониторинга прибрежной зоны, включающая численную модель, интегрированную методом интерфейсов, базу данных с соответствующей структурой, компоненты пре- и пост-процессинга данных, визуализации и анализа данных.

**Теоретическая значимость исследований** состоит в дальнейшем развитии логико-вероятностных и логико-статистических методов объектно–ориентированного моделирования структурно-сложных информационных систем.

К основным **практическим** результатам можно отнести частичную практическую реализацию рассмотренной концепции комплексного мониторинга в виде базы данных и геоинформационной системы, позволяющих осуществить анализ, обобщение и оценку данных по различным океанологическим, гидробиологическим и гидрохимическим параметрам, которые обуславливают определенное состояние экосистемы.

**Достоверность** результатов исследования, выводов и рекомендаций обеспечивается внутренней непротиворечивостью результатов исследования данным в литературных источниках и экспертным оценкам; корректным применением современных методов математико-статистической обработки и численного моделирования; апробацией результатов исследования на научно-практических конференциях, семинарах и в НИР.

**Результаты исследований были** использованы при выполнении работ в рамках НИР «Мировой океан», НИР «Технологическая платформа».

**Апробация результатов** проводилась на всероссийских и международных конференциях, научно-технических совещаниях и семинарах. Результаты исследований опубликованы в работах автора, включающих научные статьи, тезисы докладов и отчёты по НИР.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 8 работ (1.5 печатных листов) в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК.

**Объем и структура работы.** Работа объемом 154 страницы состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 92 наименования, содержит 50 рисунков, 6 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация включает введение, четыре раздела и заключение.

**Во введении** обосновывается актуальность темы, формулируется проблема и решаемая задача, определяется содержание научных исследований в интересах народно-хозяйственных задач, вытекающих из необходимости выполнения предписаний директивы MSFD.

**В главе 1** представлены основные требования директивы MSFD, обсуждаются пути их выполнения. В качестве основного пути предполагается уточнение концепции комплексного мониторинга и разработка геоинформационной модели мониторинга с потенциальной интеграцией впоследствии с европейскими системами мониторинга морских экосистем. Обобщаются данные по существующим концепциям и моделям комплексного мониторинга, как в России, так и за рубежом. Рассматриваются также методы мониторинга, платформы мониторинга, способы хранения и обработки данных, достоинства и недостатки некоторых платформ мониторинга, производится учет местных особенностей региона Финского залива и Ладожского озера.

Уточненная концепция, схематичное представление которой отображено на рисунке 1, призвана решать вопросы формирования единого информационного поля,

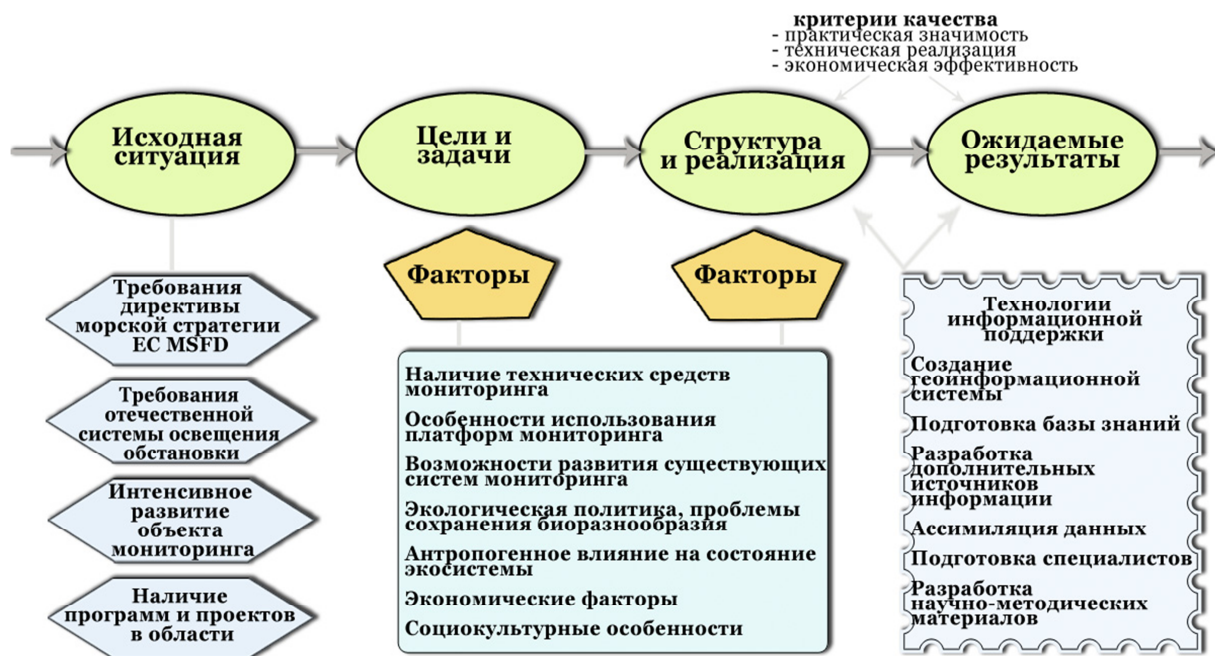


Рисунок 1 – Схематичное представление концепции комплексного мониторинга прибрежных регионов

унификации и гармонизации подходов к сбору, хранению и последующих анализу и оценке полученных данных, обеспечения процесса устойчивого обмена информацией заинтересованных пользователей, а также совместную работу междисциплинарных команд специалистов из разных стран и регионов, в том числе в рамках выполнения директивы MSFD.

Суть данной уточненной концепции и её основное отличие от уже существующих в структуре и реализации, а именно – в использовании разнообразных платформ мониторинга, применимых для условий Финского залива и Ладожского озера и позволяющих получать оперативные данные наблюдений на постоянной основе и в рамках экспедиционных кампаний, данных численного моделирования, и последующем объединении этих данных с помощью СУБД на основе модели распределенных баз данных (рисунок 2) и анализом с использованием методик ГИС.

Данные мониторинга передаются в специализированные базы данных и могут быть доступны как в реальном времени (с оперативных платформ, без обработки), так и с определенной задержкой.



Рисунок 2 – Схема распределенных баз данных

К достоинствам такой организации по сравнению с единой централизованной системой относятся возможность получения актуальной информации, более высокая степень надежности связи ввиду отсутствия единого банка данных и множественных связей, возможность оперативной реакции на проблему, возможность создания новых модульных структур по шаблону без затрат на проектирование.

При создании распределенной системы баз данных, предполагается их однородность, которая позволит избежать необходимости трансляции запросов на языках разных СУБД, использование реляционных СУБД с языком запросов SQL, который

позволит параметризовать и унифицировать все действия с базами данных, возможность распараллеливания обработки данных на конкретных узлах.

Для определения преимуществ распределенных баз, были проведены тесты в ходе которых выявлено, что в случае централизованной базы при запросах больших объемов данных, во время которых нагрузка на диск увеличивается до 90 %, в отдельных случаях может блокироваться запись новых данных. При увеличении нагрузки, выше средней на 12 % – время задержки ответов от базы данных увеличивалось на 30 %, при увеличении нагрузки на 15 % – до 39.8 %. Увеличение нагрузки на 25 % в 28 из 50 тестов приводило к необходимости остановки работы базы данных и последующего выполнения процедуры восстановления. Минимальное время восстановления базы составило 49 минут, при этом среднее – 154 минуты.

При использовании распределенной базы данных при проведении 100 тестов по увеличению нагрузки до 90 % от средней – произошло только 4 случая задержки и один отказ, не приведший к необходимости восстановления. Внедрение фильтрации на хранение наиболее часто запрашиваемой информации оптимизирует процесс обмена в 2.4 раза. При переносе времени реплицирования на время наименьшей нагрузки – в 3.7 раза. Максимальная оперативная нагрузка на жесткие диски не достигает пиковой, что позволяет увеличить срок работы дисков от 2.5 до 3 лет.

Необходимый уровень резервирования базы данных предотвращающий потерю уникальных данных в случае выхода из строя оборудования.

С использованием глобальной схемы или/и тиражирования выбранных данных могут формироваться необходимые для конкретных задач, для конкретного пользователя, выборки данных, в том числе, база данных для ГИС.

ГИС является потенциально эффективным средством оценки ситуаций с уровнем загрязнений прибрежной зоны восточной части Финского залива близким к критическому или критическим.

Для создания геоинформационной системы требуется разработка инфологической модели.

**В главе 2** на основе предложенной концепции построения комплексного мониторинга производится обоснование оптимальной структуры геоинформационной модели комплексного мониторинга прибрежной зоны (рисунок 3), разработка ее основных частей, обоснование выбора используемой базы данных, ее структура и методы визуализации информации.

Модель строится для обеспечения мониторинга Финского залива и Ладожского озера. Рассматриваются основные принципы организации пространственных данных в ГИС, проблемы анализа нерегулярных, точечных данных измерений, вопросы выбора программного обеспечения для построения ГИС, вопросы создания расширенного пользовательского интерфейса ГИС и использования совместимых языков программирования, работа ГИС в сетевом режиме. Результатом комплексного подхода к созданию геоинформационной модели явилась практическая структура геоинформационной системы и базы данных для нее.

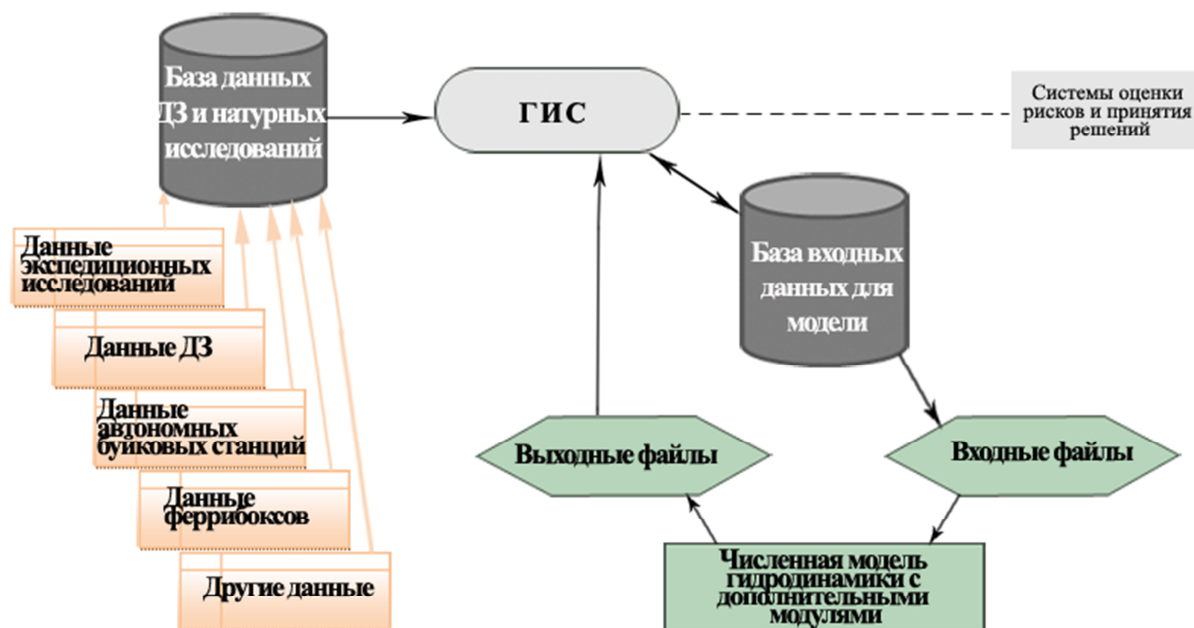


Рисунок 3 – Структура геоинформационной модели комплексного мониторинга прибрежной зоны

Прикладные геоинформационные системы, создаваемые для выполнения определенных задач, как правило, предполагают использование в организациях и учреждениях, то есть доступ, часто единовременный, большого количества пользователей, обработка больших объемов пространственных данных.

Эти вопросы решаются посредством клиент-серверной технологии. В данном случае ГИС и связанная СУБД лежит на сервере, где и производятся все расчеты, анализ и прочие манипуляции с данными, клиенту же по запросу выдается только результат выполненной операции (рисунок 4). На сервере определяются права и политики группового и индивидуального доступа к системе. Также на сервере происходит динамическое распределение ресурсов между компонентами системы ГИС-БД, и в случае большого количества запросов к системе выделение дополнительных вычислительных ресурсов и

памяти при наличии технологии виртуализации, в рамках работы вычислительного кластера, например.

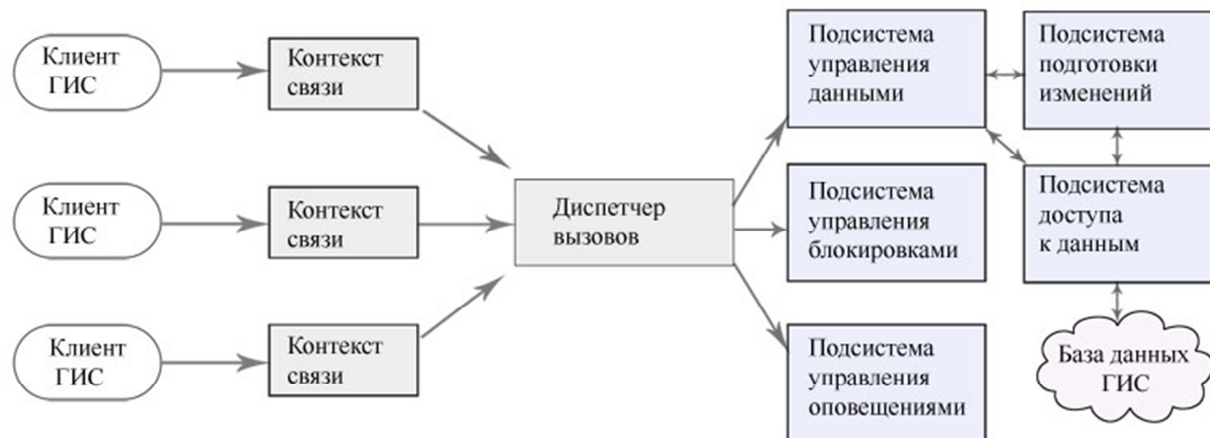


Рисунок 4 – Схема работы ГИС в режиме клиент-сервер

Использование реляционной системы баз данных является действенным подходом к хранению, организации и управлению собранными данными в различных форматах. Данные из различных источников и различных форматов были организована в коллекцию таблиц для базы данных ГИС.

Для каждой полевой кампании, имеется, как правило, одна таблица станций и некоторое количество таблиц с данными измерений. Отношения «один-ко-многим» установлены между основной таблицей станций и таблицами измерений.

Весь процесс передачи данных из базы данных в среду ГИС основан на использовании OLE-технологии наследованной из архитектуры MS COM. Технология OLE (Object Linking and Embedding – связывание и внедрение объектов) позволяет производить обмен информацией между любыми приложениями ОС Windows, которые поддерживают эту технологию. В частности, в данном случае база данных внедрена в меню интерфейса ArcView с использованием скрипта для извлечения данных из БД и отображения их в ГИС. Разработка функций для серий измерений и профилей также использует два важных компонента – графики и таблицы – для графического отображения данных.

Определенная таблица измерений может быть определена сначала по источнику данных, затем по конкретной записи. Каждая таблица измерений, в свою очередь, содержит набор параметров гидродинамики, биологических характеристик и качества воды. Появление новой таблицы сопровождается объявлением новой переменной для каждой из компонент: источника данных, записи, измерительной таблицы, и затем прописыванием соответствующих свойств.



Всего используется три способа визуализации собранных данных. Самый простой – пространственный слой в определенное время и на определенной глубине. Два других включают отображение графиков временных серий и распределения вертикальных профилей для изучения изменчивости по времени и по глубине.

В главе 3 описана реализация модели, ее структура, программная реализация, алгоритмы, методы и средства выбранной системы ГИС

Для создания ГИС была использована библиотека ArcObjects для разработки в среде Visual Basic for Applications (VBA), позволяющая конструировать пользовательские приложения и решения в среде ArcGIS. Для разработки использованы также возможности Active Dynamic Link Library (DLL).

Доступ к результатам ГИС-анализа гидродинамики реализован через главное меню дополнительного разработанного модуля. *Пространственный слой* создается при помощи *двухступенчатого sql-запроса* (рисунок 5). Первый определяет геопривязку и параметры,

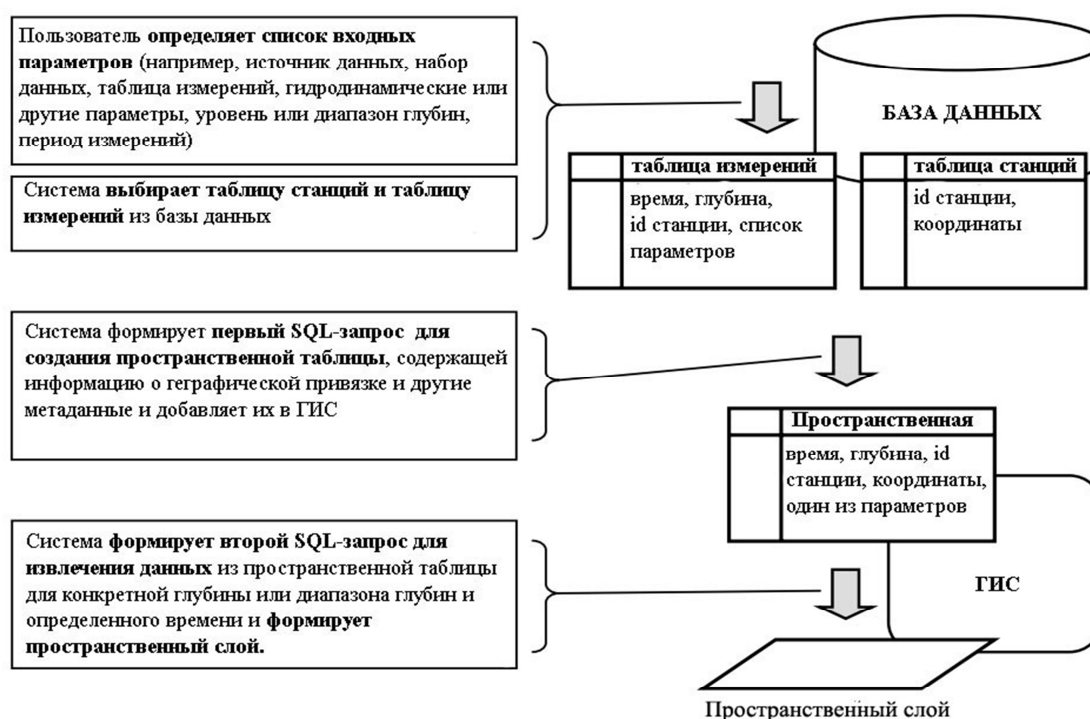


Рисунок 5 – Системный процесс создания пространственного слоя второй выбирает данные по конкретному времени и глубине.

При повторном получении данных по определенному параметру первый шаг пропускается. Таким образом, достигается более высокое быстродействие и экономия трафика. Также можно формировать сценарии для пакетного построения слоев.

Похожие запросы применяются для создания графиков временных рядов и вертикальных профилей по глубине. Основным отличием является то, что вместо



пространственных таблиц в систему добавляются непространственные (т.е. без координат, с ID станции. Полученные данные сначала помещаются в таблицу, а затем наносятся на график.

Для пространственной интерполяции используются пять основных методов восстановления пропущенных значений в точках: 1) метод обратно взвешенных расстояний, 2) метод сплайнов, 3) кригинг, 4) естественные окрестности, 5) тренд. Какой именно из перечисленных методов используется, зависит от конкретного набора данных.

Кригинг аналогичен методу ОВР (обратно взвешенных расстояний) в том, что он взвешивает окружающие измеряемые значения, чтобы получить прогноз для неизмеренного местоположения. Основная формула для этих двух инструментов интерполяции

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^N l_i Z(s_i) \quad (1)$$

где  $Z(s_i)$  – измеряемое значение в местоположении  $i$ ,  $l_i$  – неизвестный вес для измеряемого значения в местоположении  $i$ ,  $s_0$  – местоположение прогноза,  $N$  – количество измеряемых значений

В ОВР вес,  $l_i$ , зависит только от расстояния до местоположения прогноза. При использовании метода кригинг, веса основаны не только на расстоянии между измеряемыми точками и местоположениями прогнозов, но также на общем пространственном расположении измеряемых точек.

Кригинг осуществляется в два этапа: 1) создание вариограммы и функции ковариации для оценки значений статистической зависимости (пространственной автокорреляции), которые зависят от модели автокорреляции (соответствующей модели); 2) прогноз. Диаграмма эмпирической вариограммы (semivariogram) вычисляется с помощью следующего уравнения для всех пар местоположений ( $value_i$ ,  $value_j$ ), разделенных расстоянием  $h$ :

$$\text{Semivariogram}(\text{distance}_h) = 0.5 * \text{average}((value_i - value_j)^2) \quad (2)$$

Общие формы и уравнения математических моделей, используемых для описания (полу)дисперсии:

Сферическая (уравнение 3), с помощью которой может быть описано большинство экспериментальных функций:

$$g(h) = C_0 + C_1 \left( \frac{1.5h}{A} - \frac{0.5h^3}{A^3} \right) \quad \text{при } h \leq A$$

$$g(h) = C_0 + C_1 = C \quad \text{при } h > A \quad (3)$$

$$g(0) = 0,$$

где  $h$  – разделяющий вектор (представляющий сочетание длины и направления) между парой значений  $value_i, value_j$ ,  $C$  – "наггет", вклад дисперсии или порог,  $C_0$  – эффект самородков,  $A$  – фактический ранг, то есть расстояние, на котором значение вариограммы есть 95% от порога

Экспоненциальная модель (уравнение 4) достигает порога на расстоянии  $h = 3A$ . Касательная к функции от начала координат пересекает порог при  $h = A$ . Уравнение функции:

$$g(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h}{A}\right) \right] \quad (4)$$

Модель Гаусса (уравнение 5) имеет параболическое поведение в начале координат и редко используется на практике (в основном для характеристики слабо изменчивых массивов с большим количеством проб). Порог здесь достигается только условно. Для малых расстояний иногда можно спутать параболическую часть этой функции с эффектом тренда.

$$g(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h^2}{A^2}\right) \right] \quad (5)$$

Беспороговые модели чаще всего представлены степенной (уравнение 6), линейной (при показателе степени уравнения (6) равном 1) и логарифмической (Девийса) функцией (уравнение 7).

$$g(h) = Ah^p + B \quad (6)$$

$$g(h) = A \ln h + B \quad (7)$$

Для интерполяции сплайнами используется следующая формула:

$$S(x, y) = T(x, y) + \sum_{j=1}^N \lambda_j R(r_j), \quad (8)$$

где:  $j = 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  – количество точек,  $\lambda_i$  – коэффициенты, найденные на основании решения системы линейных уравнений,  $r_j$  – расстояние из точки  $(x, y)$  в точку  $j^{10}$ .

$T(x, y)$  и  $R(r)$  определяются по-разному, в зависимости от выбранной опции.

Для опции Regularized

$$T(x, y) = a_1 + a_2 x + a_3 y, \quad (9)$$

где  $a_i$  – коэффициенты, полученные в результате решения системы линейных уравнений.

$$R(r) = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{r^2}{4} \left( \ln \left( \frac{r}{2\tau} \right) + c - 1 \right) + \tau^2 \left( K_0 \frac{r}{\tau} + c + \ln \left( \frac{r}{2\pi} \right) \right) \right), \quad (10)$$

где  $r$  – расстояние между искомой и опорной точкой,  $\tau^2$  – параметр Вес,  $K_0$  – модифицированная функция Бесселя,  $c$  – константа, равная 0,577215.

Для опции Tension

$$T(x,y) = a_1, \quad (11)$$

Где  $a_1$  – коэффициент, полученный в результате решения системы линейных уравнений.

$$R(r) = -\frac{1}{2\pi\varphi^2} \left( \ln \left( \frac{r\varphi}{2} \right) + c + K_0(r\varphi) \right), \quad (12)$$

где  $r$  – расстояние между искомой и опорной точкой,  $\tau^2$  – параметр Вес,  $K_0$  – модифицированная функция Бесселя,  $c$  – константа, равная 0,577215.

Интерполяция по времени необходима для восстановления пропущенных значений в фиксированных точках в определенные моменты времени, когда измерения не осуществлялись. Интерполяция по профилю – для восстановления значений на пропущенных горизонтах измерений.

Для данных типов интерполяций используется ряд математических функций:

1) Полиномы степени  $n$  (от 1 до 6);

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n, \quad (13)$$

где  $a_0, \dots, a_n$  – коэффициенты

2) Сплайны линейные и кубические;

4) Логарифмическая функция

$$f(x) = a \ln(x) + b, \quad (14)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты

5) Экспоненциальная функция

$$f(x) = a \exp(b), \quad (15)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты

6) Степенная функция

$$f(x) = a x^b, \quad (16)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты

7) Тригонометрическая

$$f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cos(\omega_i x) + \sum_{i=1}^n c_i \sin(\omega_i x), \quad (17)$$

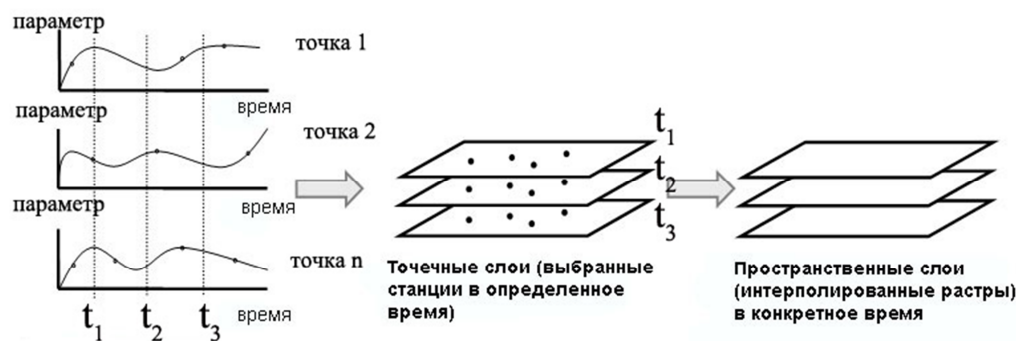
где  $a_0$  – коэффициент,  $b_i$  и  $c_i$  – коэффициенты  $i$ -ой угловой частоты,  $\omega_i$  – угловая частота,  $n$  – количество частот.

Для оценки качества аппроксимации используется среднеквадратичная ошибка (RMS):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2} \quad (18)$$

### Пространственно-временная интерполяция и профили

Две другие интерполяционные функции, пространственно-временная и профильная, использующие 1D и пространственные методы, также включены в систему (рисунок 7).



ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ



ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ПРОФИЛЬНАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ

Рисунок 7 – Пространственно-временная и пространственная профильная интерполяция.

Чтобы из набора данных сделать пространственный слой, все эти данные должны быть собраны в одно и то же время. Однако, часто время наблюдений на разных станциях различно и необходимо использовать функцию для пространственно временной интерполяции. При использовании данной функции вначале получают ряды данных в каждой точке наблюдений в определенное время. После этого можно создать пространственные слои, которые затем при необходимости могут быть конвертированы в

растры с использованием методов пространственной интерполяции. В результате получаются серии интерполированных пространственных блоков. Интерполяция профилей используется для анализа данных, полученных с разных глубин на разных станциях. По сути, используются те же принципы, что и для пространственно – временной интерполяции.

**В главе 4** приводится описание имитационного моделирования, интеграции численной модели с ГИС, результатов апробации.

Следующим шагом является интеграция численной гидродинамической модели в ГИС. В данном разделе описаны фундаментальные уравнения и оперативная платформа. Исследованы методы интеграции модели в ГИС для определения наиболее подходящего для данной работы. Кроме того, разработаны некоторые средства для улучшения функциональности работы ГИС с моделью, в частности для получения и редактирования входных параметров модели, установка начальных условий из пространственного слоя, отображение входных данных и полученных результатов, создание расчетного грида.

Модель циркуляции моря основана на полных уравнениях гидротермодинамики в приближениях Буссинеска и гидростатики, включающих уравнение состояния морской воды в форме, предложенной ЮНЕСКО. Для численной реализации используется итерационная схема расчета свободной поверхности моря.

Для воспроизведения пространственно-временной динамики взвешенного вещества в использовалась 3- мерная гидродинамическая модель, разработанная А.И. Нееловым.

$$\frac{d\dot{\mathbf{U}}}{dt} = -\frac{1}{r_0} \nabla P - f\mathbf{k} \times \dot{\mathbf{U}} + \frac{\partial}{\partial z} n \frac{\partial \dot{\mathbf{U}}}{\partial z} + A\Delta \dot{\mathbf{U}}, \quad (19)$$

уравнении неразрывности:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0, \quad (20)$$

уравнениях переноса тепла и соли:

$$\frac{d(T, S)}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} n_{T, S} \frac{\partial}{\partial z} (T, S) + A\Delta(T, S), \quad (21)$$

уравнении гидростатики:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -rg, \quad (22)$$

уравнении состояния:

$$r = r(T, S, P), \quad (23)$$

где,  $U^v$  ( $U$ ,  $V$ ) – вектор скорости течения и его горизонтальные компоненты вдоль осей  $x$  и  $y$ , направленные соответственно на восток и север;  $W$  – вертикальная компонента скорости вдоль оси  $z$ , направленной вверх;  $\rho$  – плотность воды;  $\rho_0$  – характерная плотность воды;  $g$  – ускорение свободного падения;  $P$  – давление;  $f$  – параметр Кориолиса;  $n, n_{t,s}$  – коэффициенты вертикального турбулентного обмена импульсом, теплом и солью, соответственно;  $A$  – коэффициент горизонтального турбулентного обмена;  $T, S$  – температура и соленость

Уравнение состояния принимается в общем случае в форме ЮНЕСКО для океанской воды, а для данной задачи использовалась формула Millero & Kremling для Балтийского моря.

Также модель включает модуль расчета переноса примеси. Для объединения численной модели и ГИС в данной работе используется метод интеграции интерфейсов. Одним из преимуществ данного метода является автоматизация передачи данных, которая помогает свести к минимуму потенциальные ошибки, возникающие при переносе данных вручную.

В качестве апробации интегрированная модель ГИС была использована для определения уязвимости бентоса к донным осадкам.

Данная работа была проведена с использованием уточненной методики картирования экологически уязвимых прибрежных районов, основанной на концепции интегральной уязвимости морской и прибрежной биоты по отношению к различным видам антропогенного воздействия, разработанной специалистами ЗАО «Экопроект».

Перемещение грунта и связанное со сбросами буровых отходов повышенное содержание взвеси в придонных слоях воды, оказывает пагубное воздействие на донных животных. Особенно чувствительны к такому стрессу мелкие организмы.

Для анализа были взяты данные натурных исследований. Точечные и нерегулярные данные по бентосу (биомасса и количество видов) интерполированы в растр с помощью метода кригинг. Данные были ранжированы по 5 градациям. Каждому диапазону присвоено значение от 1 до 5 от меньшего значения биомассы или количества видов к большему (рисунок 8). Максимальное значение соответствует также и максимальной уязвимости. Природоохранные зоны были также учтены, им присвоена максимальная градация 5. После проведения наложения и алгебраических операций с картами получены результирующие растры, показывающие уязвимость биомассы и биоразнообразия бентоса к донным осадкам (рисунок 9 а и b).

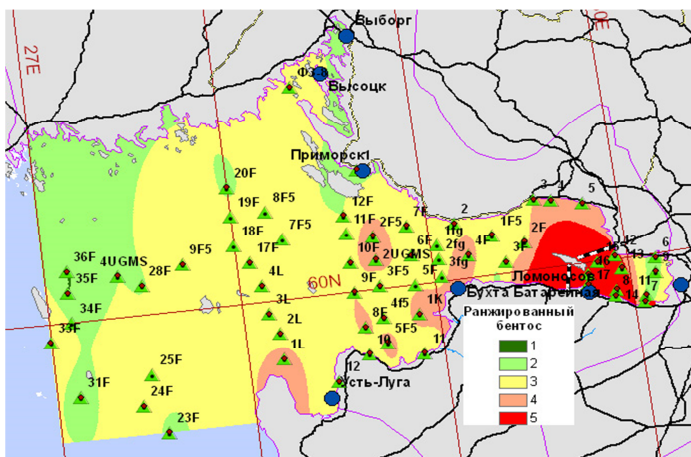
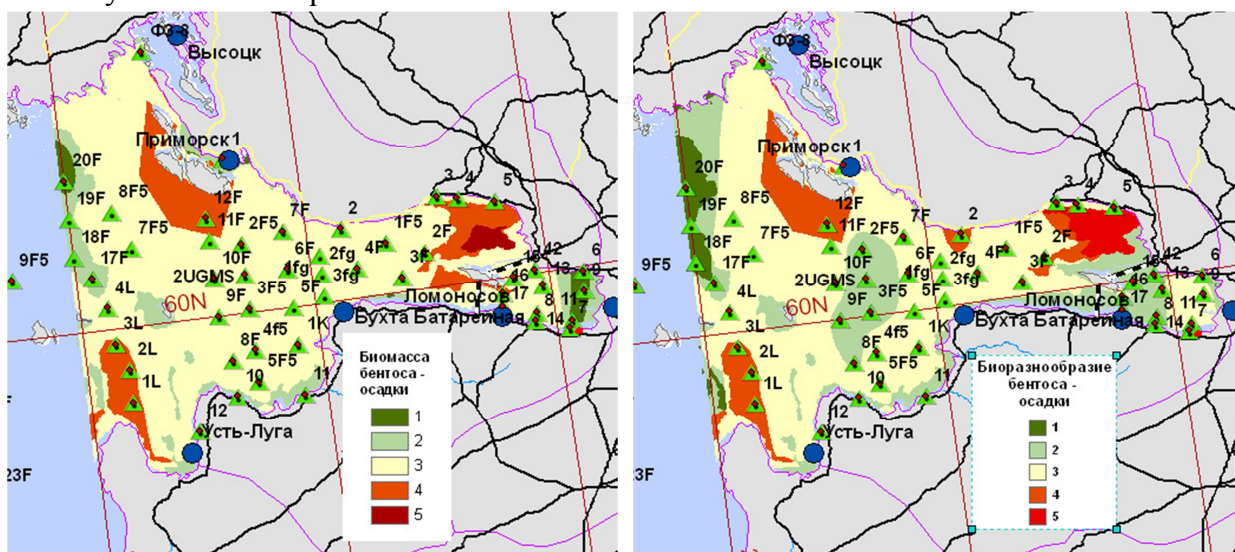


Рисунок 8– Ранжированная биомасса бентоса



a)

b)

Рисунок 9 – Уязвимость биомассы (a) и биоразнообразия (b) бентоса к донным осадкам.

В заключении приводятся итоги работы, перечисляются полученные научные и практические результаты, раскрывается степень их достоверности, новизны и вклада в науку и практику, указываются сведения о реализации научных результатов, а также предложения по дальнейшему использованию результатов исследования, отмечаются нерешённые вопросы, которые могут служить предметом дальнейших исследований.

## ВЫВОДЫ

Решение задач диссертационного исследования позволило получить новые научные и практические результаты, составляющие концепцию комплексного мониторинга прибрежной зоны.

1. Предложенная уточненная концепция комплексного мониторинга прибрежной зоны на основе распределенных баз данных позволяет: 1) повысить степень надёжности

связи между компонентами системы ввиду отсутствия единого банка данных; 2) увеличить скорость доступа к данным благодаря распараллеливанию обработки данных на конкретных узлах, уменьшению времени отклика на запросы, внедрению фильтрации на хранение наиболее часто запрашиваемой информации; 3) увеличить срок службы оборудования; 4) уменьшить затраты на расширение и обслуживание системы.

2. Использование реляционной СУБД и технологий DCOM (Distributed Component Object Model) и OLE (Object Linking and Embedding) позволяют обеспечить целостность и независимость данных, стандартизацию доступа к данным, обмен информацией между любыми приложениями, поддерживающими технологию OLE, и реализовать клиент-серверный подход для решения разнообразных пользовательских задач, включающих удаленный доступ и разграничение прав пользователей на доступ к данным.

3. Предложенная геоинформационная модель позволяет визуализировать трехмерную динамическую структуру морской среды, точечные неравномерно распределенные пространственные данные, что является немаловажным при анализе данных мониторинга прибрежной зоны. Методика визуализации трехмерной структуры включает три метода а) отображение пространственного распределения данных в конкретный момент времени; б) отображение вертикального профиля в конкретный момент; в) графики временной изменчивости в конкретной точке. Данные методы реализуются на основе двухступенчатого sql-запроса, который позволяет избежать значительных объемов вычислений, также может использоваться отдельный файл сценариев.

4. Использование метода интеграции интерфейсов для включения численной модели в ГИС автоматизирует процесс обмена данными с использованием пре- и пост-процессинговых компонент. Он позволяет автоматизировать передачу данных и, таким образом, свести к минимуму потенциальные ошибки, возникающие при переносе данных вручную.

5. Реализация предложений для организации и структуры базы данных комплексного мониторинга в ГИС является основой прогноза и принятия решений по управлению прибрежной зоной, изучению экосистем и сохранения биоразнообразия.

### **Список публикаций по теме диссертации**

*В изданиях из списка ВАК:*

1. Александрова Л.В., Митько А.В. Концепция системы подводного экологического мониторинга Финского залива и Ладожского озера // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск Экология 2013 - море и человек. №9 (146), 2013 с. 25–29 (0.23 печатных листа, 50% авторских)



2. Александрова Л.В., Ткаченко Н.Н. Геоинформационная система мониторинга акватории Балтийского моря. Известия ЮФУ. Технические науки. №9. 2011. – с. 8–11 ( 0.23 печатных листа, 50% авторских)

3. Александрова Л.В., Тюряков С.А., Каган Б.А.. Об адекватности приближения "слабого взаимодействия" между ветровыми волнами и низкочастотными течениями // Физика атмосферы и океана, Известия академии наук, 2005, Т. 41, N5, С.691–694 (0.2 печатных листа, 40% авторских)

*Прочие публикации:*

4. Александрова Л.В. Анализ качества вод восточной части Финского залива при помощи методов геоинформационного моделирования // Сборник материалов XII Международного экологического форума «День Балтийского моря». 2012. – с. 24–25 (0.12 печатных листа, 100% авторских)

5. Александрова Л.В., Ткаченко Н.Н. Защита геоинформационных систем и гидрометеорологических баз данных // Информационная безопасность регионов России (ИБРР–2011). VII Санкт–Петербургская межрегиональная конференция. 2011. с. 179–181 (0.12 печатных листа, 50% авторских)

6. Александрова Л.В., Ткаченко Н.Н. Геоинформационная система мониторинга океанологических и морфологических характеристик акватории прибрежной зоны Баренцева моря // Сборник трудов конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики (МАГ–2011)». – Санкт-Петербург, 2011. – с. 19–24 (0.23 печатных листа, 50% авторских)

7. Александрова Л.В., Ткаченко Н.Н. Разработка Геоинформационной системы мониторинга морфологических и океанологических характеристик акватории прибрежной зоны Балтийского моря //Сборник трудов конференции «Экология: синтез естественнонаучного, технического и гуманитарного знания». Материалы II Всероссийского научно-практического форума. 2011. – С. 71–73 (0.23 печатных листа, 50% авторских)

8. Александрова Л.В, Минина М.В. Методы геопространственного анализа влияния различных факторов на характер загрязнения вод Арктического шельфа//Материалы научно-практической конференции Конгресса «Цели развития тысячелетия и инновационные принципы устойчивого развития Арктических регионов». 2010. – с. 225–230 (0.23 печатных листа, 70% авторских)

9. Mayerle, R. Nachhaltiges Umweltmanagement in brasilianischen Häfen Fallstudie Paranaguá. / Abschlussbericht. Autoren: R. Mayerle and others, Mitarbeiter: L.Alexandrova and others. // Forschungs- und Technologiezentrum Westküste. Keil/Busum: Christian-Albrechts-Universität. — April 2010. — 197 p.