

БОСТАНБЕКОВ КАЙРАТ АРАТОВИЧ

Разработка геоинформационной системы для хранения, обработки и представления данных экологических исследований

6D070400-Вычислительная техника и программное обеспечение

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научный консультант
Куандыков А.А.
д.т.н., профессор
Зарубежные консультанты
Бакланов А.А.
д.ф-м.н., профессор,
Махура А.Г.
к.ф-м.н.

СОДЕРЖАНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ	4
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ОБЗОР И АНАЛИЗ ЗАДАЧ РИСКОВОГО КАРТИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ АВАРИЙ.....	11
1.1 Обзор работ по оценке экологических рисков.....	11
1.2 Экологическое состояние Каспийского моря	15
Выводы по первому разделу.....	18
2 МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ПРИРОДНУЮ СРЕДУ.....	19
2.1 Стохастическая модель оценки экологических рисков	19
2.2 Модель расчета морских течений	21
2.3 Модель расчета распространения нефти в водной среде	21
2.4 Анализ геоинформационного обеспечения.....	25
Выводы по второму разделу.....	32
3 ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТА И ОЦЕНКИ РИСКОВ.....	33
3.1 Алгоритм вычислительного процесса	33
3.2 Информационное обеспечение системы	35
3.2.1 Формирование пакета метеоситуаций.....	35
3.2.2 Формирование карт биоразнообразия и чувствительности биоты Северного Каспия.....	40
3.3 Основные расчетные модули системы	46
3.3.1 Модуль расчета морских течений.....	46
3.3.2 Модуль расчета распространения нефти.....	52
3.3.3 Модуль расчета карты риска нефтяного загрязнения моря	59
3.3.4 Модуль расчета карты риска поражения биоты	63
Выводы по третьему разделу.....	69
4 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ RANDOM	71
4.1 Архитектура и внутренняя структура системы	71
4.2 Разработка веб-сервисов для управления расчетными модулями системы	78
4.2.1 Разработка веб-сервиса предобработки входных данных, расчета морских течений и распространения нефти.....	78
4.2.2 Разработка веб-сервиса расчета риска загрязнения моря и риска поражения биоты.....	81
4.2.3 Разработка веб-сервиса конвертации и публикации карт	83
4.2.4 Разработка модуля управления веб-сервисами	84
4.3 Пользовательский интерфейс для запуска задач и визуализации результатов расчета	87
Выводы по четвертому разделу.....	97

5 ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ДРУГИХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ	98
5.1 Гидродинамическая модель атмосферы и модель атмосферного переноса химических веществ	98
5.2 Моделирование переноса загрязняющих веществ при аварийных возгораниях нефтехранилищ	103
5.3 Оценка влияния выпадения загрязняющих веществ с учетом плотности распределения населения	106
5.4 Анализ концентрации диоксида серы (SO ₂) в городах Казахстана	107
Выводы по пятому разделу	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	111
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	113
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Патент на изобретение	120
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Листинг программы	122

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации применяют следующие термины с соответствующими определениями:

Авария	Разрушение сооружений и\или технических устройств, связанное с морской добычей нефти
Биомасса	Количественная мера с единой шкалой для всех видов биоты, отражающая их «вес»
Биоразнообразие	Разнообразие жизни во всех ее проявлениях, а также показатель сложности биологической системы, разнокачественности ее компонентов
Биота	Множество биопопуляций (или видов биоты)
Веб-сервер	Сервер, принимающий HTTP-запросы от клиентов, обычно веб-браузеров, и выдающий им HTTP-ответы
Веб-сервис	Идентифицируемая веб-адресом программная система со стандартизированными интерфейсами
Вычислительный кластер	Группа компьютеров, объединённых высокоскоростными каналами связи, представляющая с точки зрения пользователя единый аппаратный ресурс
Окружающая среда	Обобщенное понятие, характеризующее природные условия и концентрацию загрязняющего вещества
Портал	Крупный сайт, объединяющий различные сервисы
Процедура	Независимая именованная часть программы, которую после однократного описания можно многократно вызвать по имени из последующих частей программы для выполнения определенных действий
Сервер	Специализированный компьютер и\или специализированное оборудование для выполнения на нем сервисного программного обеспечения
Суперкомпьютер	Специализированная вычислительная машина, значительно превосходящая по своим техническим параметрам и скорости вычислений большинство существующих в мире компьютеров
Тип аварии	Параметр аварии в виде значения относительной шкалы, отражающий силу или мощность аварии
Фреймворк	Программное обеспечение, облегчающее разработку и объединение разных компонентов большого программного проекта.
Чувствительность биоты	Постоянный коэффициент, присущий к каждому виду биоты, который отражает скорость уменьшения биомассы данного вида при концентрации загрязняющего вещества, превышающей санитарные нормы

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

AJAX	Asynchronous Javascript and XML
API	Application Programming Interface
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CFD	Computational Fluid Dynamics
DHI	Danish Hydraulic Institute
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ESI	Environmental Sensitivity Index
FTP	File Transfer Protocol
GDAL	Geospatial Data Abstraction Library
GML	Geography Markup Language
GMT	Greenwich Mean Time
GNOME	General NOAA Operational Modeling Environment
GRIB	GRIdded Binary
HD	Hydro Dynamics
HTTP	HyperText Transfer Protocol
KML	Keyhole Markup Language
MARETEC	Marine and Environmental Technology Research Center
MODIS	The Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OGC	Open Geospatial Consortium
OS	Oil Spill
OSGeo	Open Source Geospatial Foundation
OWM	Oil Weathering Model
RANDOM	Risk Assessment of Nature Detriment due to Oil spill Migration
SNAP	Standard Nomenclature for Air Pollution
SOA	Service Oriented Architecture
SOAP	Simple Object Access Protocol
UML	Unified Modeling Language
UTM	Universal Transverse Mercator
WFS	Web Feature Service
WMS	Web Map Service
WRF	Weather Research and Forecasting
ГИС	Геоинформационная система
ДЗЗ	Дистанционное зондирование Земли
НПЗ	Нефтеперерабатывающий завод
ОВОС	Оценка Воздействия на Окружающую среду
ПАВ	Поверхностно активное вещество
ПДК	Предельно допустимая концентрация
ПО	Программное обеспечение
ПЛАРН	План Ликвидации Аварийных Разливов Нефти
СУБД	Система управления базами данных

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. С увеличением численности населения Земли и, как следствие, увеличением антропогенных изменений, значительно возросло взаимодействие человека с природой. Пренебрегая законами природы и нарушая экологическое равновесие для удовлетворения своих потребностей, население Земли оказалось в большей зависимости от окружающей среды, чем ранее. Для принятия правильных и взвешенных решений в сфере взаимодействия общества с природой и дальнейшего развития человечества стало необходимым изучение Земли, как целостной системы, формирование информационного пакета знаний о природной среде, в том числе о процессах взаимодействия, анализе и оценке происходящих явлений в окружающем мире.

Важную роль для Казахстана играет Каспийское море. На основе многочисленных исследований можно, безусловно, констатировать, что Каспий является уникальным водоемом. Особенно ярко это проявляется на Северном Каспии, где мелководье, притоки крупных рек Волги и Урала, морфология берегов, ледовый режим, колебания уровня и другие особенности сформировали уникальную экосистему. Эти же факторы определяют особую чувствительность данной акватории моря к внешним воздействиям. Высокая изменчивость природных условий (уровня моря, батиметрии, солености и других системообразующих факторов) сформировали экосистему в своеобразном состоянии динамического равновесия (биоценоза), нарушение которого вследствие, например, человеческой деятельности может привести к необратимым последствиям.

Интенсивный рост активности нефтегазовых операций на Казахстанском секторе Каспийского моря за последние годы повышает актуальность экологической безопасности Каспия. Мелководье Северного Каспия создает благоприятные условия обустройства и эксплуатации месторождений нефти и газа, запасы которых составляет очень внушительную величину (например, только для м/р Кашаган запасы нефти оцениваются в 4,5 миллиарда тонн). Наиболее опасным для прибрежных зон техногенным воздействием является аварийный разлив нефти, особенно высок риск такого происшествия в районах, где ведется промысел нефти или ее транспортировка. Многократные разливы нефтепродуктов могут привести к ухудшению экологической ситуации не только в месте разлива, но и близлежащих районах. При этом тип берега и местные климатические условия определяют поведение нефтяного пятна и степень его воздействия на окружающую территорию. Уникальность и замкнутость акватории Каспийского моря может привести в случае крупной нефтяной аварии к масштабной экологической катастрофе целого региона, при этом ущерб может превысить ущерб от аналогичной аварии в Мексиканском заливе. Поэтому карты рисков зон нефтяного загрязнения представляют собой информационную систему, позволяющую оперативно определять приоритеты при ликвидации разливов, моделировать и прогнозировать процесс, связанный с разливами нефти, а также оценивать предварительный ущерб, возможная в результате выбросов нефти на побережье.

Кроме того, вопросы, связанные с динамикой изменения концентраций различных атмосферных примесей и аэрозолей также имеют большое прикладное значение, поскольку:

- Аэрозоли оптически активный компонент атмосферы, влияющий на ее радиационный режим;
- Аэрозоли субмикронных размеров играют решающую роль в формировании облачности и гидрологического режима атмосферы в целом;
- Конверсия газообразных компонентов в частицы, а также различные химические реакции на поверхности и в объеме частиц основные пути очищения атмосферы;
- В состав аэрозолей входит значительное количество вредных для здоровья органических соединений.

Атмосфера крупного промышленного центра загрязняется выхлопами автомобильного транспорта и выбросами промышленных предприятий, находящихся в черте города. Чаще всего загрязнителями, концентрации которых следует контролировать, являются пыль, сажа, оксид углерода CO, диоксид серы SO₂, озон, диоксид азота NO₂, оксид азота NO, сероводород H₂S, фенол CH₃, фтористый водород HF, аммиак NH₃, формальдегид CH₂O и др.

Вопросы, связанные с динамикой изменения концентраций этих и других атмосферных аэрозолей, а также газов, имеют большое значение. Также имеется ряд открытых вопросов, связанных с взаимодействием различных атмосферных аэрозолей между собою.

Широкий класс связанных с экологией задач требует создания информационных систем, предназначенных для хранения, обработки и представления пространственно-распределённых временных рядов различных исследований. Очевидно, что такие информационные системы обладают схожей структурой – они включают в себя модель данных и средства работы с ней, подсистему импорта и редактирования данных, а также подсистемы, отвечающие за представление картографических данных и их обработку. Разработка каждой такой системы в виде независимого проекта имеет очевидные недостатки:

- Написание большого объема близкого по предназначению кода.
- Сложность создания унифицированных средств обработки, хранимых каждой подобной системой данных.
- Визуализация результатов из различных форматов данных.

Создание информационных систем для экологических исследований с учетом научно-обоснованных методов решений позволяет рационально оценивать проблемы окружающей среды. Современные информационные технологии, в частности географические информационные системы (ГИС) намного облегчают работу с огромными массивами данных, знаний и информации, накопленные людьми за много лет. Одно из определений ГИС – это информационная система сбора, хранения, обработки и визуализации пространственно-временных данных, которая интегрирует разнородную информацию, поступающую из различных источников на основе

пространственного положения. С помощью ГИС можно сопоставлять различные факторы исследуемой среды и проводить комплексную геоэкологическую оценку территории. В современном мире информационных технологий очень широк выбор различных инструментов в виде геоинформационных систем с настройками интерфейса пользователя и встроенными моделями для решения конкретной задачи.

Необходимость проведения данной работы заключается в том, чтобы проанализировать и обосновать особенности и преимущества использования технологий ГИС в экологических исследованиях и включение результатов этих исследований в единое информационное пространство для формирования как можно более полной оценки состояния территории. Создание единой унифицированной платформы, в рамках которой можно объединить схожие по решению задачи, которые позволяют использовать одни и те же способы обработки, анализа и визуализации данных. Этот подход позволит максимизировать переиспользование кода, и, соответственно, снизит трудовые и временные затраты на создание и сопровождение подобных систем.

Таким образом, задача создания новой, расширяемой и гибкой, системы, предназначенной для специалистов, занимающихся оценкой экологических рисков окружающей среды является актуальной.

Цель и задачи исследования. Целью данной работы является разработка геоинформационной платформы, которая позволяет проводить оценку состояния окружающей среды при антропогенном воздействии на природу, с помощью методик, основанных на теории рисков, статистических методах обработки данных и моделей визуализации информации.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- обзор и анализ задач рискованного картирования экологических аварий;
- формирование пакета метеорологических данных для дальнейшего применения в модели риска;
- формирование пакета гидродинамики Каспийского моря с помощью программного обеспечения MIKE 21 HD;
- автоматизация программного обеспечения MIKE-21 SA для множественного расчета нефтяных разливов на водном пространстве;
- формирование пакета карт обитания и уязвимости различных биологических сообществ Северного Каспия и приведение к единой картографической основе;
- разработка алгоритмов численной реализации рискованной модели загрязнения водного ресурса от нефтяных разливов;
- учет большого времени расчета рискованной карты и распараллеливание алгоритмов для расчета трудоемких задач с использованием суперкомпьютеров;
- разработка сервис ориентированной архитектуры для реализации моделей экологического картирования;
- разработка платформы обработки и визуализации данных моделей экологического картирования;

– проведение серии экспериментов и апробация результатов разработанной системы.

Объект исследования. Объектом исследования являются территориальные комплексы, подверженные экологическому риску негативного воздействия техногенной аварии, с применением современной технологии математического моделирования и геоинформатики.

Предмет исследования. Предметом исследования является веб-ориентированная геоинформационная система, как средство решения задач оценки и анализа экологических рисков при авариях в нефтегазовой отрасли.

Методологическая основа исследования

В работе были использованы теоретические разработки отечественных и зарубежных авторов по оценке рисков, геоинформационным системам, геоинформационному картографированию, моделированию, геоэкологии. Использовались методы вероятностной оценки рисков, системного анализа, хранения и обработки информации, статистические методы обработки данных и модели визуализации информации.

Научную новизну исследования составляют:

- разработка алгоритма численной реализации стохастической модели вероятностной оценки риска загрязнения окружающей среды;
- разработка методов обработки и визуализации метеорологических данных и информации по биоразнообразию Каспийского моря;
- разработка алгоритмов распаралливания репрезентативной выборки и обработки данных, используемых в риск модели риска, с целью ускорения времени расчета;
- универсальность разработанной архитектуры геоинформационной системы, которая может быть приспособлена для других экологических задач путем добавления в систему новые расчетные модули без вмешательства в ранее разработанный код.
- интеграция гетерогенных систем для расчета моделей оценки риска, основанная на сервис ориентированной архитектуре;
- разработанная платформа агрегации и обработки данных моделей экологического картирования в виде веб приложения с элементами ГИС, реализованная в виде независимых веб-сервисов;
- удобный пользовательский интерфейс для профессиональных пользователей, позволяющий запускать расчеты и анализировать результаты, отображенные на карте.

Основные положения, выносимые на защиту следующие:

- Алгоритм численной реализации вероятностной оценки риска загрязнения моря при аварийном разливе нефти.
- Алгоритм численной реализации вероятностной оценки риска поражения биоты при аварийном разливе нефти.
- Параллельный алгоритм построения рисковых карт для оптимизации времени расчета и анализа результатов.

– Разработанная сервис ориентированная архитектура геоинформационной системы для взаимодействия расчетных модулей и управления задачами.

– Веб-ориентированная геоинформационная система для запуска расчетов и отображения результатов на карте, в виде единого интерфейса с ориентацией на профессионального пользователя.

– Серия численных экспериментов, подтверждающие адекватность разработанной модели.

Связь темы с научно-исследовательскими программами

Диссертационная работа выполнялась в Национальной научной лаборатории коллективного пользования информационных и космических технологий НАО КазННТУ имени К.И. Сатпаева в рамках научного проекта «Разработка и реализация на суперкомпьютере методики рискованного картирования негативного воздействия на биоту аварии на объектах нефтегазовой индустрии», государственная регистрация № 0112РК02004 в период 2012-2014 гг. и в ТОО “EcoRisk” по проекту коммерциализации технологии для групп старших научных сотрудников «Разработка технологии рискованного картирования поражения морской биоты при аварийном разливе нефти на шельфе Каспийского моря» в период 2014-2015 гг.

Апробация результатов исследования

Основные результаты диссертационного исследования были представлены на научно-практических конференциях Казахстана и за рубежом. По теме диссертации опубликованы 23 статей, из них 7 статьи в журналах, рекомендованных ККСОН МОН РК, 1 статья опубликована в журнале «Geoinformatika» (Russia), входящая в базу РИНЦ, 1 статья в материалах конференций «International Conference on Application of Information and Communication Technologies» (USA), вошедшая в базу данных Web of Science, 1 статья в материалах конференций «Elektroenergetika» (Slovakia), включенная в базу данных Scopus и 1 статья в журнале «International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology» (Indonesia), входящая в базу данных Scopus. Также была опубликована монография «Моделирование экологических рисков при нефтяном загрязнении акватории Северо-Восточного Каспия» следующим коллективом авторов: Закарин Э.А., Балакай Л.А., Бостанбеков К.А., Дедова Т.В., Ким Д.К., Кобегенова С.С., Миркаримова Б.М., Нурсеитов Д.Б. Исследовательской группой, где соискатель является соавтором, был получен патент на изобретение «Способ прогнозирования загрязнения окружающей среды» №31877 от 29.05.2015 выданная Министерством Юстиции Республики Казахстан (Приложение А).

Объем диссертации

Диссертационное исследование состоит из введения, пяти разделов, включающих в себя 31 подразделов, заключения, списка использованных источников из 108 наименований и 2 приложений.

1 ОБЗОР И АНАЛИЗ ЗАДАЧ РИСКОВОГО КАРТИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ АВАРИЙ

1.1 Обзор работ по оценке экологических рисков

Анализ рисков – это часть систематического подхода к принятию политических решений, процедур и практических мер по решению проблем предотвращения или снижения риска для жизни людей, болезней или травм, ущерба имуществу и окружающей среде. В то же время анализ рисков или анализ опасных факторов определяется как регулярное использование имеющейся информации для определения угроз и оценки риска для определенных лиц или групп людей, средств или природы. Анализ риска заключается в оценке риска и определении (идентификации) опасностей. Опасность – это вероятность, что может произойти какая-то нежелательная ситуация с возможностью ущерба, а риск или уровень риска – это сочетание вероятности или частоты и последствий выявленного опасного события. Это значит, что риск состоит из двух элементов: частоты опасного события и его последствия. Таким образом, употребление понятия риска дает возможность перевести опасность в категорию измеряемых. Риск, фактически, является мерой опасности.

Оценка риска – выявление опасности влияния вредных факторов и условий на окружающую среду и здоровье людей с применением имеющейся информации и научно-обоснованных прогнозов.

В понимании риска количественные критерии могут быть разными. Поэтому основной целью анализа риска возможно выявление экологического, социального или потенциального риска, а также определение вероятности происхождения нежелательного явления. Процедуры для анализа риска могут быть разными, но необходимость выявления опасностей, оценка риска и рекомендаций по снижению риска остаются неизменной.

Критерии приемлемого риска на основе экспертных оценок находят все большее распространение. В этих оценках уровень риска делится на группы с высоким, промежуточным, низким и незначительным степеням риска. При этом незначительная степень не рассматривается, низкая степень является приемлемой, для промежуточной требуются работы по снижению риска, а высокая степень считается неприемлемым.

Оценка риска включает в себя анализ последствий, анализ частоты и анализ неопределенностей. Если последствия несущественны или частота крайне мала, хватит оценка всего одного параметра. Можно использовать статистические данные, чтобы оценить вероятности событий.

Связанные с оценкой риска есть много неопределенностей. При оценке риска анализ неопределенностей является необходимой частью. Обычно, главными источниками неопределенностей является информация по надежности, ошибкам и допущениям аварийных процессов. Для правильной интерпретации величины риска требуется ясное понимание неопределенности и их причины. Анализ неопределенности является переводом исходных параметров и предложений оценки риска в неопределенность результатов. По возможности нужно идентифицировать источники неопределенности [1].

Чтобы оценить на практике масштаб угроз, возникающих при освоении шельфа, необходимо иметь четкое концептуальное представление о природе экологических рисков и существующей методологии их оценки. В какой-то степени решить эту задачу позволяет выполненный обзор имеющихся научных публикаций.

Статья [2] посвящена оцениванию и прогнозированию технических рисков, возникающих при эксплуатации таких опасных производственных объектов, как АЭС, которая обусловлена наличием неопределенности при принятии решений по безопасности. Авторы получили результаты одного из сценариев моделирования технических рисков в виде, зависимости изменения функции плотности распределения риска, от параметров распределения величины технического риска, распределенной по закону Гауса. Было предложено применение теории гиперслучайных явлений для усовершенствования вероятностных моделей оценивания безопасности АЭС.

В работе [3] техногенный риск рассматривается в виде математического ожидания последствий от свершения исходных событий, и вероятность события и мера ущерба принимаются как случайные величины. Авторами была предпринята попытка разработать подход, чтобы получить более точную и полную количественную оценку риска по сравнению с формальным представлением оценки рисков с учетом индивидуального восприятия риска.

В пособии [4] и в работе [5] приведены теоретические положения, детальный обзор вероятностных распределений, применяемые при оценке риска. Описание экологических моделей, применяемые при оценках рисков от наблюдаемых или прогнозируемых воздействиях токсичных химических веществ на отдельные организмы, приводятся в [6].

В монографии [7] рассматриваются простейшие аналитические и логические модели риска, а также методы оценки экологических рисков. Здесь же описывается ущерб окружающей среде от нефти и нефтепродуктов при транспортировке и методы расчета параметров распространения нефтяного пятна по водной и твердым поверхностям. Также охватывает проблемы при пожаре нефтепродуктов в резервуарах и особенности транспортировки сжиженных нефтяных газов. В последней главе приводит расчеты платежей за нарушение экологической безопасности.

В работе [8] оценка ущерба базируется на методологии оценки риска, мерой которого является вероятность его проявления. В той же работе автор под количественной мерой риска представляет собой математическое ожидание ущерба, определяемого для всего комплекса экологически опасных факторов, проявляющихся на данной территории. Вероятность аварии «определяется на основе анализа эксплуатации объекта или технической системы и обработки статистических данных об авариях». Вероятный относительный ущерб определяется «на основе моделирования аварийной ситуации». При гибели людей оценка ущерба выполняется с привлечением «так называемой стоимости жизни», выраженной в денежных единицах.

Агентство по охране окружающей среды США опубликовало отчет, в котором был представлен анализ деятельности по оценке экологических рисков

и определены пути развития методологической базы [9]. В отчете было отмечено, что развитие практики оценивания экологических рисков возможно путем совершенствования методов и инструментария в направлении более полного охвата физических, биологических и социально-экономических аспектов рассматриваемых проблем для принятия более обоснованных решений. В частности, речь идет о пространственной и временной детализации, учете сложности биологических систем и реакции окружающей среды на воздействия единичных или множественных источников.

Приведем некоторые известные математические подходы для описания морских экосистем и проблем, связанных с их загрязнением. Математические модели экологических систем изучались в [10, 11]. Имитационные модели экосистем Азовского и Балтийского морей, северо-западной части Черного моря, озера Байкал исследовались в работах [12-17]. Имитационно-статистическая модель морской экосистемы на примере Каспия была рассмотрена в [18]. Моделирование роста фито- и зоопланктона Северного Каспия проводилось в статьях [19-21] монографии [18]. Риск нефтяного загрязнения на море изучался в ряде работ [22-29]. Подход, используемый для оценки риска нефтяного загрязнения в данной работе, близок к работам [22, 28].

Для практических работ, связанных с нефтяным загрязнением Международная морская организация рекомендует создание так называемых карт чувствительности [30] к нефтяному загрязнению, на основе которых должны быть выработаны меры реагирования по минимизации возможного ущерба для экологии. Карты чувствительности должны отражать чувствительность береговой линии, биоты и объектов социально-экономической инфраструктуры. Для оценки чувствительности береговой линии к нефтяному загрязнению используется индекс ESI (Environmental Sensitivity Index), предложенный в работе [31], который ранжирует чувствительность берега в виде баллов в зависимости от его физических свойств, например, песчаный или скалистый берег имеют различные классификации. Для отражения чувствительности биоты или объектов социально-экономической инфраструктуры создаются карты с индикацией чувствительных областей в виде точек или полигонов с использованием символов или схем, но само понятие чувствительности, при таком подходе, четко не определяется. Таким образом, определенные области можно ранжировать по степени чувствительности в зависимости от количества индикаторов на области с низкой, средней и высокой чувствительностью. Отметим, что не приходится говорить о какой-либо общей чувствительности из-за отсутствия единой шкалы для оценки чувствительности берега, биоты и объектов социально-экономической инфраструктуры, т.е. по сути это различные, хотя и некоторым образом связанные между собой, объекты исследований, объединенные общей тематикой практических приложений.

В работе [32] риск поражения биоты при нефтяном загрязнении определяется в виде произведения вероятности загрязнения P , величины воздействия (result of exposure) E и уязвимости (vulnerability) V : $P \times E \times V$, причем параметр E может быть представлен различными численными индикаторами такими, как длительность воздействия, концентрация и тип нефти

или их комбинацией, а параметр V определяется на основе работы [33]. В работе [32] указывается, что такой подход на основе 3-х факторов (вероятность загрязнения, величина воздействия и уязвимость места) может быть использован различными способами. В статье [34] были разработаны индексы для определения наиболее ценных видов биоты в случае нефтяного загрязнения на основе величины воздействия, смертности и возможности восстановления групп биоты.

При формировании отчетов по оценке рисков рекомендуется увеличение числа возможных сценарных вариантов, концентрация внимания на популяции и экосистемы в целом, с выделением при необходимости особо чувствительных подгрупп/видов, четкое описание всех неопределенностей и разъяснение неочевидных гипотез.

В истории человечества было не мало экологических катастроф, которые привели к ужасающим последствиям. Далее приводятся несколько примеров самых крупных экологических катастроф в истории, связанные с нефтью, что доказывает серьёзность и масштабность подобных аварий.

6 июля 1988 года произошёл пожар на эксплуатационной нефтяной платформе «Пайпер-Альфа», в результате которого погибли 167 человек. Это была самая большая авария, связанная с добычей нефти на шельфе.

6 марта 1978 года танкер «Амоко Кадис» из-за неполадок в рулевом управлении налетел на скалы и разбился. В результате в море вылилось около 230 тысяч тонн нефти. Во время этой катастрофы пострадало 360 километров Атлантического побережья Франции. Эта авария стала причиной гибели десятков тысяч рыб и птиц и нанесла непоправимый ущерб Средиземному морю.

3 июня 1979 года в Мексиканском заливе после выброса из-под буровой установки «Исток-1» на поверхности воды образовалось нефтяное пятно, которое распространилось на 640 километров. 24 марта 1980 года скважина была закрыта. На тот момент в океан успело вылиться полмиллиона тонн нефти.

25 марта 1989 года у берегов Аляски произошла авария, нанёсшая наибольший ущерб этому побережью. После того как танкер «Эксон Вальдез» 24 марта 1989 года налетел на Блайт-риф, в воду вылилось, по официальным данным, около 40 миллионов литров нефти. Но защитники природы с этой цифрой не согласны и приводят данные гораздо большего порядка. Около 2400 километров побережья пострадало от этой аварии.

13 ноября 2002 года танкер «Престиж» попал в сильный шторм возле берегов Галисии. В результате этого в судне образовалась трещина длиной 35 метров, и танкер начал давать утечку нефти — около 1000 тонн в сутки. Были предприняты попытки спасти «Престиж», но испанские береговые власти запретили заходить в ближайшие порты, Португалия не разрешила вход неисправного танкера в свои воды. И аварийное судно было решено отбуксировать в море. 19 ноября 2002 года «Престиж» раскололся на две части и затонул в 210 километрах от Галисии. В море вылилось более 20 миллионов галлонов нефти, что нанесло непоправимый ущерб всей морской и береговой фауне и рыбной промышленности [35].

После анализа публикаций в области оценивания экологических рисков можно сделать следующие выводы. Понятие риска в широком смысле отражает неопределенность относительно принимаемых решений, она независима от вида деятельности и процессов. Оценка риска не может быть точной, так как риск всегда носит прогностический, априорный характер. Для рисков различной природы методы решения оценки рисков могут различаться. К сегодняшнему времени нет единой теории риска и общепринятой методологии.

Вероятностный подход к оценке риска наилучшим образом обеспечивает реалистичность оценок, которые недостижимы для детерминированных методов и, кроме того, позволяет учесть кумулятивный эффект множественных источников неопределенности.

В области экологии для оценки рисков требуется системный подход к сбору данных и разработка более качественных моделей функционирования экологических систем. Такой подход необходимо осуществлять при сохранении биологического разнообразия окружающей среды. Гидрометеорологические (в т. ч. и климатические) и географические факторы чрезвычайно важны для различных видов воздействий на природную среду. Эти факторы могут быть причиной экологического риска и может усиливать, либо ослаблять эффект антропогенного воздействия.

1.2 Экологическое состояние Каспийского моря

В настоящее время экологическое положение Каспия вызывает серьезную озабоченность, особенно в шельфовой, мелководной зоне моря [36]. В первую очередь это касается Северного Каспия, где можно выделить четыре основных источников загрязняющих веществ:

1. Реки, впадающие в море и несущие загрязнители с огромных территорий, занятых промышленным и сельскохозяйственным производством. Конечно, в первую очередь речь идет о реках Волга и Урал, водосборные бассейны которых составляют 1380 тыс. и 273 тыс. кв. км соответственно.

2. Города и промышленные объекты, расположенные в прибрежной зоне. На берегах Северного Каспия, в российской и казахстанской части имеются довольно разветвленные городские и промышленные инфраструктуры.

3. Объекты добычи и транспортировки нефти на море. На Северном Каспии идет интенсивное освоение месторождений и прокладка трубопроводов, что неизбежно сопровождается сбросом нефтесодержащих отходов и других видов загрязнителей.

4. Затопленные и подтопляемые, плохо законсервированные объекты нефтегазовой добычи. Эти объекты возникли вследствие многолетних колебаний уровня Каспийского моря.

Прибрежная промышленность и речные воды «снабжают» морские воды, донные отложения, ткани и органы птиц, рыб и тюленей повышенными концентрациями тяжелых металлов: хрома, меди, свинца, ртути, цинка и т.д. В морских водах Северном Каспии средние концентрации кадмия и свинца за последние 20 лет увеличились почти в 5 раз, меди и цинка – в 10 раз. Высокое содержание металлов отмечается также в донных отложениях. Наблюдается

увеличение за последние годы концентрации ртути. В отдельных пробах, особенно в придонных слоях, содержание меди, хрома, никеля достигали уровней, в 1,5-2 раза превышающих ПДК (концентрации меди достигали 3-5 ПДК). Хотя в среднем концентрации этих металлов не превышают пока ПДК, установленные для рыбохозяйственных водоемов, но уже сейчас, на стадии обустройства морской нефтедобывающей инфраструктуры качество воды на месторождениях оценивается как «умеренно загрязненные» (ИЗВ около единицы, 3 класс).

Дополнительную нагрузку на экосистему несут отходы сельскохозяйственной деятельности. Вблизи устьев рек Северного Каспия наблюдается двукратное по сравнению с 1986 годом увеличение концентраций пестицидов и хлористо-органических соединений. Увеличение масштабов использования минеральных удобрений и рост объемов сточных вод вызвали повышения концентрации растворенного фосфора и азота.

Несомненно, основным загрязнителем морской воды (как поверхностных, так и придонных слоев) являются углеводороды. По данным мониторинга ежегодно наблюдалось превышение ПДК по нефтепродуктам в пределах 1,1 – 1,3 ПДК. Кроме углеводородов регулярно отмечается повышенное содержание ароматических органических соединений - фенолов, их концентрация варьируется от 2 до 9 ПДК. Несомненно, с началом полномасштабной добычи нефти качество морской воды значительно ухудшится, что отрицательно скажется на экосистеме моря и регионе в целом [37].

Особую озабоченность вызывает периодическое (вследствие ветрового нагона) и постоянное (вследствие подъёма уровня моря) обводнение нефтегазового комплекса. Полностью затоплены месторождения Восточная Кокарна, Тажигали, Прибрежное, Пустынное, Морское. Консервация и ликвидация затопленных скважин выполнены без учета возможного повреждения ледовыми подвижками, без изоляции от морских агрессивных вод, порой простым закрытием заглушек скважин. Такие скважины являются потенциально опасными и в недалеком будущем могут привести к крупным разливам нефти с трудно предсказуемыми последствиями для биоты моря и значительными трудностями их ликвидации. Например, в марте 2001-го года вследствие движения льдов произошел прорыв нефти на трех скважинах месторождения Прибрежное, что зафиксировано на космических снимках (рисунок 1).

Однако главную опасность представляет возможность крупного аварийного разлива на акватории Северного Каспия. Такой сценарий не является совершенно нереальным. Особую озабоченность вызывает крупнейшее по мировым масштабам Кашаганское месторождение. В нем сосредоточено по данным оператора проекта до 6 млрд тонн агрессивных высокосернистых углеводородов, пластовое давление составляет величину 770 атмосфер, температура достигает 110 – 120⁰С. Для заповедной зоны Казахстанской части Северного Каспия авария на таком месторождении во время добычи и транспортировке нефти может иметь катастрофические последствия [38].



Рисунок 1 – Космические снимки QuickBird за 13 августа 2002 г (слева) и за 10 мая 2002 года (справа)

Имеется несколько механизмов вредного воздействия нефтяных разливов на морскую биоту:

- Поступающая в море нефть, будучи поверхностно активным веществом (ПАВ), растекается в виде пленки различной толщины по водной поверхности. При этом нарушается энерго- и массообмен между водой и атмосферой. Пленка нефти даже минимальной толщины от 0,05 до 2,5 микрон вдвое уменьшает поступление кислорода в толщу воды. Повышение температуры и дефицит растворенного в воде кислорода нарушают нормальные биологические процессы в водоемах и приводят к гибели неподвижных и малоподвижных морских популяций.

- В результате физико-химических превращений нефть в виде эмульгированных частиц проникает в толщу воды, замедляя рост водорослей, угнетая жизнедеятельность рыб и морских млекопитающих за счет прямой интоксикации и продвижения токсичных веществ по кормовой цепочке. Это вызывает необратимые последствия в составе биоценозов, нарушает пищевые и другие взаимоотношения между организмами. Более всего страдают прибрежные воды богатые зародышами, личинками и молодь, и, особенно, камышовые заросли, которые служат на Северном Каспии «инкубаторами» многих видов морских животных.

- Тяжелые фракции нефти, оседая на дно, вызывают вторичное загрязнение водоемов, что приводит к разбалансировке биоценоза бентоса, снижению продуктивности, а часто к прекращению жизнедеятельности основных групп гидробионтов – бентоса, нектобентоса, плейстона и др. Лишь единичные виды водорослей и мшанок выносят нефтяное загрязнение, но даже эти виды выживают при низком уровне нефтяного загрязнения.

- ПАВ свойства нефти проявляются в чисто механическом обволакивании предметов и тел организмов. Пленки на поверхности живых существ, даже если они не вызовут немедленной смерти последних, неизбежно ставят организмы и биоценозы в условия кислородного голодания и интоксикации продуктами жизнедеятельности. Нефтяная пленка приносит большие бедствия морским

птицам: нефтепродукты, попадая на птицу, лишают ее возможности летать, а также растворяют жировую смазку перьев, что приводит к переохлаждению птиц и их гибели.

Здесь перечислены только прямые виды ущерба, наносимого нефтяным загрязнением на морскую биоту. В долгосрочной перспективе возникает сложная цепь последствий загрязнения. Изменение химических и физико-химических свойств водной среды нарушает сложившуюся в водоеме адаптацию живых организмов к условиям существования. При этом более чувствительные организмы постепенно вымирают, менее чувствительные существуют в подавленном состоянии. Это приводит к обеднению и изменению состава биоценозов, развитию чужеродных, вредных и, часто, опасных для сложившейся биоты организмов. В результате происходит потеря биоразнообразия, исчезновение эндемиков и появление агрессивных занесенных видов [39].

Таким образом, процессы, формирующие экосистему Северного Каспия в естественных условиях и, тем более, в состоянии стресса при чрезвычайных ситуациях нефтяного разлива, настолько сложны, многообразны и взаимосвязаны, что прогнозировать их развитие в количественных соотношениях фактически невозможно. Стохастический характер этих процессов достаточно очевиден. Их статистическое описание, т.е. определение неслучайных характеристик этих случайных процессов, потребует выполнения огромного количества мониторинговых и экспедиционных наблюдений на единой методической основе. В настоящее время это невозможно, поэтому необходимо опираться на приблизительные оценочные характеристики типа времени восстановления, уязвимости и чувствительности к нефтяному загрязнению. Конечно, в настоящее время эти величины определены на интуитивном уровне, однако их строгая формулировка в рамках стохастической модели позволит достаточно обосновано оценить риски поражения биоты при аварийных нефтяных разливах.

Выводы по первому разделу

В данной главе был проведен обзор работ по оценке экологических рисков и описаны особенности Каспийского моря, которые нужно учитывать при разработке информационной модели Каспия. Были приведены примеры крупных экологических катастроф в истории человечества, что показывает серьезность и масштабы влияния аварийных разливов нефти на природу. Оценено экологическое состояние Каспийского моря и выявлены основные механизмы вредного воздействия нефтяных разливов на морскую биоту.

2 МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ПРИРОДНУЮ СРЕДУ

2.1 Стохастическая модель оценки экологических рисков

Основная доля недропользователей на основе чисто промышленных ценностей оценивает риски чрезвычайных ситуаций и потенциальные экономические потери с помощью стандартизированных методов оценки только для локальной территории. К сожалению, меньше внимания уделяется экологическим последствиям в случае аварий, в результате чего не разработаны адекватные региональные модели рисков. При оценке рисков в случае аварии основной особенностью является возникновение цепочки неопределенностей. К таким неопределенностям относятся – неопределенность места, времени, мощности и продолжительности этой аварии. К тому же, неясно как повлияет загрязнение окружающей среды на биологическое сообщество и повлияет ли вообще [40].

В работе [41] описывается стохастическая модель оценки экологических рисков, которая была взята за основу при реализации модуля расчета риска в данной работе. Это исследование является строгой математической формализацией модели ущерба биоты в случае аварии при практической реализуемости полученных выводов и ограниченности математических методов для количественного описания удивительного комплекса биологических свойств и взаимосвязей экологических систем.

В отличие от наиболее часто используемых экспертных оценок, в работе [41] рассматриваются схемы на основе анализа чувствительности (биоты) флоры и фауны при загрязнении и строится математическая модель риска поражения биоты. К тому же, рассматриваются теоретические основы модели с применением его для решения практических задач. Авторы не ограничились своим теоретическим анализом, а построили численную модель риска поражения биоты в случае разлива нефти на шельфе Северного Каспия.

Результатами численной модели риска, разработанная авторами работы [41] являются рискованная карта загрязнения окружающей среды и рискованная карта поражения биоты. Далее приводятся определения рискованных карт, используемые в данном исследовании.

Риском загрязнения окружающей среды в определенной точке в течение периода времени является вероятность ее загрязнения с момента аварии до конца периода. Если рассчитать значение риска загрязнения окружающей среды в течение определенного времени в случае аварии в каждой точке изучаемой географической области, то получается цифровая карта, которая называется *рискованной картой загрязнения окружающей среды*.

Под *картой биоразнообразия* в данной работе называется объединенная карта ареалов обитания различных видов живых организмов.

Под *картой уязвимостью* биоты подразумевается объединенная карта ареалов обитания различных видов живых организмов, с учетом реакции на определенное загрязнение окружающей среды, в зависимости от величины загрязнения.

Для строгого описания алгоритма построения карт биоразнообразия и уязвимости биоты в работе [42] была описана математическая модель биоты на основании определенных предположений и выводов из них. Была рассмотрена единая географическая область и под биотой понимается множество объектов биоразнообразия. Для построения карт биоразнообразия и уязвимости рассмотрены лишь некоторые выборочные из них. Понятно, что если число таких объектов биоразнообразия достаточно велико, и они репрезентативно отражают горизонтальное и вертикальное распределение всего биологического разнообразия биоты выбранной области, то их описание является статистически репрезентативной оценкой состояния всей экосистемы.

Биота, как динамическая система во времени, не изменяется во времени в том смысле, что распределение географических мест обитания каждого объекта биоразнообразия повторяется из года в год и постоянно в течение каждого месяца. Таким образом, для учета сезонной составляющей при изучении биоты рассматривается разбиение календарного года на периоды (месяцы), в течение которых предполагается постоянное географическое распределение объектов биоразнообразия в своих местах обитания.

Для того, чтобы описать влияние той или иной аварии, т.е. загрязнителя, на биоту вводится понятие чувствительности к загрязнению как функции от параметров аварии и состояния биоты. Другими словами, предполагается, что каждый объект биоразнообразия в соответствии со своими биологическими свойствами реагирует на определенное загрязнение окружающей среды и для каждого объекта биоразнообразия существует функциональная зависимость от величины загрязнения.

Для описания величины воздействия аварии на биоту в качестве характеристики рассматривается время восстановления биоты после аварии. Отметим, что экосистема, как динамическая система, после аварии может полностью восстановиться или перейти в другое состояние, например, полной гибели многих биопопуляций.

Риском поражения биоты в случае аварии в определенной точке называется оценка для среднего времени восстановления определенного объекта биоразнообразия после аварии. Другими словами, если для какого-либо объекта биоразнообразия с периодом восстановления 10 лет после аварии происходит в среднем 30% относительное уменьшение биомассы, то его время восстановления после данной аварии характеризуется линейной зависимостью между ними, т.е. 3 года. Если же после аварии происходит в среднем 80% относительное уменьшение биомассы, то время восстановления уже будет определяться 8 годами. Таким образом, для характеристики общего времени восстановления всей биоты после аварии может быть использована верхняя оценка, которая называется *риском поражения биоты* при аварийном загрязнении окружающей среды.

Если рассчитать значение риска поражения биоты в случае аварии в каждой точке изучаемой географической области, то получается цифровая карта, которая называется *рисковой картой поражения биоты* в случае аварийного загрязнения или картой чувствительности биоты к загрязнению [41].

2.2 Модель расчета морских течений

Гидродинамическая модель представляет собой инструмент, способный описать или представить в какой-то мере движение воды. До появления компьютерных систем гидродинамическая модель представляла собой фактически физическую модель, сделанную в масштабе. На сегодняшний день практически все гидродинамические модели являются вычислительными цифровыми моделями.

С технологическим развитием численных моделей и вычислительных систем гидродинамическое моделирование стало частью более крупной области вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics (CFD)). Поэтому, гидродинамические модели, используемые для акваторий морей и океанов, связаны с моделями, разработанными для метеорологии, авиакосмического и автомобилестроения, систем вентиляции и так далее. Общей основой для этих моделей является численное решение основных уравнений сохранения импульса и массы [43]. Гидродинамическое моделирование отличается от других направлений CFD тем, что оно ориентировано на моделирование движения воды.

В Управлении гидрометеорологических исследований Каспийского моря РГП «Казгидромет» используется модуль Hydrodynamic программного продукта MIKE 21 (версия 1999 г.), который был разработан в Датском Гидравлическом Институте (DHI Group) для моделирования двумерных открытых потоков в озерах, заливах, прибрежных зонах и морях. Модуль Hydrodynamic, включающий в себя модель Flow Model, был адаптирован РГП «Казгидромет» к условиям Каспийского моря с разрешением по пространству 10 на 10 км для всего Каспия, и 2 на 2 км для его северной части [44, 45].

В рамках данной работы модуль Hydrodynamic программного продукта MIKE 21 был адаптирован для всего Каспийского моря на более мелкой сетке (1 км на 1 км), что позволило получить более четкую картину нагонных явлений в прибрежной зоне Северного Каспия [46, 47]. Еще одно не маловажное достоинство – это использование в данной работе современной версии ПО MIKE 21 2014 г, в которой производители программного обеспечения DHI исправили ошибки, выявленные в предыдущих релизах.

На сегодняшний день модуль Hydrodynamic программного продукта MIKE 21 является одним из универсальных инструментов для двухмерного моделирования гидродинамики морей, озер, прибрежных акваторий и шельфовых зон. Модель Flow Model, реализованная в Hydrodynamic, предоставляет пользователю проверенные технологии, подкрепленные успешным 25-летним применением данного программного средства для различных морских и прибрежных проектов по всему миру. Это в свою очередь дает пользователю максимальную гибкость, высокую производительность и полную уверенность в результатах моделирования [48, 49].

2.3 Модель расчета распространения нефти в водной среде

Нефть является сложной смесью нескольких тысяч углеводородов (в основном жидких, 80-90% по массе), нафтеновых кислот, асфальтенов, смол и

других компонентов [50]. Она включает производные, содержащие серу (меркаптаны, тиофены, дисульфиды, тиофаны и др.), азот (гомологи пиридина, акридина, гидрохинолина и др.) и кислород. Сырая нефть содержит также до 10% воды, растворенные углеводородные газы (до 4%), минеральные соли (преимущественно хлориды - до 4 г/л) и многие микроэлементы, по соотношению концентраций которых получают дополнительную характеристику о происхождении и свойствах нефти. Среди нефтегазовых углеводородов обычно выделяют:

- алканы - парафиновые (ациклические) насыщенные углеводороды с прямой или разветвленной цепью атомов С (40-50% по объему);
- нафтены (циклопарафины) - насыщенные циклические и полициклические соединения, в которых атомы водорода могут быть замещены алкильными группами (25-75%);
- арены - ароматические ненасыщенные циклические соединения ряда бензола, где атомы водорода могут быть также замещены алкильными группами (обычно до 10-20, реже до 35%);
- алкены (олефины) - ненасыщенные нециклические углеводороды с прямой или разветвленной цепью и двойной связью $C=C$ (соединения этого ряда не входят в состав сырой нефти, но являются основным продуктом ее крекинга).

Нефть присутствует в водной среде в виде нескольких агрегатных состояний: поверхностных пленок (сликов); растворенных форм; эмульсий (типа «нефть в воде» и «вода в нефти»); взвешенных форм (плавающие на поверхности и в толще воды мазутно-нефтяные образования, сорбированные на взвешах нефтяные фракции); осажденных на дне твердых и вязких компонентов; аккумулированных в гидробионтах соединений.

С первых же секунд контакта нефти и ее продуктов с морской средой развивается сложнейшая картина их превращений, ход, длительность и результаты которых зависят от свойств и состава самой нефти, а также от условий окружающей среды (рисунок 2).

Главными чертами этой картины являются: динамизм (особенно на первых стадиях) и тесное переплетение физических, химических и биологических процессов рассеяния и трансформации компонентов нефти (вплоть до их полного исчезновения как исходных субстратов).

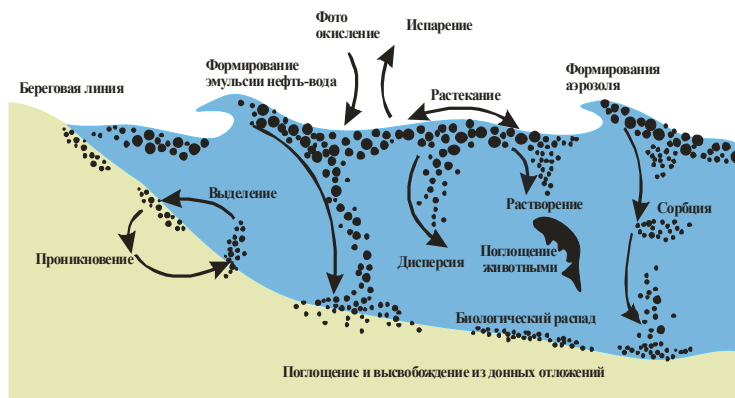


Рисунок 2 – Схема преобразования нефти и ее продуктов в морской среде

Суммарный эффект всех процессов, отображенных на рисунке 2, в том, что нефть быстро теряет свои первоначальные свойства, разделяется на группы и фракции разных форм, состав и химическая структура которых радикально трансформируется, а содержание падает в результате рассеяния и разложения вплоть до исчезновения исходных и промежуточных соединений с образованием углекислого газа и воды.

В модели DHI MIKE 21 Oil Spill [51, 52] нефть в водной среде рассматривается как перемещение большого числа дискретных частиц по случайной траектории, т.е. смещение каждой частицы вычисляется как сумма адвективного детерминированного компонента и независимой случайной флуктуации типа Марковского процесса. Такой подход называется методом дискретных частиц Лагранжа. При попадании частицы в водную среду ее траектория и масса записываются, как функция от времени относительно расчетной сетки, фиксированной в пространстве. Плотность распределения всех частиц может быть интерпретирована, как концентрация загрязняющего вещества.

Для моделирования перемещения загрязняющих веществ в однородной по вертикали среде применяют интегрированные по глубине уравнения переноса массы. Положение для каждой частицы в случайной модели перемещения описывается с помощью нелинейного уравнения Ланжевена [53, 54].

Скорость дрейфа нефтяного пятна по поверхности моря (адвекция) определяется как векторная сумма скорости течения на поверхности и скорости ветра. Поля течений могут быть рассчитаны с помощью двух- или трехмерной гидродинамической модели (HD MIKE 21 или MIKE 3). Поля течений в MIKE 21 HD интегрированы по глубине, что означает, что вертикальные скорости равны нулю, а значения горизонтальных скоростей усредняются по глубине.

Загрязнитель диффундирует в водной среде. Диффузия происходит как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях. Вертикальная дисперсия играет важную роль при расчете осаждения нефти на морское дно. Именно она является доминирующим фактором при расчете вертикального переноса осадка.

В модели DHI Oil Spill нефть разделяется на четыре основные фракции:

1) Легкая фракция нефти, к которой относятся ароматические углеводороды и другие компоненты нефти с молекулярной массой менее 160 г/моль и температурой кипения ниже 300°C;

2) Тяжелая фракция нефти с молекулярной массой более 160 г/моль и температурой кипения выше 250°C - 300°C;

3) Асфальтены;

4) Парафины.

5) Две последние фракции рассматриваются в качестве специальных. В модели предполагается, что асфальтены и парафины не испаряются, не растворяются в воде и не деградируют.

Модель описывает общее количество разлитой нефти как сумму большого числа треков дискретных частиц нефти. Эти нефтяные треки подвергаются физико-химическим процессам, такими как: растекание, испарение,

растворение, эмульсификация, осаждение, биodeградация, фотоокисление и вертикальная дисперсия.

Растекание – процесс, в котором поведение разлитой на поверхности моря нефти контролируется действием сил тяжести, ее вязкостью и поверхностным натяжением. Площадь слика в модели DHI Oil Spill определяется как площадь нефти на поверхности моря. Она эквивалентна площади сликов, образованных отдельными частицами нефти при прохождении своих случайных треков. Изменение площади во времени описано в работе [55].

Испарение – процесс, особенно важный для менее растворимых насыщенных нефтяных углеводородов, так как при контакте с воздухом происходит улетучивание нефти в атмосферу. В первые несколько суток после разлива нефти соответственно до 75, 40 и 5% ее легких, средних и тяжелых фракций переходит в газовую фазу. Таким образом, на испарение нефтяного загрязнения в первую очередь влияет фракционный состав нефти, во вторую – температура воздуха и воды, площадь разлива, скорость ветра, солнечная радиация и толщина нефтяной пленки.

Процесс испарения для одной частицы нефти, которая находится в контакте с поверхностью воды (в пределах 5 см от поверхности), рассчитывается в соответствии с моделью Рида (Model of Reed) [56, 57].

Растворение – процесс, скорость которого зависит от молекулярной структуры и массы нефти. Ароматические нефтегазовые углеводороды наиболее растворимы и активно переходят в водную среду. Нафтеновые углеводороды практически в воде не растворяются.

Эмульсификация – процесс, развивающийся за счет гидродинамических факторов при поступлении в морскую среду нефтегазовых углеводородов в виде эмульсий и присутствии в составе нефти высокомолекулярных соединений, особенно активно участвующих в образовании эмульсий. В модели DHI Oil Spill эмульсификация описывается как равновесный процесс образования двух эмульсий: вода-в-нефти и нефть-в-воде. Для описания процесса эмульсификации используется формула первого порядка, описанная в работе [58, 59]. В модели DHI Oil Spill используется индекс эмульсионной устойчивости, который приведен в работе [60].

Осаждение – процесс, в котором до 10-30% нефти сорбируется на взвеси и осаждается на дно. Седиментация развивается в основном в прибрежной зоне и на мелководье, где много взвеси и происходит активное перемешивание водных масс.

Биodeградация – процесс, определяющий конечную судьбу нефти в морской среде. До 100 видов бактерий и грибов способны использовать нефть в качестве субстрата для роста и развития биомассы.

Фотоокисление – процесс в водной среде начинает развиваться лишь спустя сутки после поступления нефти в море. Часто ее химическое окисление сопровождается ее фотохимическим разложением под воздействием ультрафиолетовой части солнечного спектра.

Важным фактором перемещения нефтяного загрязнения с морской поверхности в толщу воды является *вертикальная дисперсия*. В модели DHI Oil Spill этот процесс основан на работе [61, 62].

2.4 Анализ геоинформационного обеспечения

Географические информационные системы представляют собой компьютерные средства для отображения и анализа данных, которые позволяют интегрировать и анализировать пространственные данные (информацию о местоположениях). Географические данные могут включать таблицы с информацией, изображения или данные о реальных объектах, например, линии для дорог, точки для деревьев и полигоны для зданий. Преимущество ГИС состоит в том, что вы можете запрашивать все таблицы и слои, затем выполнять анализ всех этих форм данных. ГИС предоставляет мощные инструменты для визуальных и аналитических выводов, которые практически невозможно интерпретировать из простых таблиц данных.

ГИС является одной из многих информационных технологий, изменивший способы, которыми географы проводят исследования и вносят вклад в общество. В последние два десятилетия геоинформационные технологии оказали огромное влияние на исследовательские методы, специфичные для географии, а также на общие способы общения и сотрудничества ученых. ГИС позволяют географам собирать и анализировать информацию гораздо быстрее, чем это возможно с помощью традиционных методов исследования. ГИС можно рассматривать как интегрирующую технологию, поскольку она опирается на методы, которые географы долго использовали для анализа природных и социальных систем.

Важность ГИС как интегрирующей технологии также очевидна в ее происхождении. Развитие ГИС основывается на инновациях, сделанных по различным дисциплинам: география, картография, фотограмметрия, дистанционное зондирование, геодезия, статистика, компьютерные науки, искусственный интеллект, демография и многие другие отрасли науки.

Можно сделать три замечания по определениям ГИС:

Во-первых, ГИС связана с другими приложениями баз данных, но с важным отличием. Вся информация в ГИС связана с пространственной привязкой. Другие базы данных могут содержать локационную информацию (например, уличные адреса или почтовые индексы), но база данных ГИС использует гео-ссылки в качестве основного средства хранения и доступа к информации.

Во-вторых, ГИС объединяет технологии, в то время как другие технологии могут использоваться только для анализа аэрофотоснимков и спутниковых изображений, для создания статистических моделей или для составления карт, все эти возможности предлагаются вместе в рамках комплексной ГИС.

В-третьих, ГИС с ее набором функций следует рассматривать как процесс, а не как просто программное или аппаратное обеспечение. ГИС предназначен для принятия решений. Способ ввода, хранения и анализа данных в ГИС должен отражать то, как информация будет использоваться для конкретной задачи исследования или принятия решения. Видеть ГИС как просто программную или

аппаратную систему - значит упустить ту ключевую роль, которую она может сыграть в процессе принятия всеобъемлющих решений.

В первые десятилетия ГИС специалисты сосредоточивались в основном на компиляции данных и проектах целевых приложений, затрачивая большую часть своего времени на создание баз данных ГИС и разработку географических знаний. Постепенно специалисты по ГИС начали использовать и эксплуатировать эти скопления знаний на многочисленных рабочих станциях ГИС для сбора географических наборов данных, создания рабочих потоков для сбора данных и контроля качества, создания карт аналитических моделей и документирования их работы и методов.

Это укрепило традиционный взгляд пользователя ГИС на профессиональную научную рабочую станцию, которая подключается к наборам данных и базам данных. Рабочая станция имела комплексное ГИС-приложение с расширенной логикой ГИС и инструментами, которые использовались для выполнения этих задач.

Эта концепция программного обеспечения ГИС оказалась неоценимой и была широко принята специалистами ГИС почти в 200 000 организаций по всему миру. Фактически эта модель клиент-серверных вычислений оказалась настолько успешной, что многие думают только о ГИС в этом контексте. Однако видение ГИС расширяется. Последние достижения в области вычислительной техники – рост Интернета, развитие технологий СУБД, объектно-ориентированное программирование, мобильные вычисления и широкое внедрение ГИС привели к эволюции видения и роли ГИС.

В дополнение к настольным системам ГИС, программное обеспечение ГИС может быть централизовано на серверах приложений и веб-серверах для предоставления возможностей ГИС любому количеству пользователей по сетям. Фокусированные наборы ГИС-логики могут быть встроены и развернуты в пользовательских приложениях.

Перед проектированием системы необходимо провести анализ возможных платформ, средствами которых можно реализовать поставленные задачи. Для реализации системы с возможностью отображения на карте результатов анализа и пользовательского взаимодействия с системой требуется разработка веб-приложения с элементами ГИС. В выборе ГИС были проанализированы веб-ориентированные системы как MapServer, MapFish, GeoMixer, и ArcGIS (таблица 1) [63].

MapServer - это серверная геоинформационная система с открытым исходным кодом, написанный на языке программирования С. Помимо просмотра данных ГИС, MapServer позволяет создавать «географические карты изображений», то есть карты, которые могут направлять пользователей к контенту. Например, Minnesota DNR Recreation Compass предоставляет пользователям более 10 000 веб-страниц, отчетов и карт через одно приложение. Это же приложение служит «движком карты» для других частей сайта, обеспечивая при необходимости пространственный контекст.

MapServer был первоначально разработан Проектом ForNet Университета Миннесоты в сотрудничестве с NASA и Миннесотским отделом природных

ресурсов (МОПР). Позднее он был размещен в рамках проекта TerraSIP, спонсируемого NASA проекта между Университета Миннесоты и консорциумом по управлению земельными ресурсами.

MapServer является одним из основополагающих проектов фонда OSGeo и поддерживается растущим числом разработчиков со всего мира. Его поддерживают различные группы организаций, которые финансируют усовершенствования и техническое обслуживание и управляются в рамках OSGeo руководящим комитетом проекта MapServer, состоящим из разработчиков и других участников.

Картографический вывод MapServer:

- Отрисовка зависимых от масштаба функций и выполнение приложений
- Маркировка слоев
- Полностью настраиваемый, управляемый шаблонами выход
- Шрифты TrueType
- Автоматизация элементов карты (масштабная шкала, справочная карта и легенда)
- Тематическое отображение с использованием классов, основанных на логических или регулярных выражениях
- Поддерживает популярные языки и среды разработки как PHP, Python, Perl, Ruby, Java и .NET.
- Имеет поддержку операционных систем Linux, Windows, Mac OS X, Solaris и другие.
- Имеет возможность работать с множествами растровых и векторных форматов данных как TIFF/GeoTIFF, NetCDF, MrSID, ECW и многие другие с помощью GDAL. Также поддерживает данные ESRI shapefiles, PostGIS, Spatialite, ESRI ArcSDE, Oracle Spatial, MySQL и многие другие с помощью OGR [64].

MapFish представляет собой гибкий и полнофункциональный фреймворк для создания многофункциональных веб-картографических приложений. Он подчеркивает высокую производительность и высокое качество развития.

MapFish основан на Python веб-фреймворке Pylons. MapFish расширяет Pylons с геопространственной функциональностью. MapFish дает конкретные инструменты для создания веб-сервисов, что позволяет запрашивать и редактировать географические объекты. MapFish также предоставляет полный RIA-ориентированный JavaScript инструменты, среду тестирования JavaScript, а также инструменты для сжатия JavaScript кода. Инструменты JavaScript состоит из ExtJS, OpenLayers, GeoExt JavaScript инструментарию.

MapFish совместим с Open Geospatial Consortium стандартами. Это достигается за счет OpenLayers или GeoExt, и поддерживает несколько норм OGC, как WMS, WFS, WMC, KML, GML и т.д. MapFish является системой с открытым исходным кодом и распространяется под лицензией BSD [65].

GeoMixer – программный продукт ИТЦ СКАНЭКС предназначенный для работы с географическими данными в локальной сети организации или в Интернете. У GeoMixer имеется Web-GIS интерфейс, который позволяет

работать через интернет или можно работать с приложением на домашнем компьютере.

GeoMixer WEB-GIS – это веб-ориентированное приложение для работы с геоданными и геосервисами. Оно позволяет быстро и легко создавать свои проекты на основе растровых и векторных данных, подключать к системе сторонние сервисы, и предоставлять доступ к этим данным другим пользователям для совместной работы и просмотра геоданных. Имеется GeoMixer API для разработчиков веб-картографических сервисов, который позволяет подключать карту в виде топоосновы, содержащую космические снимки сервера kosmosnimki.ru. Основным преимуществом использования GeoMixer API вместе с веб-приложением является, что данная технология имеет возможность смешивать наборы геоданных из различных источников (например, с сервера kosmosnimki.ru и с локального сервера пользователя, на котором установлено приложение «GeoMixer») [66].

ArcGIS предоставляет масштабируемую инфраструктуру для реализации ГИС для одного пользователя или многих пользователей на настольных компьютерах, серверах, в Интернете и в полевых условиях. ArcGIS - это интегрированный набор программных продуктов ГИС для построения полнофункциональной ГИС. Он состоит из ряда программ для развертывания ГИС:

- ArcGIS Desktop - интегрированный набор профессиональных ГИС-приложений
- ArcGIS Engine - встраиваемые компоненты разработчика для пользовательских ГИС-приложений
- Серверные ГИС - ArcSDE, ArcIMS и ArcGIS Server
- Мобильные ГИС - ArcPad, а также ArcGIS Desktop и Engine для планшетных компьютеров

Настольная ГИС является основной программой, из которого специалисты ГИС собирают и используют географическую информацию и знания. Специалисты ГИС используют стандартный рабочий стол в качестве инструмента для повышения производительности при разработке, распространении, управлении и публикации географических знаний.

ArcGIS Desktop представляет собой интегрированный набор передовых приложений ГИС. Он включает в себя серию настольных приложений Windows (например, ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox и ArcGlobe) с компонентами пользовательского интерфейса. ArcGIS Desktop доступен на трех функциональных уровнях - ArcView, ArcEditor и ArcInfo - и может быть настроен и расширен с использованием набора разработчиков ArcGIS Desktop Developers, который входит в комплект.

Пользователи ГИС развертывают централизованные серверные ГИС, чтобы публиковать и обмениваться географическими знаниями в крупных организациях и у многих других пользователей в Интернете. Серверное ГИС-программное обеспечение используется для любого вида централизованно размещаемых ГИС-вычислений и расширяется для поддержки управления данными ГИС и геообработки. В дополнение к обслуживанию карт и данных,

ГИС-сервер обеспечивает все функциональные возможности рабочей станции ГИС на общем центральном сервере, включая картографирование, пространственный анализ, сложные пространственные запросы, усовершенствованную сборку данных, распределенное управление данными, пакетную геообработку, применение геометрических правил целостности и т.д.

Серверы ГИС совместимы с ИТ и отлично работают с другими корпоративными программными продуктами, такими как веб-серверы, СУБД и корпоративные платформы, включая .NET и Java 2 Platform Enterprise Edition. Это позволяет интегрировать ГИС с многочисленными другими технологиями информационных систем.

ArcGIS Server - сервер приложений, который включает в себя общую библиотеку объектов программного обеспечения ГИС для создания сторонних ГИС-приложений в корпоративных и веб-средах. ArcGIS Server - это новый продукт, который используется для создания центральных корпоративных приложений ГИС, веб-служб на основе SOAP и веб-приложений.

Встроенная ГИС может использоваться для добавления выбранных ГИС-компонентов в приложения для предоставления функциональности ГИС в любой точке организации. Это обеспечивает доступ к функциям ГИС с помощью простых, сфокусированных интерфейсов многими из тех, кому необходимо применять ГИС в качестве инструмента в своей повседневной работе.

ArcGIS Engine предоставляет ряд встраиваемых компонентов ArcGIS, которые используются вне приложения ArcGIS Desktop (например, объекты отображения управляются как часть ArcGIS Engine, а не в ArcMap). Используя ArcGIS Engine, разработчики создают сфокусированные ГИС-решения с простыми интерфейсами для доступа к любому набору функций ГИС с использованием C++, COM, .NET и Java.

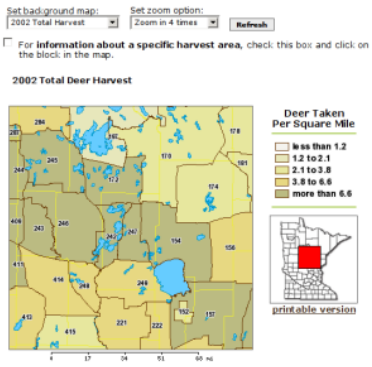
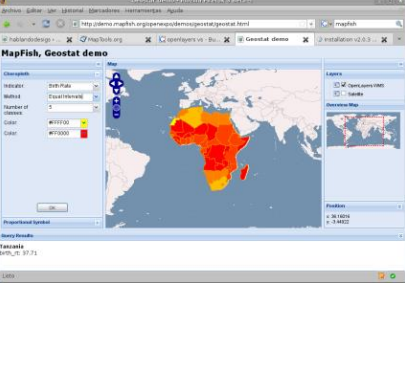
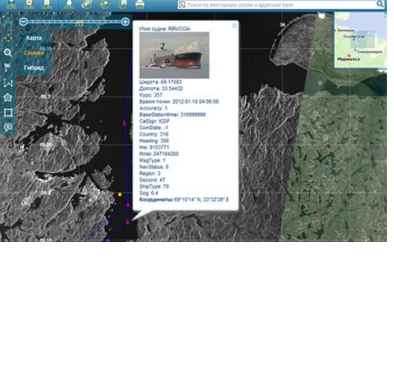
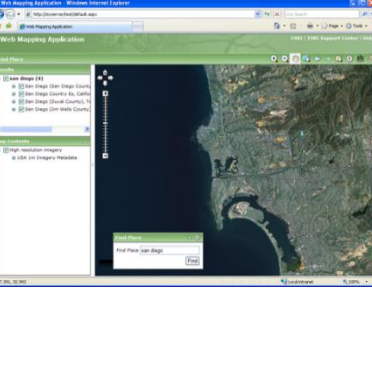
База геоданных, сокращенное от географической базы данных, является базовой моделью географической информации для организации данных ГИС в тематических слоях и пространственных представлениях. База геоданных представляет собой комплексную логику приложений и инструменты для доступа к данным ГИС и управления ими. Логика приложения базы геоданных доступна в клиентских приложениях (таких как ArcGIS Desktop), конфигурациях серверов (таких как ArcGIS Server) и встроенных в заказные приложения (ArcGIS Engine) [67].

Результат анализа выявил подходящим вариантом программный комплекс ArcGIS. Для построения необходимых карт используется ArcGIS for Desktop, а для публикации этих карт на веб портале серверное приложение ArcGIS for Server.

Таблица 1 – Сравнение ГИС систем

Параметры сравнения	MapServer	MapFish	GeoMixer	ArcGIS
1	2	3	4	5
Страна происхождения	США	Франция, Швейцария	РФ	США
Компания разработчик	University of Minnesota	Camptocamp SA	ИТЦ СКАНЭКС	ESRI
Документация	Языки: англ. Уровень: пользователь, разработчик	Языки: англ., франц. Уровень: пользователь, разработчик	Языки: рус. Уровень: пользователь, разработчик	Языки: англ., рус. Уровень: пользователь, разработчик
Комментарии	Базовые функции масштабирования и навигации, легенда. Поддерживает SLD. Расширяется с помощью HTML-шаблонов и MapScript. Поддерживает символы (точки, линии) и подписи. Нет AJAX.	Фреймворк. Направлен на создание RIA. Основан на Pylons. Клиентская часть использует дополненные версии OpenLayers, GeoExt и ExtJS. Есть интерфейс 'Studio' для управления веб-приложениями.	Нужен браузер, поддерживающий flash. API — интерфейс для разработки собственных приложений — позволяет интегрировать проекты, созданные в Web-GIS, в сторонние сайты, подключать дополнительные модули и сервисы.	ArcGIS состоит из следующих блоков: ArcGIS for Desktop (ArcView, ArcReader, ArcInfo, ArcEditor) ArcGIS for Server, ArcGIS Engine, ArcPad, ArcObjects. Разработчикам ArcGIS дает все необходимые инструменты для создания собственных приложений для различных платформ.
На каком языке написан	C/C++	Javascript; Python	.NET, Flash	C#, Visual Basic, Python
Язык API	Java, .NET, Perl, PHP, Python, Ruby	Java; JavaScript; PHP; Python; Ruby	JavaScript	JavaScript; Flex; Silverlight

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
Поддерживаемые сервисы OGC	WMS; WFS	WMS; WFS	WMS	WMS, WCS, WFS, WPS и WMTS
Работа с тайлами	нет	да	да	да
Скриншот				
Текущая версия	6.0.3 от 18.05.2012	2.2 от 09.03.2012	1.9.1 от 22.08.2012	10.1 от 01.07.2012
Официальная страница	http://www.mapserver.org	http://www.mapfish.org	http://geomixer.ru/	http://www.esri.com

Выводы по второму разделу

В данной главе рассматриваются используемые для дальнейшей работы модели, методы и технологии для оценки воздействия загрязнения на окружающую среду. Были даны основные определения результатов, получаемые от математической модели стохастической оценки экологического риска загрязнения окружающей среды и риска поражения животного и растительного мира (биоты). Так как в основе стохастической модели оценки рисков лежит прогноз распространения нефтяного разлива, были приведены существующие модели расчета морских течений и расчета распространения нефти. При расчете морских течений основными факторами являются рельеф морского дна, скорость и направление ветра.

При попадании нефти в морскую среду происходят важнейшие процессы трансформации нефти, такие как растекание, испарение, растворение, эмульсификация, осаждение, биodeградация, фотоокисление и вертикальная дисперсия. Поэтому для расчета распространения нефти требуются, помимо гидродинамики моря, температура воздуха и воды, осадки и испарения, солнечная радиация, а также химические и физические параметры нефти.

Для успешной реализации поставленной цели особенно важным является выбрать правильные инструменты и технологий. Поэтому был проведен анализ существующих геоинформационных систем, и выявлена наиболее подходящая для реализации разрабатываемой платформы среда.

3 ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТА И ОЦЕНКИ РИСКОВ

3.1 Алгоритм вычислительного процесса

Численное решение прямых задач гидродинамики и нефтяного загрязнения Каспия выполняется с помощью математических моделей HD (Hydrodynamic) и OS (Oil Spill) программного комплекса MIKE 21, разработанного Датским гидравлическим институтом (DHI). Этот комплекс широко используется в мировой практике (в том числе КазГидроМет) для анализа морских течений в шельфовых районах различных морей. Комплекс MIKE 21 был адаптирован к условиям Северного Каспия с учетом мелководья, сгонно-нагонных явлений, речных притоков и других факторов.

Основной информационной единицей является карта, как дискретная функция на множестве узлов координатной сетки, наложенной на рассматриваемую акваторию моря. Это дало возможность применить методы картографического моделирования, используя инструменты геоинформатики, на всех этапах численной реализации риск – модели. В том числе при сборе и картировании данных по животному и растительному миру Северного Каспия.

В целом численная риск-модель представляет собой большой вычислительный комплекс, в котором на каждом этапе обрабатываются большие потоки данных и моделируются сложные физико-химические процессы. В данном разделе опишем общую структуру этого комплекса в соответствии со схемой, представленной далее (рисунок 3).

Подробное описание реализованного алгоритма приведено в последующих разделах.

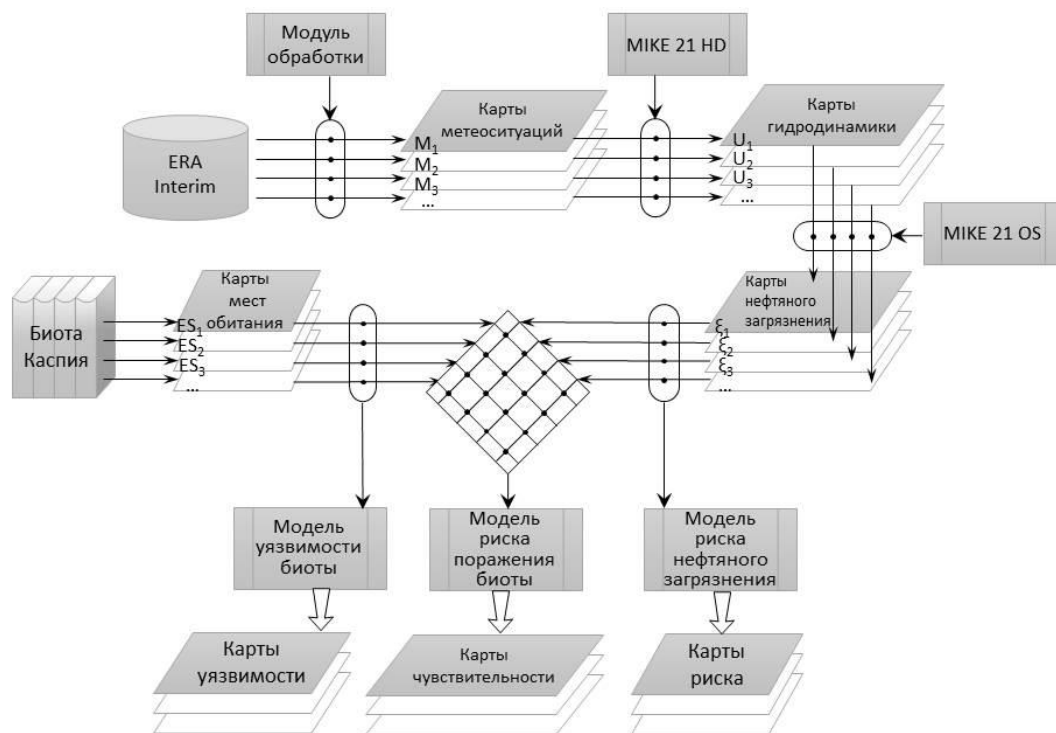


Рисунок 3 – Алгоритм численной реализации стохастической риск-модели

Как видно из схемы, вычислительную процедуру можно рассматривать как два параллельных процесса, которые стыкуются при расчете риска поражения биоты вследствие нефтяного загрязнения моря. Наиболее сложной в плане численной реализации является расчетная цепочка «метео»-«гидродинамика»-«нефть».

На этапе «метео» формируется пакет метеоситуаций с использованием базы данных ERA Interim, где собраны результаты реанализа метеорологических наблюдений и модельных расчетов за 40-летний период. Благодаря такому большому объему данных удалось сформировать репрезентативный пакет метеоситуаций. Алгоритм обработки полей метеозакономерностей из базы ERA Interim и формирования пакета метеоситуаций изложен в разделе 3.2.1.

Поля ветра, давления и температуры из указанного выше метеопакета поступали далее в расчетный блок гидродинамики Каспия. Здесь с помощью модели MIKE 21 HD для каждой метеоситуации рассчитывались скорости и направления морских течений, и формировался гидродинамический пакет в виде набора карт. Эта сложная расчетная процедура обеспечивалась большим объемом фактических данных по батиметрии моря, береговой зоне, притокам рек Волга и Урал. В связи с большим количеством исходных параметров была выполнена серия тестовых расчетов с подбором характеристик, соответствующих условиям Каспия. Полное описание расчетной процедуры приведено в разделе 3.3.1.

Следующий важный этап связан с расчетом нефтяного загрязнения моря вследствие возможной аварии. Расчеты выполняются с помощью модели MIKE 21 OS и, как результат, формируется пакет карт нефтяного загрязнения, соответствующий гидродинамическому пакету. В основу расчета положено предположение, что все параметры аварии известны, неопределенным является только время аварии. Заказчик задает период возможной аварии, зная время, в течение которого будет выполняться опасная нефтяная операция. Здесь прослеживается обратная связь – моменты аварии на заданном периоде являются начальными моментами метеоситуаций. Набор ситуаций нефтяного загрязнения (под ситуацией понимается динамический процесс распространения и трансформации нефтяного разлива с начального до конечного момента соответствующей метеоситуации) обрабатывается в специальной программе и выдается заказчику в виде карты риска нефтяного загрязнения заданной акватории моря. Для решения более сложной задачи – оценки риска поражения биоты при нефтяном загрязнении - в соответствующий модуль передается весь пакет, где расчеты выполняются отдельно для каждой ситуации.

Параллельный вычислительный процесс связан с анализом растительного и животного мира Каспия. Исходные данные были получены путем обработки большого объема литературных источников, причем обработка выполнялась целенаправленно, следуя требованиям теоретической модели картирования биоразнообразия и уязвимости (см. раздел 3.2.2). Результатами обработки были карты мест обитания различных сообществ, восстановленные, как указано выше, по литературным данным мониторинговых и экспедиционных наблюдений.

Далее были построены карты биоразнообразия и уязвимости. Эти достаточно интуитивные понятия строго определены в разделе 3.2.2.

Итогом всего вычислительного процесса являлся расчет риска поражения биоты в результате аварийного разлива нефти. Здесь совместно обрабатывались карты нефтяного загрязнения и карты зон обитания различных сообществ с учетом их уязвимости. На схеме это проиллюстрировано множеством точек пересечения нефтяных карт и карт зон обитания. Отметим, риск поражения биоты по смыслу фактически совпадает с понятием чувствительности биоты к нефтяному загрязнению. Однако, в данной работе это интуитивное понятие имеет четкое математическое определение и рассчитывается, следуя конкретному алгоритму. Кроме того, понятия биоразнообразия и уязвимости также получили также строгое математическое определение.

3.2 Информационное обеспечение системы

Данный раздел заключается в описании формирования информационного обеспечения системы. Наиболее значительные информационные потоки поступают в систему при формировании сервисов по метеорологии и чувствительности биоты.

3.2.1 Формирование пакета метеоситуаций

Метеорологические данные, используемые в системе RANDOM, подразделяются на исторические и прогнозные. Исторические данные загружаются из базы данных реанализа ERA Interim, созданной Европейским Центром Среднесрочных Прогнозов Погоды (ECMWF) и расположенной на его сервере [68]. Прогнозные метеорологические данные ECMWF поступают на ftp-сервер ТОО «EcoRisk».

Оба вида данных поступают в бинарном формате GRIB и аккумулируются на выделенном сервере хранения данных. Параметры метеорологических данных иллюстрирует таблица 2.

Прогнозные данные поступают на сервер ежедневно. Четырехсрочный прогноз метеоситуаций дается на 10 дней вперед с интервалом 6 часов (40 файлов). Метеоданные за дату начала отчета на срок 00:00 GMT являются результатом реанализа (1 файл). Итого, ежедневно на сервер поступает 41 файл в формате GRIB, относящиеся к прогнозным метеорологическим данным. Исторические метеоданные реанализа ERA Interim доступны для скачивания с сайта ECMWF на период с 1 января 1979 г. по сегодняшние дни (<http://apps.ecmwf.int/datasets/>).

Таблица 2 – Метеорологические параметры

Название	Краткое название	Единицы измерения
Скорость ветра U на высоте 10 м	10U	м/с
Скорость ветра V на высоте 10 м	10V	м/с
Атмосферное давление на поверхности	SP	Па

Продолжение таблицы 2

Название	Краткое название	Единицы измерения
Температура воздуха на высоте 2 м	2T	К
Температура моря	SST	К
Суммарное количество осадков	TP	м
Суммарное количество испарения	E	м
Солнечная радиация	SSRD	Дж/м ²

Для проведения расчетов гидродинамики Каспийского моря и расчета распространения нефтяного загрязнения по его акватории необходимо чтобы метеоданные находились в специальном формате ПО MIKE21 DFS2 [69]. Для осуществления перехода прогнозных метеорологических параметров из формата GRIB в DFS2 была разработана программа, включающая в себя следующие процедуры:

Копирование с FTP сервера GRIB файлов за указанную дату. Это осуществляется с помощью процедуры DownloadGrib().

Конвертация файлов, находящихся в формате GRIB, в текстовый формат XYZ для каждого срока и метеопараметра в отдельности. Данная конвертация осуществляется посредством процедуры Grib2Txt(), запускающий скрипт grib2txt.sh, который включает в себя API, разработанный ECMWF под операционную систему Linux [70]. Созданный скрипт реализован в программе Cygwin, являющейся UNIX-подобной средой и имеющей интерфейс командной строки для Microsoft Windows. Реализация скрипта в данной среде вызвана тем, что все последующие действия по конвертации метеопараметров осуществляются в ОС Windows.

Конвертация файлов, находящихся в текстовом формате данных XYZ, в формат ASCII GRID, назначение картографической проекции UTM-39 и последующая конвертация в формат DFS2. Выбор формата ASCII GRID объясняется тем, что в ПО MIKE поддерживается преобразование из указанного формата в DFS2 – конечный формат использования метеорологических данных. Конвертация осуществляется выполнением процедуры Txt2Dfs(), которая запускает реализованный на языке Python скрипт txt2dfsArc10.py, использующий библиотеки ПО ArcGIS и MIKE. При конвертации метеоданные проходят следующие этапы обработки:

С использованием инструмента MakeXYEventLayer файлы формата XYZ импортируются в слои точечных данных ArcGIS;

С применением инструмента PointToRaster слои точечных данных конвертируются в растровые слои GRID формата, параллельно осуществляется перепроектирование слоев из географических координат в систему координат UTM-39;

С использованием инструмента RasterToASCII осуществляется конвертация растровых слоев в файлы формата ASCII GRID.

С применением инструмента GRID2DFS программного продукта MIKE производится импорт метеоданных в формат DFS2;

Формирование конечных файлов в формате DFS2. Данные преобразования осуществляются с помощью процедуры JoinDfs() с использованием библиотек программного продукта MIKE. При конвертации метеоданные проходят следующие этапы обработки:

Слияние в один DFS2-файл всех метеорологических параметров и всех сроков данных, соответствующих прогнозу заблаговременностью 240 часов;

Изменение значений метеопараметров SP, 2T, SSTK, TP, E, SSRD посредством перехода от единиц измерения ECMWF к единицам измерения, запрашиваемым ПО MIKE;

Интерполяция DFS2-файла на прямоугольную сетку с размером ячейки 1000 на 1000 м и формирование области вычисления прямоугольной формы.

Формирование файла в формате DFS0, содержащего усредненные для акватории Северного Каспия значения потока солнечной радиации. Вычисление среднего значения на каждый срок осуществляется с помощью процедуры AverageSSRD() с использованием библиотек программного продукта MIKE.

Конвертация в векторный формат представления данных и дополнительные преобразования метеорологических параметров для их последующей визуализации в системе RANDOM. Преобразование метеорологических данных, находящихся в текстовом формате XYZ, в векторный формат представления данных для отображения на карте осуществляется с помощью скрипта txt2shpArc10.py с использованием библиотек программного продукта ArcGIS, который запускается вызовом процедуры Txt2Shp().

Перечисленные процедуры были интегрированы воедино, и теперь они имеют одну точку запуска. Интегрирующая программа была написана на языке программирования C#. В ней реализованы перечисленные процедуры, запускаемые в указанном выше порядке.

Для осуществления конвертирования исторических метеопараметров из формата GRIB в DFS2 осуществляется последовательное выполнение процедур, аналогичных процедурам преобразования прогнозных метеопараметров, описанных выше. Отличие заключается только в процессе загрузки исходных данных с сервера ECMWF. Скачивание осуществляется с помощью процедуры DownloadGrib(), запускающей скрипт esmwfdownload.py.

Рисунок 4 демонстрирует потоки файлов прогнозных метеопараметров при осуществлении преобразований из исходного формата GRIB в форматы: DFS2, DFS0 для метеопараметра SSRD и SHP для метеопараметров 10U, 10V, SP, 2T, SST.

Из рисунка видно, что ежедневно из Европейского Центра Среднесрочных Прогнозов Погоды поступает 41 файл в формате GRIB, которые затем преобразовываются 328 текстовых файлов (XYZ формат), то есть 1 файл для каждого из восьми метеорологических параметров (10U, 10V, SP, 2T, SST, TP, E, SSRD) и каждого прогнозного срока.

После выполнения процедуры Txt2Dfs() 328 файлов XYZ формата преобразовываются в такое же количество файлов в формате GRID, затем –

ASCII GRID, в конце в такое же количество файлов в формате DFS2. Слияние 328 DFS2-файлов в один осуществляется с помощью процедуры JoinDfs().

Осреднение данных по метеорологическому параметру SSRD осуществляется процедурой AverageSSRD, в результате получается 1 dfs0 файл на 41 срок.

Формирование файлов в формате SHP осуществляется в процедуре Txt2Shp(). Векторизации подвергаются следующие метеорологические параметры: 10U, 10V, SP, 2T, SST.

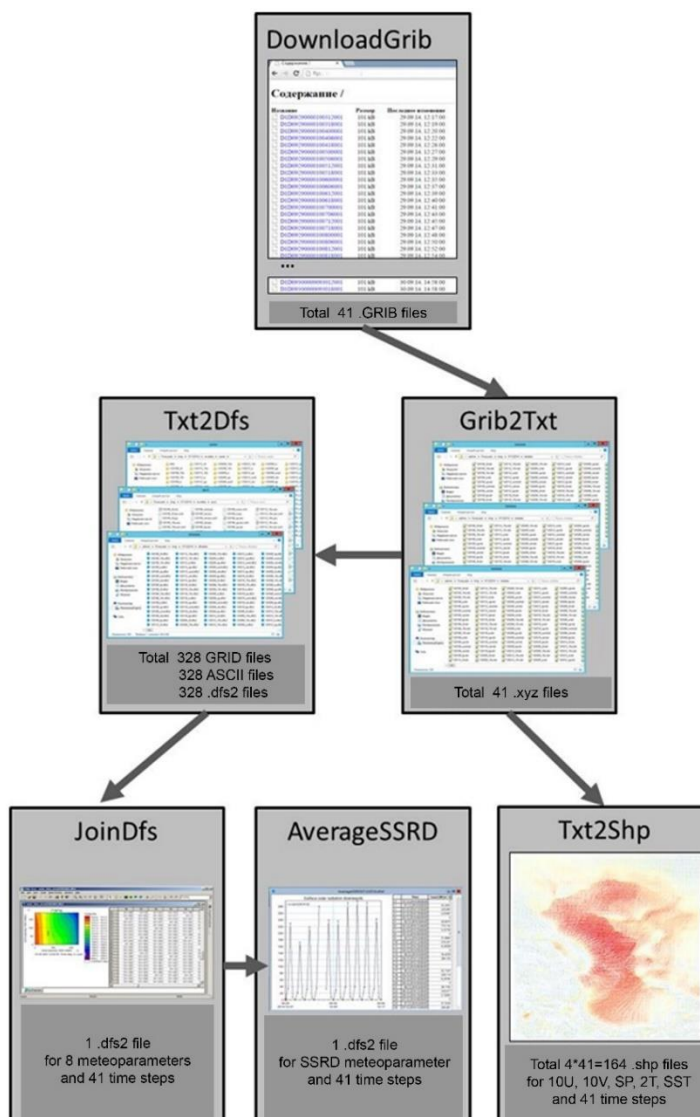


Рисунок 4 – Преобразование метеопараметров из формата GRIB в форматы, требуемые для проведения моделирования и визуализации

Для метеопараметров (10U, 10V), характеризующих скорости ветра, для каждого срока формируется точечные SHP файлы, содержащие атрибутивные поля направления и скорости ветра. Для метеопараметра SP для каждого срока формируются полигональные SHP файлы, содержащие атрибутивное поле, содержащее значение атмосферного давления. Для метеопараметров 2T, SST, содержащих значения температуры воздуха и морской поверхности, для каждого

срока формируются линейные SHP файлы, включающие в себя атрибутивные поля, отображающие значение температуры для указанного срока. Количество SHP файлов указанных метеопараметров составляет 164 [71].

Проиллюстрируем пакет метеоситуации для периода с 16 по 26 марта 2015 г. Для этого визуализируем несколько шагов по времени для некоторых метеорологических параметров в ПО MIKE Zero, который позволяет сформировать карту метеопараметров и экспортировать ее в растровый формат данных.

Рисунок 5 иллюстрирует карты изменения скорости и направления ветра на высоте 10 м и атмосферного давления для каждой точки расчетной области Каспийского моря и прилегающей территории для первого дня (16 марта 2015 г.) выбранного периода времени с шагом 6 часов. Из подписей под приведенными четырьмя картами видно, что они являются 0,1,2,3 из 40 временных шагов для периода времени с 16 по 26 марта 2015 г. Скорость и направление ветра на данных картах показаны стрелками разной величины и ориентированных в разных направлениях. Атмосферное давление представлено сплошной заливкой от темно-синего до красного цвета, изменяющихся от меньшего значения атмосферного давления к большему.

Рисунок 6 иллюстрирует карты количества осадков за 25 марта 2015 г. с шагом по времени, равным 6 часов.

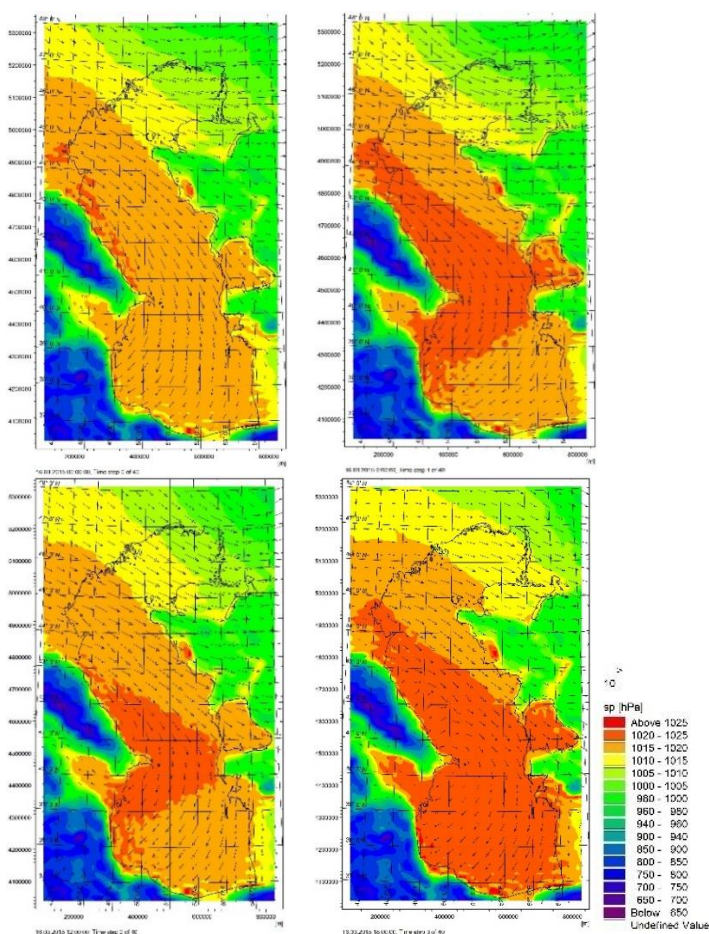


Рисунок 5 – Карты изменения скорости и направления ветра и атмосферного давления на 16 марта 2015 г с шагом 6 ч

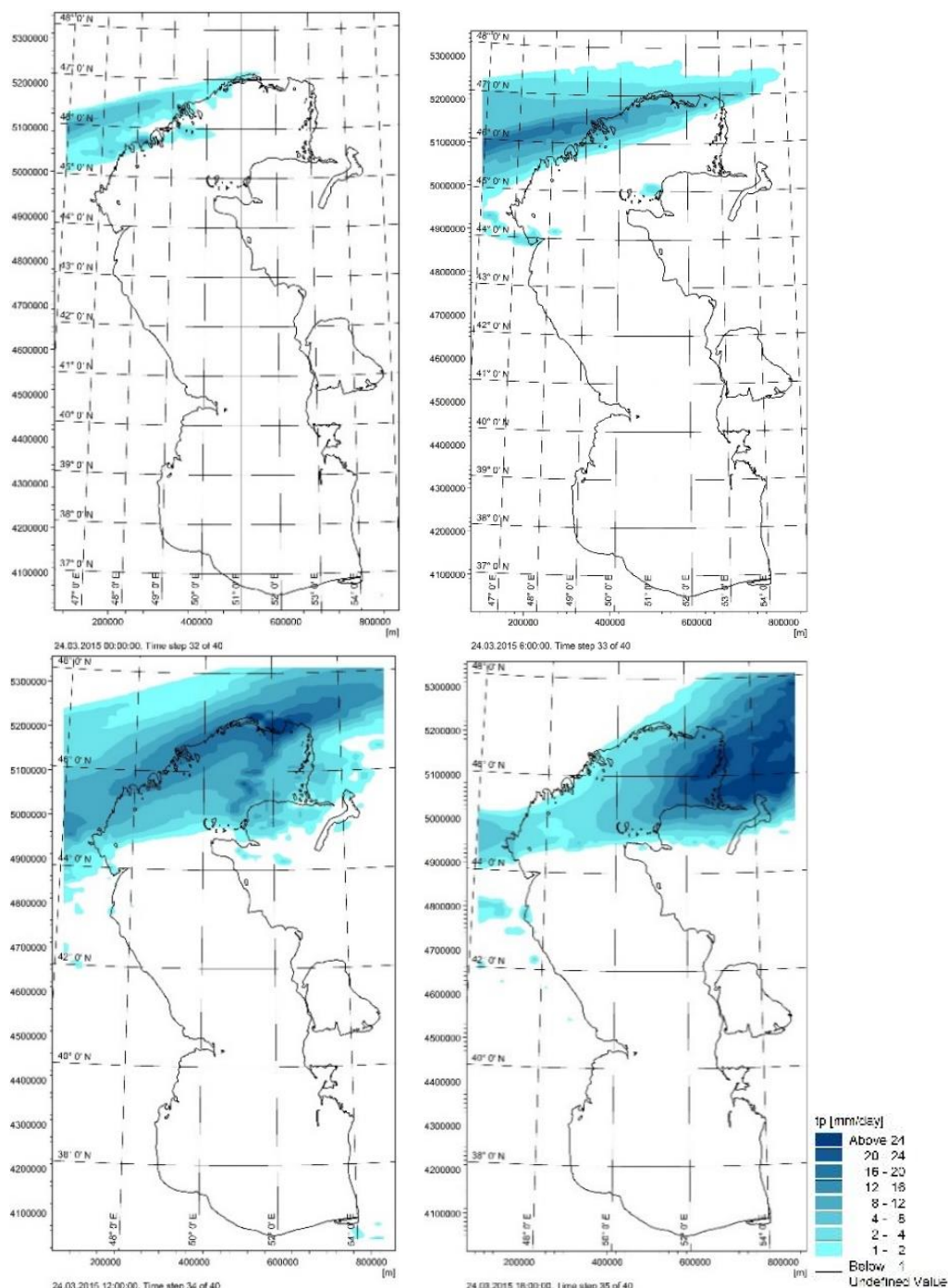


Рисунок 6 – Карты количества осадков для 24 марта 2015 г. с временным шагом 6 часов

3.2.2 Формирование карт биоразнообразия и чувствительности биоты Северного Каспия

Видовое картирование биоты и математический алгоритм построения карт биоразнообразия и уязвимости, реализовывались с использованием современных инструментов геоинформатики и геоинформационных систем (ГИС).

На первом этапе были подготовлены шаблонные карты с нанесенным очертанием каспийского моря и батиметрии для экспертной отрисовки карт обитания выбранных индикативных сообществ или объектов биоразнообразия.

Далее вся информация об ареалах обитания или распространения выбранных объектов биоразнообразия заносилась в виде векторной цифровой карты, используя методы оцифровки и редактирования векторных слоев в программном обеспечении ArcGIS for Desktop в виде полигональных шейп-файлов. Полигональный шейп-файл или тематический слой геоинформационной системы создавался для каждого объекта биоразнообразия.

Таким образом, в настоящей работе картированы места обитания для 132 видов животных, включая морских (24 вида), проходных и полупроходных (31 вид), двусторчатых (17 видов и подвидов) и брюхоногих (8 видов) моллюсков, ракообразных (18 видов), червей (5 вида), мшанок (1 вид) и околотовных наземных позвоночных – рептилий (3 вида), птиц (22 вида), млекопитающих (каспийский тюлень, ондатра и водяная полевка). Видовое разнообразие морской и прибрежной растительности нами не учитывалось. Так как некоторые виды были разделены нами на половозрелых и неполовозрелых особей, то общее количество объектов биоразнообразия составило 175, картирование каждого из которых проводилось ежемесячно для учета годовой динамики, согласно определению 1, приведенному в разделе 2.1. Ареал обитания каждого объекта биоразнообразия, который определялся на основе экспертных оценок или известных материалов (см., например, [72-78]), задавался в графическом виде.

Все объекты биоразнообразия были сгруппированы по следующим «экологическим группам»:

- *Зообентос*. В целом в группе зообентос было занесено 85 объектов биоразнообразия из них рыбы (36), черви (5), моллюски (26) ракообразные (18).

- *Зоопланктон*. В группе Зоопланктон было внесено 18 биологических объектов, из них пелагических рыб 15 объектов и моллюсков – 3 объекта.

- *Млекопитающие*. В группу млекопитающие было внесено 3 объекта биоразнообразия.

- *Проходные и Полупроходные рыбы*. В рамках группы проходных и полупроходных рыб была рассмотрена и занесена информация по 42 объектам биоразнообразия.

- *Пресмыкающиеся*. В группе пресмыкающихся было занесено 3 объекта биоразнообразия.

- *Птицы*. В группе птицы было рассмотрено 22 объекта биоразнообразия.

- *Растения*. В данном классе было в целом рассмотрено наземная растительность и фитопланктон.

В качестве примера на рисунке ниже (рисунок 7) приведены карты ареалов обитания тюленя (мультикласс «млекопитающие») в зимний и летне-осенний периоды. При проведении процедуры видового картирования распространения животных, каждый занесенный полигон отражал ареал обитания данного объекта биоразнообразия в определенный месяц, через заполнение

атрибутивных полей. При этом атрибутивная информация характеризующая сезонность обитания каждого объекта биоразнообразия в разрезе каждого месяца заполнялась в виде индикативных полей. Кроме того, дополнительная информация о периоде восстановления, названии биогруппы, типе экологического класса и пр. также заносилась в геоинформационную систему в качестве атрибутивной информации (рисунок 8).

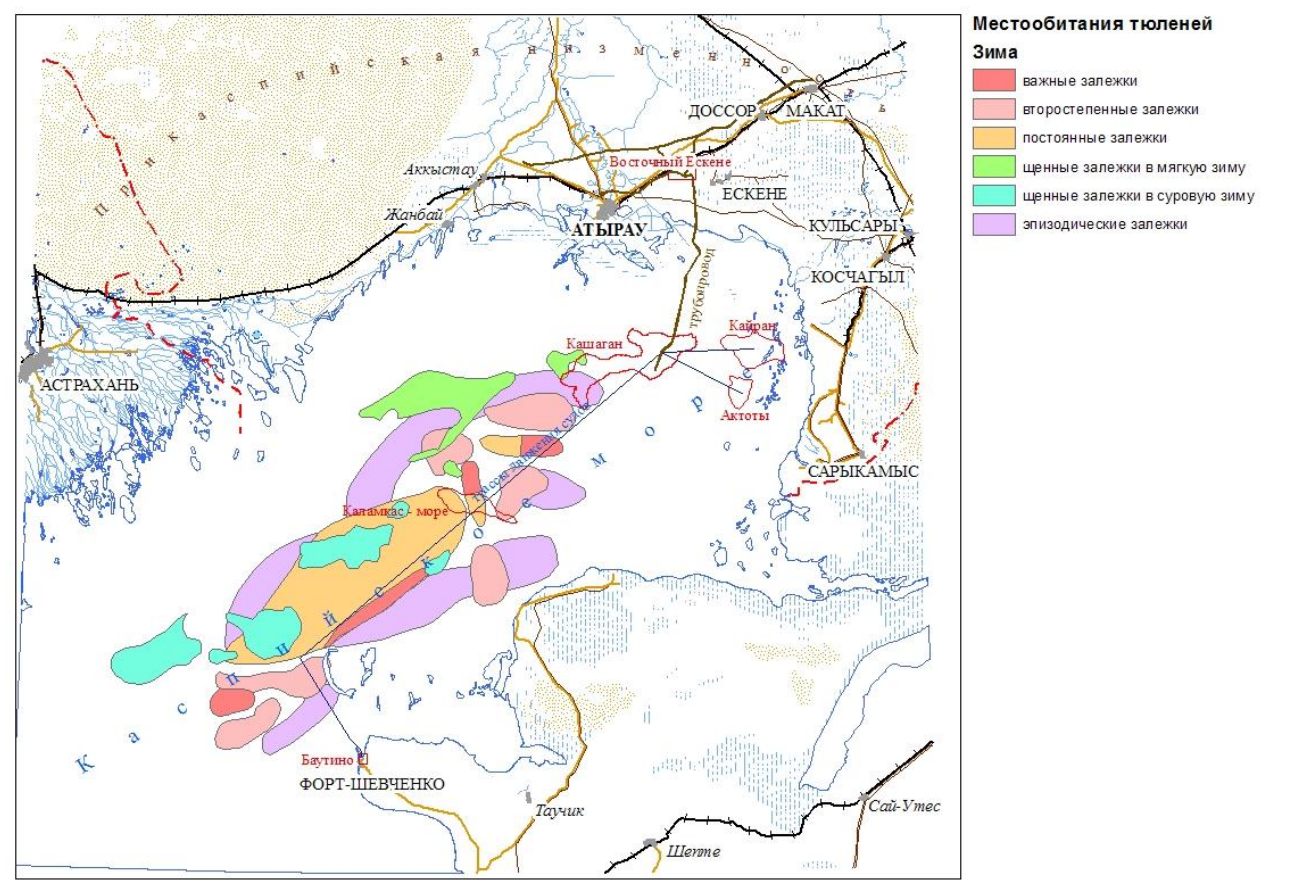


Рисунок 7 – Карта ареалов обитания Каспийского тюленя

Contents Preview Description															
vid	comment	jan	feb	mar	apr	may	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec	recov_year	type
Каспийский тюлень		1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	30	Млекопитающие
Каспийский тюлень		0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	30	Млекопитающие

Contents Preview Description															
vid	comment	jan	feb	mar	apr	may	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec	recov_year	type
Русский осетр	нерест яровой расы	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	7	Зообентос
Русский осетр		0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	7	Зообентос
Русский осетр	нерест озимой расы	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	7	Зообентос
Русский осетр		1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	7	Зообентос

Рисунок 8 – Примеры атрибутивной информации

С целью реализации математического алгоритма полигональные слои или, другими словами, векторная информация преобразовывалась в растровые географически привязанные файлы (грид-файлы), базирующиеся на регулярной сетке с применением возможностей модуля GRID пакета ArcGIS for Desktop. Матрицы грид-данных - основной формат, используемый при моделировании. При растровой форме представления элементарными пространственными объектами являются ячейки растра, всегда имеющие некоторую площадь. Растровый грид-файл снабжен атрибутивными данными, хранящимися в VAT таблице, в которой имеется информация о значениях каждой ячейки матрицы данных. В данном случае значением каждой ячейки является индикатор наличия объекта биоразнообразия.

Модуль GRID обладает довольно широким спектром различных методов моделирования и манипуляции матрицами данных с возможностью проведения различных алгебраических операций над матрицами, разделение матриц по зонам и пр. Используя данный инструментарий, опираясь на разработанный математический алгоритм [42], были построены карты биоразнообразия Северного Каспия для каждого месяца, путем сложения соответствующих цифровых карт обитания объектов биоразнообразия (рисунок 9). Данная серия карт наглядно отражает сезонное географическое распределения биоразнообразия северного Каспия, через интенсивность цветового решения карты. В данном случае светло-зелёный оттенок соответствует минимальному биоразнообразию, а с усилением интенсивности цвета биоразнообразие возрастает к максимуму, который достигается в августе.

Кроме того, используя весовые коэффициенты для каждого объекта биоразнообразия в виде периода восстановления, через умножение числа на матрицу, были построены карты для каждого объекта биоразнообразия на каждый месяц года, а также рассчитаны интегральные карты относительной уязвимости биоты Северного Каспия в разрезе каждого месяца (рисунок 10). В данной серии карт максимальная относительная уязвимость показана красным цветом и по мере снижения уязвимости желтым и наконец зеленым цветом. Как и в случае карт биоразнообразия максимальная уязвимость достигается в конце лета.

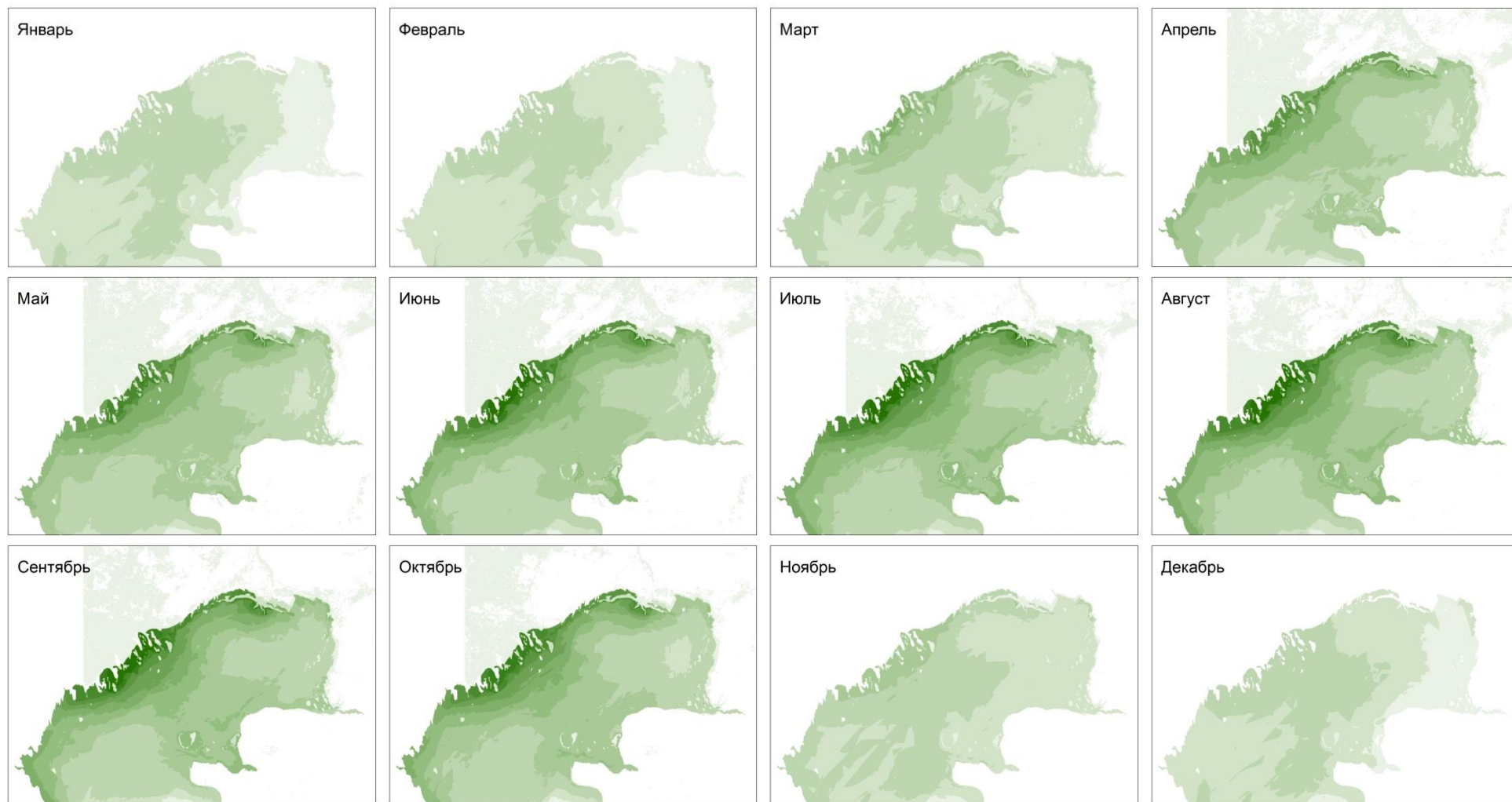


Рисунок 9 – Интегральные карты биоразнообразия по месяцам

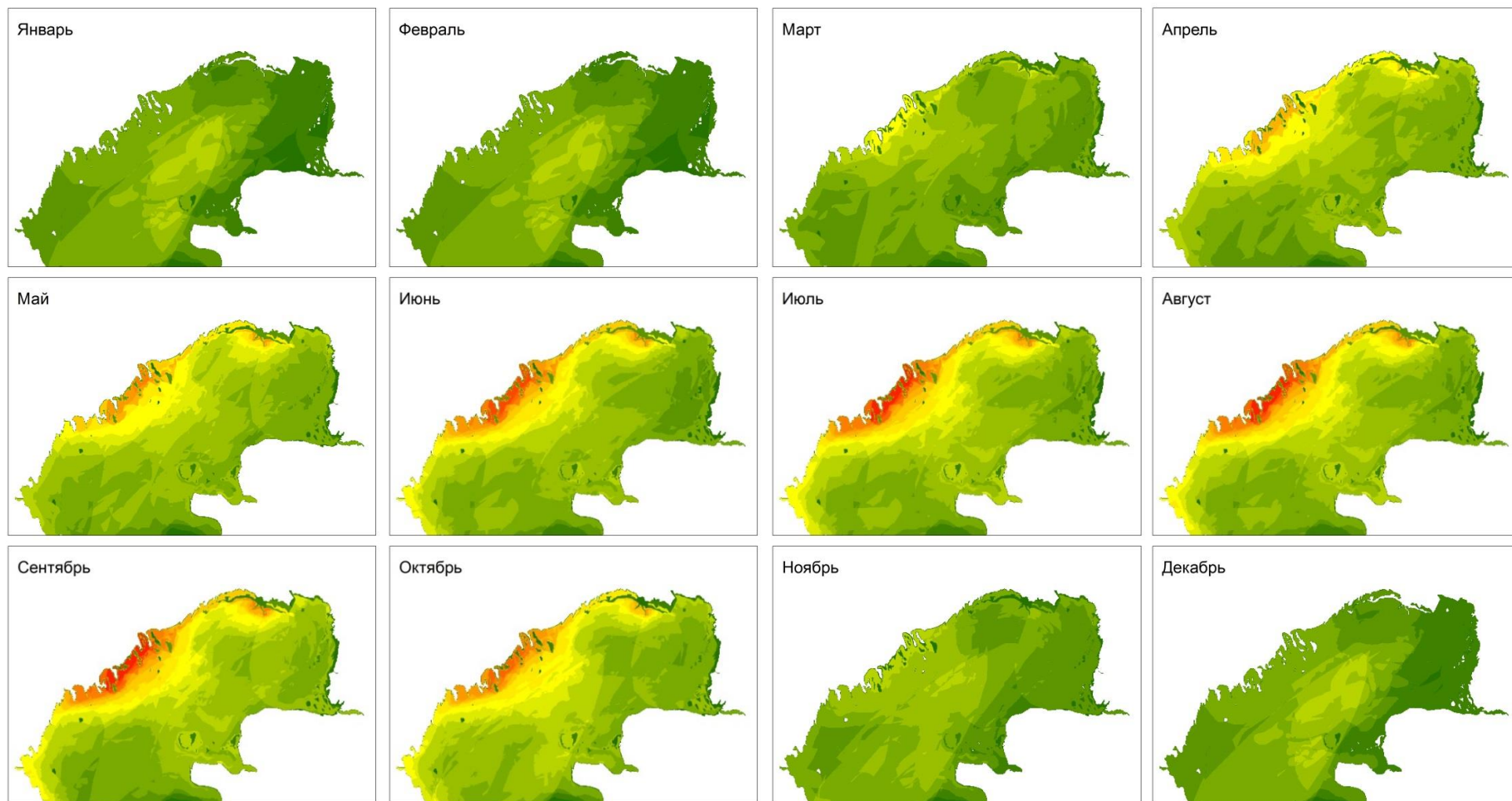


Рисунок 10 – Карты уязвимости биоты Северного Каспия для каждого месяца

3.3 Основные расчетные модули системы

3.3.1 Модуль расчета морских течений

Расчет расчета морских течений Каспия выполнен по модели MIKE-21, модуль HD (HydroDynamics), разработанной в Датском Гидрологическом Институте (DHI). Эта модель оказалась очень эффективной для мелководной части Каспийского моря, поскольку опирается на численное решение уравнений мелкой воды. Для правильности работы модели HD MIKE 21 к условиям Каспия была проведена адаптация и определены значения основных параметров. После проведения ряда испытаний получены следующие выводы:

- 1) Наилучшим шагом по времени является шаг, равный 180 с, при котором число Куранта не превышает 20 и время расчета является оптимальным;
- 2) Впадающие в Каспийское море реки минимальным образом влияют на уровень, величину и направление течений Северного Каспия, изменяя последние лишь вблизи устья рек, поэтому в системе речной сток учитываться не будет;
- 3) Процессы испарения компенсируют притоки воды за счет осадков и речного стока. Одновременное исключение из расчета этих процессов потери и притока воды не привело к существенному искажению результирующих полей морских течений и уровня моря Северного Каспия.
- 4) Модель MIKE 21 HD основана на уравнениях мелкой воды, поэтому в глубоководной части Каспийского моря наблюдается неправдоподобные результаты. В основном это выражается в значительном уменьшении скорости течения над глубоководными районами Каспия. Варьирование параметров модели, таких как турбулентная вязкость и параметр сопротивления, не компенсирует этот эффект.
- 5) Поскольку система ориентирована на моделирование процессов на мелководной акватории Северного Каспия, то следует принять параметры турбулентной вязкости, сопротивления и др. заданными по умолчанию. Это не приводит к искажению результатов моделирования на мелководном Северном Каспии.
- 6) Тестирование модели MIKE 21 HD дало возможность сформировать файл параметров расчета динамики уровенной поверхности и течений Каспийского моря.

Приведем пример сравнения результатов моделирования гидродинамики на MIKE 21 HD с космическими снимками, когда был сильный нагон на восточное побережье Северного Каспия. При проведении космического мониторинга с использованием данных со спутников Suomi NPP/VIIRS, Aqua/MODIS, Terra/MODIS и Sentinel-1A в период с 13 по 22 марта 2016 г. наблюдалось затопление восточного побережья Северного Каспия, вызванное ветровым нагоном. Данные дистанционного зондирования за период с 28.02.2016 по 12.04.2016 иллюстрируют Рисунки 11-16. На данных рисунках линией красного цвета показана береговая линия восточного побережья Северного Каспия, а контурами черного цвета – месторождения Тенгиз, Морское и Западная Прорва. Можно заметить, что в период с 28 февраля по 20 марта происходит нагон на восточное побережье, это хорошо заметно благодаря контурам месторождений,

расположенным восточнее береговой линии. Наибольшее затопление наблюдается на радиолокационном снимке за 20 марта. Во врезке, приведенной на рисунке ниже (рисунок 13), видно, что морской водой затоплена восточная часть месторождения Морское. 22 марта начинается сгон, который продолжается до 12 апреля 2016 г. (рисунки 14 – 16).

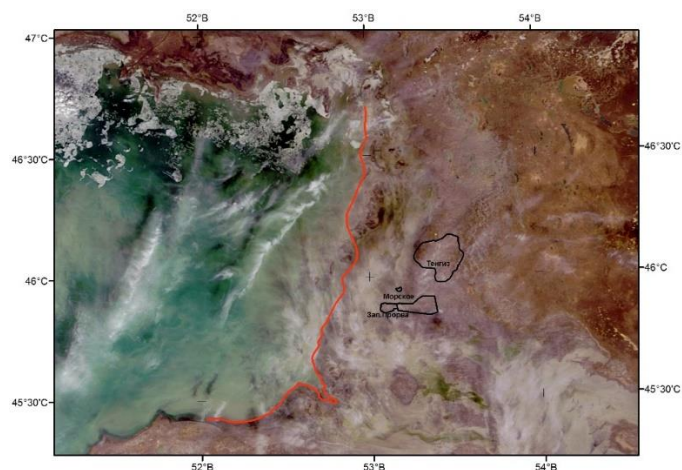


Рисунок 11 – Снимок Terra/MODIS за 28.02.2016

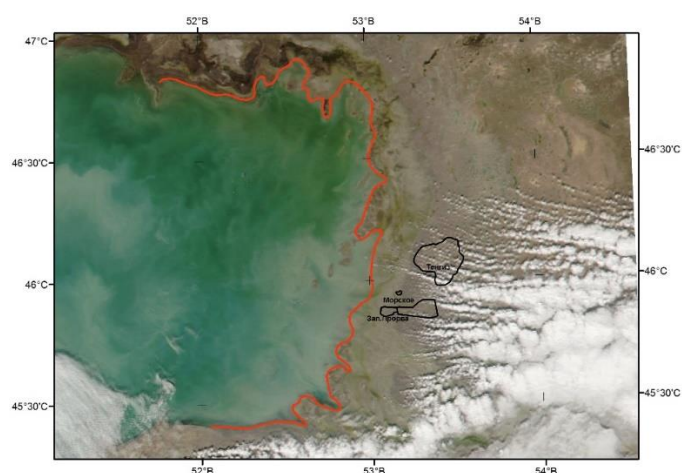


Рисунок 12– Снимок Suomi NPP/VIIRS за 13.03.2016

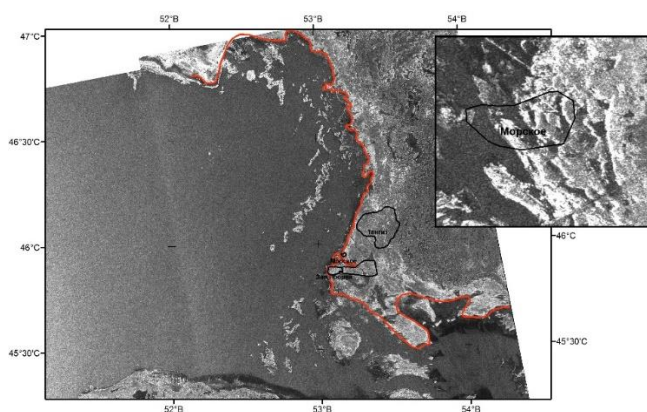


Рисунок 13 – Снимок Sentinel-1A за 20.03.2016

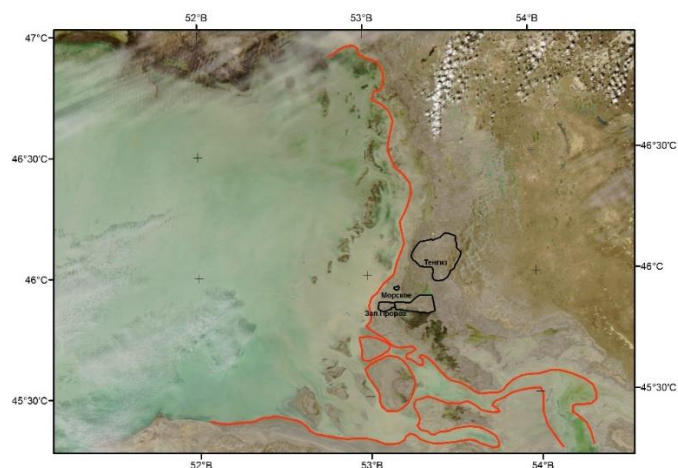


Рисунок 14 – Снимок Aqua/MODIS за 22.03.2016

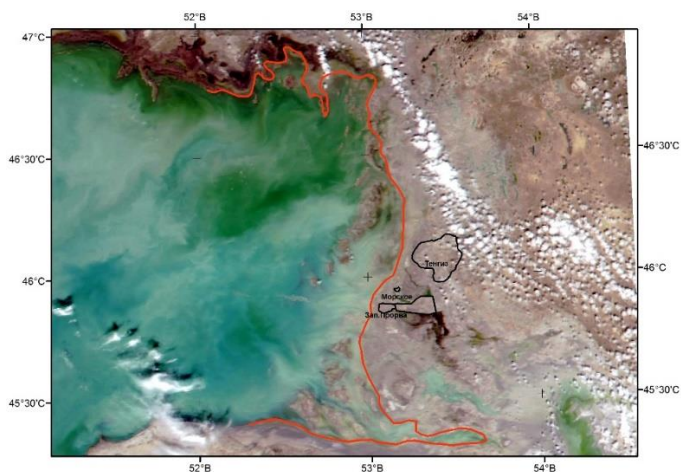


Рисунок 15 – Снимок Aqua/MODIS за 08.04.2016

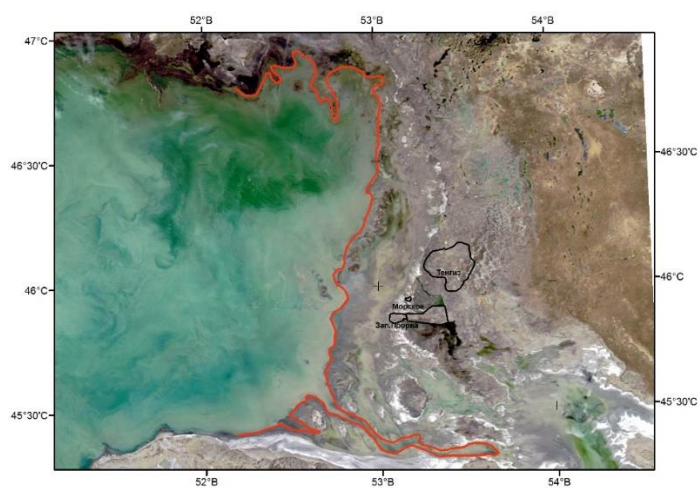


Рисунок 16 – Снимок Aqua/MODIS за 12.04.2016

Рисунок 17 иллюстрирует дешифрованную по данным ДЗЗ в период с 28.02.2016 по 12.04.2016 береговую линию восточного побережья, которые визуализированы на снимке MODIS за 22.03.2016.

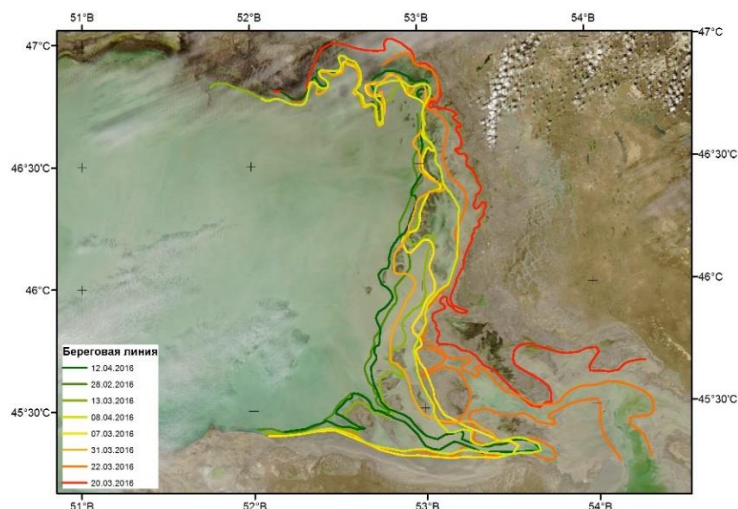


Рисунок 17 – Дешифрованная по космическим данным береговая линия восточного побережья Северного Каспия

С целью проверки правильности работы модели HD MIKE 21, адаптированной к условиям Северного Каспия, было осуществлено моделирование гидродинамики на период с 16 марта по 13 апреля 2016 г. Входные параметры расчета описывает таблица 3, приведенная ниже.

Таблица 3 – Входные параметры расчета

Параметр	Значение
Батиметрия	Данные 2004 г., уточненные по снимкам Sentinel-1A за март 2016 г., размер ячейки 1000 м на 1000 м
Период моделирования	с 16.03.2016 00:00 GMT по 13.04.2016 00:00 GM
Шаг по времени	180 с
Количество расчетных временных интервалов	13440
Источники и стоки	Не учитывались
Глубина при затоплении ячейки	0,2 м
Глубина при осушении ячейки	0,3 м
Начальный уровень	-0,9 м
Испарение	Не учитывалось
Осадки	Не учитывались
Eddy Viscosity	Smagorinsky formula, Flux based, 0,0
Resistance	Manning Number, const, 32,0
Ветер и атмосферное давление	.dfs2 – 3 четырехсрочные данные ECWMF

Рисунки 18 – 21 иллюстрируют результаты моделирования в сравнении с данными дистанционного зондирования. На данных рисунках приведены глубина воды и морские течения на различные моменты времени, совмещенные с:

- береговой линией, оцифрованной по данным ДЗЗ (красная линия),
- начальным уровнем моря (-28) (синяя линия),
- контурами месторождений (оранжевая линия).

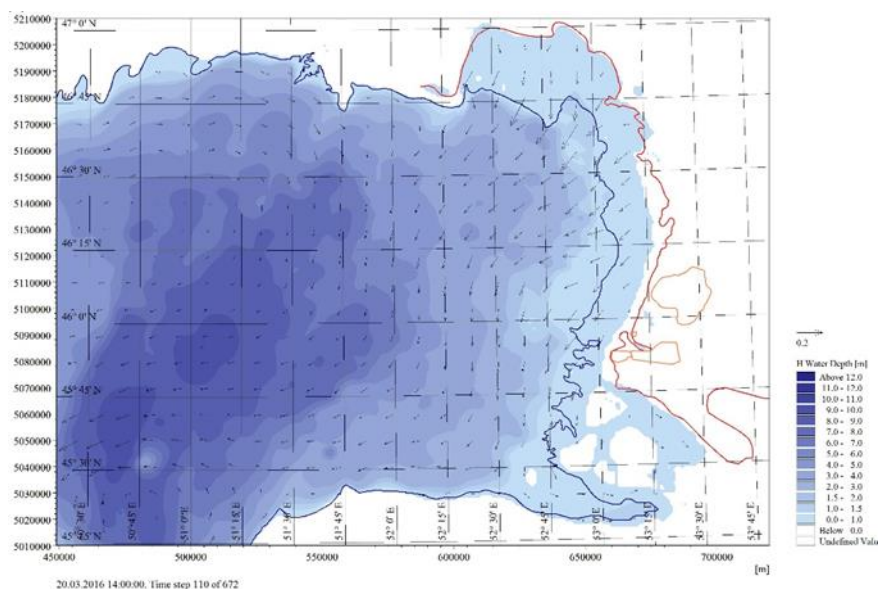


Рисунок 18 – Глубина воды и течения Северного Каспия на 20.03.2016 14:00 GMT совмещенные с береговой линией, оцифрованной по данным Sentinel 1A

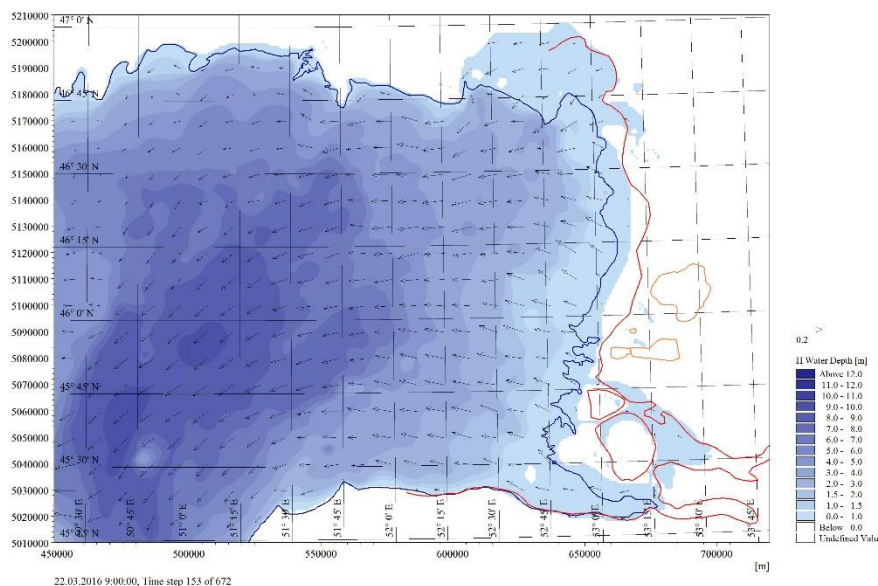


Рисунок 19 – Глубина воды и течения Северного Каспия на 22.03.2016 9:00 GMT совмещенные с береговой линией, оцифрованной по данным Aqua/MODIS

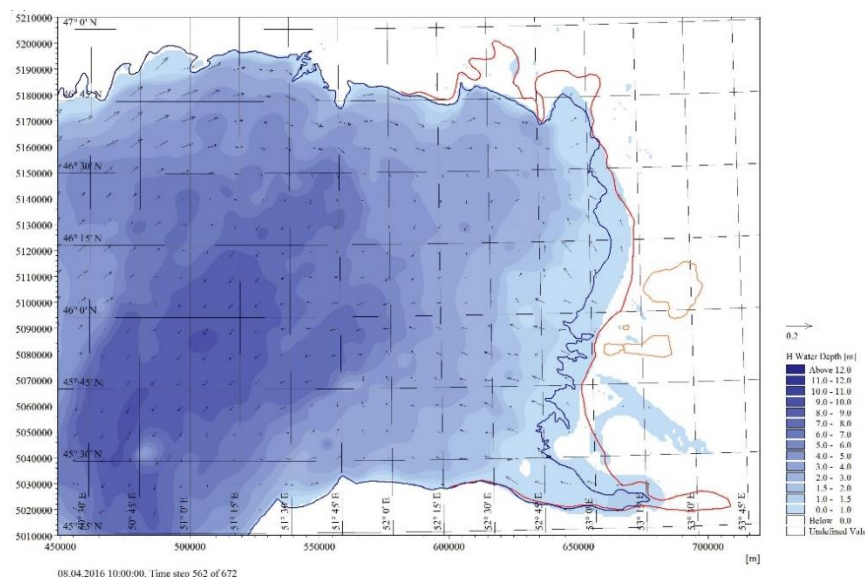


Рисунок 20 – Глубина воды и течения Северного Каспия на 8.04.2016 10:00 GMT совмещенные с береговой линией, оцифрованной по данным Aqua/MODIS

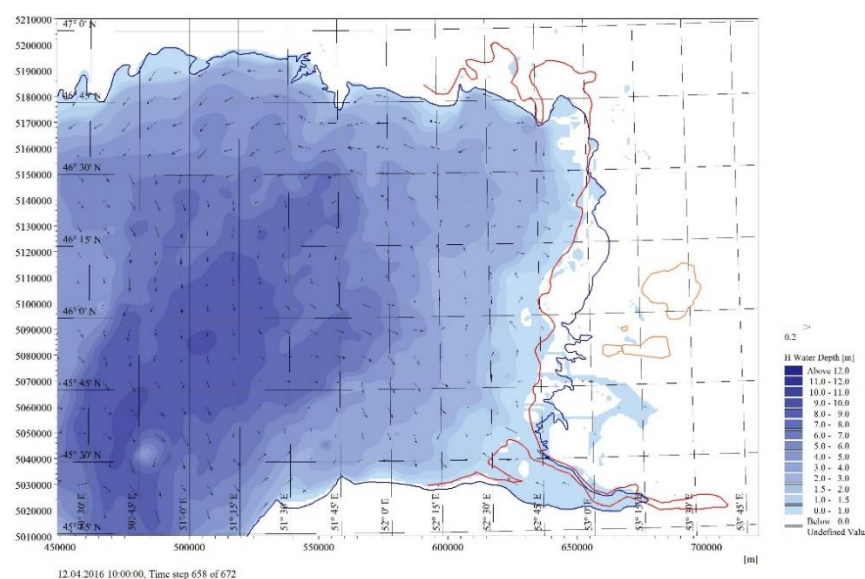


Рисунок 21 – Глубина воды и течения Северного Каспия на 12.04.2016 10:00 GMT совмещенные с береговой линией, оцифрованной по данным Aqua/MODIS

Как и следовало ожидать, результаты моделирования не повторяют детально данные дешифрирования космических снимков. Это связано, во-первых, с погрешностью дешифрирования сложного и часто меняющегося микрорельефа береговой зоны Северо-Восточного Каспия, во-вторых, с погрешностью реализованного в MIKE 21 HD алгоритма сгонно-нагонных процессов. Несмотря на это, данные дистанционного зондирования и математического моделирования хорошо коррелируют друг с другом. На наш взгляд, результаты тестирования показывают, что данная модель с хорошей

вероятностью прогнозирует ветровые нагоны и сгоны на казахстанском побережье Северного Каспия.

3.3.2 Модуль расчета распространения нефти

В последние 40 лет методология прогноза последствий нефтяного загрязнения морской среды развивается особенно интенсивно и постоянно совершенствуется. Существует большое количество программных средств, которые предназначены для моделирования поведения нефтяных пленок на водной поверхности. Опишем некоторые из них.

OILMAP – инструмент моделирования распространения нефтяных пленок в морской среде, который разработан и лицензирован RPS ASA (США) [79, 80, 81]. Рисунок 22 иллюстрирует интерфейс программы OILMAP с визуализированными результатами моделирования растекания нефти от скважины.

OILMAP имеет простой в использовании интерфейс, и процесс загрузки данных для расчета, а также визуализация результатов и составление отчетов не составляет труда. Результаты модели OILMAP могут быть конвертированы во внешние форматы данных, такие как .shp и .kml, и могут быть подвергнуты последующей обработке и визуализации в ГИС приложениях. Основным достоинством OILMAP является то, что она моделирует не только прогноз распространения нефтяных slickов, но имеет в своем составе стохастическую модель и модель чувствительности, которые позволяют оценивать риски и чувствительность объектов или участков к нефтяному загрязнению. К главному недостатку модели OILMAP относится то, что она учитывает не все процессы, происходящие с нефтью при попадании в морскую среду, в частности, она не учитывает растворение, фотоокисление, вертикальную дисперсию и биodeградацию нефти.

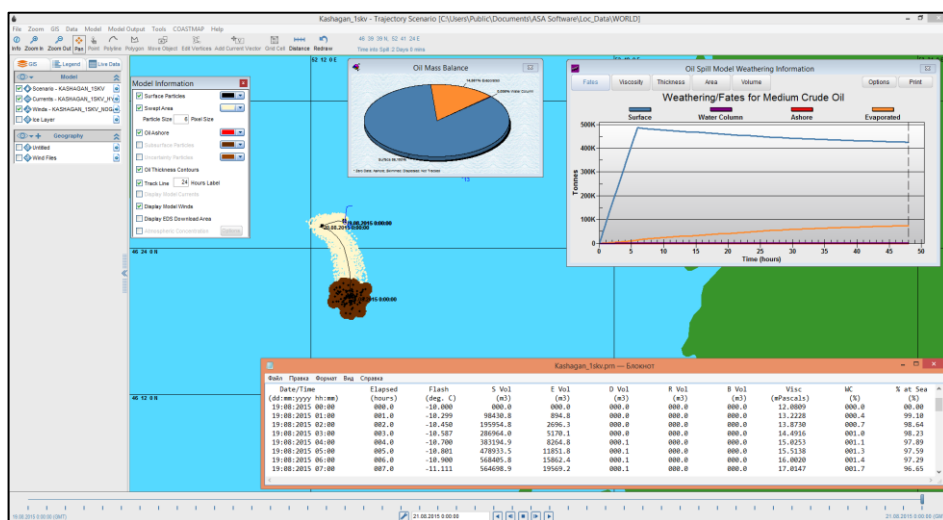


Рисунок 22 – Интерфейс OILMAP с результатами моделирования растекания нефти

SpillMod является программным комплексом, созданным коллективом сотрудников Государственного океанографического института (Россия, Москва) и предназначенным для моделирования растекания нефти при ее попадании в морскую среду [82]. SpillMod учитывает основные процессы, происходящие с нефтью под воздействием окружающей среды: растекание, перенос и деформацию под действием ветра и течений, испарение компонентов разлива, естественное диспергирование и изменение свойств разлива с течением времени.

Программный комплекс SpillMod содержит возможность расчета риска распространения разливов, включающего в себя: (1) оценку границы возможного распространения разлива для заданного набора гидрометеорологических ситуаций и ограничений по предельной толщине, (2) распределение максимальных толщин разливов на участках акваторий в пределах зоны влияния разлива, (3) установление границ распространения нефтяных разливов за заданные периоды времени, (4) вычисление вероятности поражения акваторий, побережий и других заданных объектов за заданные интервалы времени.

MOHID – это бесплатная трехмерная система моделирования водных объектов, разработанная центром MARETEC (Marine and Environmental Technology Research Center), который расположен в Техническом Университете Лиссабона [83, 84, 85]. Данная система реализована на языке программирования FORTRAN (ANSI FORTRAN 95) и предоставляется пользователю с открытыми кодами. Она содержит в себе следующие 3 инструмента: MOHID Water, MOHID Land, MOHID Soil, которые, соответственно, предназначены для моделирования потоков пространственных водных объектах; потоков в гидрографических бассейнах и водоносных горизонтах; потоков воды через пористую среду. Система MOHID содержит модуль OWM (Oil Weathering Model), предназначенный для моделирования растекания нефти с учетом физико-химических процессов таких, как испарение, эмульсификация, дисперсия, растворение и осаждение. Дополнительно модуль содержит некоторые методы реагирования на нефтяной разлив, например, механическую очистку, благодаря чему, в модуле могут быть сформированы различные сценарии нефтяного разлива.

Достоинствами модели MOHID OWM является то, что она использует при расчете 3-D гидродинамику, предварительно рассчитанную в MOHID Water. Результаты модели MOHID OWM могут быть конвертированы во внешние форматы данных, и могут быть подвергнуты последующей обработке и визуализации в ГИС приложениях. Модель MOHID в большей степени предназначена для моделирования гидродинамического режима на различных водных объектах. Модуль OWM, являющийся частью MOHID, проработан с меньшей доскональностью, поэтому не учитывает всех процессов, происходящих с нефтью при попадании в водную среду. Еще один важный недостаток модели – это то, что она не учитывает фракционный состав нефти, входными параметрами модели являются только плотность и вязкость нефти.

Бесплатное программное обеспечение GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment) разработано в США в Отделе по ликвидации чрезвычайных ситуаций (ERD) Департамента по ликвидации последствий и

восстановлению при Национальном управлении океанических и атмосферных исследований (NOAA) и применяется для прогнозирования возможной траектории передвижения нефтяного загрязнения в морской среде [86, 87, 88]. GNOME является траекторной моделью Эйлера-Лагранжа, которая рассчитывает перемещение нефтяной пленки с учетом метеорологических и гидродинамических условий.

С помощью программного обеспечения GNOME возможно:

1. Предсказывать, как ветер, морские течения и другие процессы влияют на растекание нефтяной пленки в водной среде;
2. Изучать, как нефтяные траектории зависят от неопределенностей в наблюдениях и/или прогнозах ветра и течений;
3. Увидеть, как у нефтяной пленки изменяются химические и физические свойства в течение времени.

Рисунок 23 иллюстрирует интерфейс модели GNOME с визуализированными результатами моделирования растекания нефти по акватории Лонг-Айленд. В левой части окна представлены входные параметры модели, и в разделе Spills->Spill Mass Balance – характеристики нефтяного загрязнения на текущий, визуализированный шаг.

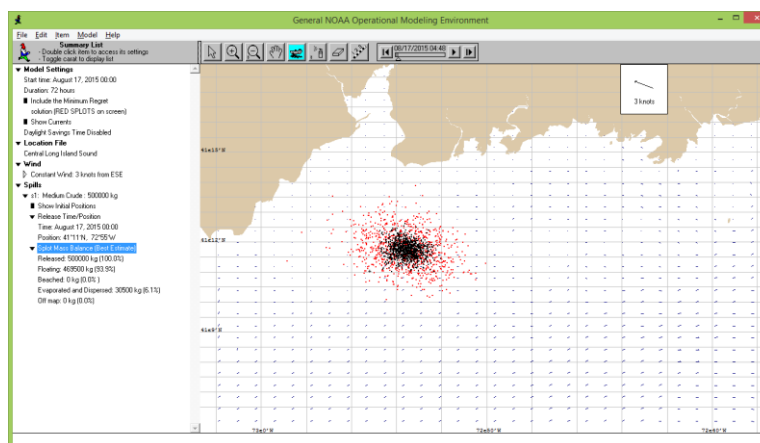


Рисунок 23 – Интерфейс GNOME с результатами моделирования растекания нефти

К главному недостатку GNOME относится то, что не существует Файла Местоположения, описывающего гидродинамические условия на Каспийском море, и, кроме того, возникают существенные трудности в построении собственной модели, так как предоставляемые ресурсы не содержат береговой линии Каспийского моря. Существенным недостатком является и загрузка гидрометеорологических данных в модель GNOME. Они загружаются с определённых ресурсов и не содержат информации для Каспийского моря.

MEDSLIK-II – модель нефтяного разлива для Средиземноморья и Черного моря, разработана в INGV (Национальный Институт Геофизики и Вулканологии) г. Болонье (Италия) [89, 90]. MEDSLIK-II разработана для прогнозирования перемещения и трансформации нефтяного пятна, с использованием лагранжевой

модели нефтяного разлива. Она моделирует перемещение поверхностного пятна под влиянием течений и ветра.

Модель MEDSLIK-II в качестве входных запрашивает данные о разливе нефти, поле ветра, температуре поверхности моря и данные по морским течениям в трех измерениях. Модель может использовать данные атмосферных потоков и океанографических полей (т.е. течения, температура) из разных источников. Выходными данными MEDSLIK-II является (1) положение и объем нефтяного пятна с почасовым шагом, (2) распределение диспергированной нефти, (3) процент нефти достигшей побережья, (4) вязкость эмульсии нефть-вода, (5) вязкость и плотность нефти, (6) доля воды, содержащейся в водонефтяной эмульсии, (7) доля испарившейся нефти и (8) процент нефти на поверхности воды. Рисунок 24 иллюстрирует визуализированные результаты моделирования растекания нефти по морской поверхности, полученные с помощью ПО MEDSLIK-II.

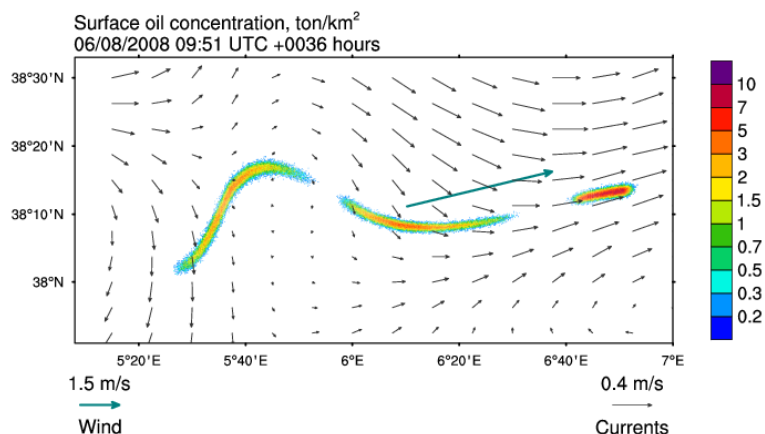


Рисунок 24 – Распространение нефти, рассчитанное с помощью ПО MEDSLIK-II

Недостатками MEDSLIK-II является то, что при ее использовании пользователю необходимо обладать достаточными знаниями и навыками в программировании. В настоящее время поддерживаемой архитектурой является только Linux. В качестве входных данных требуется поля ветра и трёхмерные поля морских течений, которых для акватории Каспийского моря в наличии не имеется. Кроме того, при моделировании существует возможность выбора только ограниченного числа типов нефти, наиболее распространенных в Средиземноморье и Черном море. Для Каспийского моря такой возможности нет.

В рамках данной работы использовался модуль Oil Spill (OS) ПО MIKE (версия 2014) для прямоугольной расчетной сетки, разработанный Датским Гидравлическим Институтом. Достоинствами модели DHI Oil Spill, реализованный в данном модуле являются:

1) Учет всех процессов, происходящих с нефтью при ее попадании в водную среду, в частности: растекание, испарение, эмульсификация,

вертикальная дисперсия, растворение, осаждение, биodeградация и фотоокисление;

2) Учет данных по окружающей среде, включающих в себя данные по морским течениям, ветру, испарению, осадкам, температуре поверхности моря, солнечной радиации;

3) Учет данных, характеризующих физико-химические свойства нефти;

4) Учет данных по местоположению разлива, его продолжительности и количеству вылившейся нефти;

5) Включение в расчет дисперсантов, скимеров и бонн;

6) Включение в расчет волновых данных;

7) Включение в расчет данных по ледовому покрову морской поверхности;

8) Модель не ориентирована на определенный участок моря или океана и может быть адаптирована к условиям любой акватории, в частности, она была адаптирована к условиям Северного Каспия и учтены все особенности батиметрии, метеорологии и нефти данного региона.

Модуль распространения нефтяного разлива предоставляет пользователю карты распространения нефтяной пленки по морской поверхности от заданных пользователем источников с учетом введенных им физико-химических свойств нефти. Расчеты осуществляются по модели описанная в разделе 2.3, где учитываются основные процессы переноса и физико-химические превращения нефти (эмульсификации, осаждения, испарения, дисперсии, растворения, биodeградации и т.д.). Результаты предоставляются в цифровом формате и могут быть использованы для дальнейшей обработки и анализа, а также визуализированы средствами ГИС.

Приведем пример сравнения результатов моделирования распространения нефти на MIKE 21 OS с данными космического мониторинга. При проведении мониторинга с использованием данных со спутника RADARSAT-1 25 июля 2012 г. в 02:43 GMT на Северном Каспии, недалеко от перспективной структуры Каламкас-море был обнаружен слик, образованный вероятнее всего в результате судового разлива. Он располагался параллельно трассе движения судов, на расстоянии 20-28 км. Координаты центра слика 50,752395 В.Д. 45,833638 С.Ш. Площадь слика на момент съемки составила 10,96 м², длина 57 км. Рисунок 25 иллюстрирует снимок RADARSAT-1 и дешифрованный слик. Вероятный источник загрязнения (судно) обозначено на данном рисунке окружностью желтого цвета, оно переместилось на юго-запад от слика на расстояние примерно 30 км.

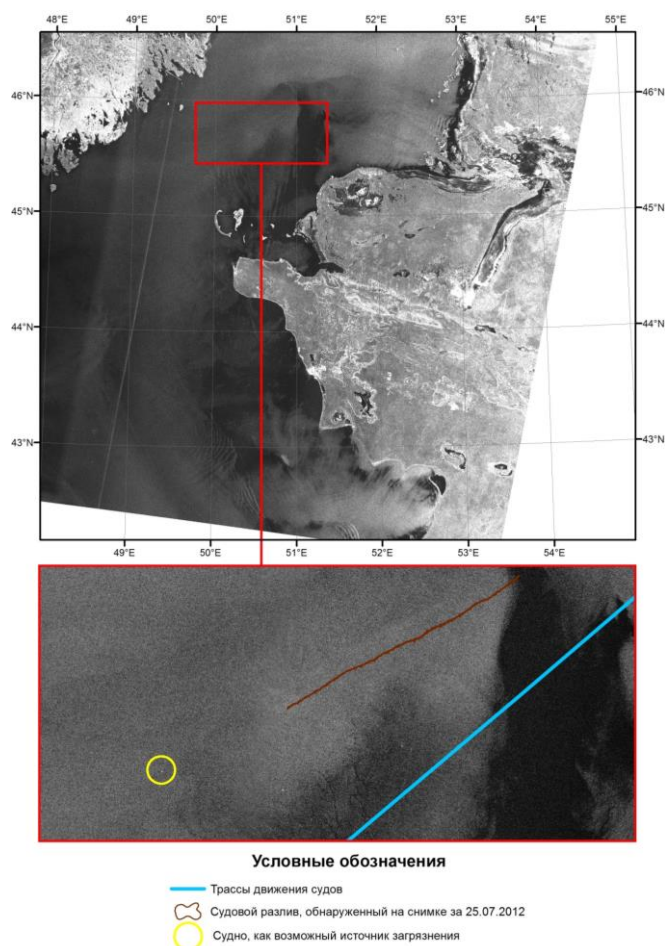


Рисунок 25 – Судовой разлив, обнаруженный на снимке RADARSAT-1 за 25 июля 2012 г.

С целью сравнения перемещения по акватории Каспийского моря данного слика было выполнено моделирование в модуле OS ПО MIKE 21 за период с 25 по 29 июля 2012 г. с шагом по времени равным 3 минуты. Основные параметры расчета демонстрирует таблица 4.

Таблица 4 – Основные входные данные расчета от 25.07.2012

Параметр	Значение
Период моделирования	24.07.2012 12:00 GMT – 29.07.2012 12:00 GMT
Шаг по времени	180 с
Количество расчетных временных интервалов	1200
Данные по гидродинамике	Рассчитывались в MIKE 21 HD и формировался файл .dfs2 с выходными параметрами Water Depth, P Flux, Q Flux
Газовая постоянная м ³ /мол К	8.206e-005
Динамическая вязкость воды при 20° С (сР)	1.002

Продолжение таблицы 4

Параметр	Значение
Температура воды (° C)	.dfs2 четырехсрочные данные ERA Interim
Плотность воды (г/м3)	1010
Солнечная радиация	.dfs0 – четырехсрочные данные ERA Interim, осредненные для акватории Северного Каспия
Координаты источника (UTM-39, WGS84)	Полигональный источник, аппроксимированный 46 точками
Вертикальная координата	About bed, 0
Мощность источника	0,0013237 м3/с
Время действия источника	25.07.2012 с 02:42 GMT по 02:45 GMT
Число частиц за единицу времени	10

Результаты моделирования были выведены на сетку размером 1000 м на 1000 м.

Рисунок 26 иллюстрирует карты распространения нефтяного загрязнения по акватории Каспия на период с 25 по 29 июля 2012 г. Из рисунка видно, что нефтяное загрязнение под действием ветра и морских течений переместиться в юго-западном направлении. На момент времени 29.07.2012 12:00 GMT, что соответствует окончанию расчета, нефтяная пленка переместиться от своего первоначального положения на расстоянии примерно 20 км в южном и 20 км в западном направлении.

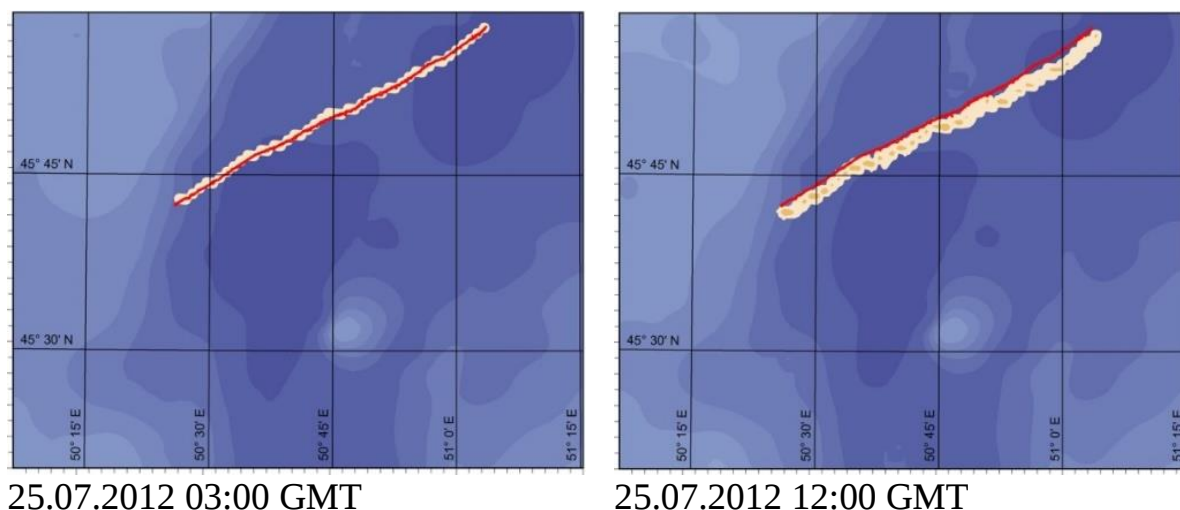


Рисунок 26 – Карты распространения нефтяного загрязнения за период с 25 по 29 июля 2012 г., лист 1

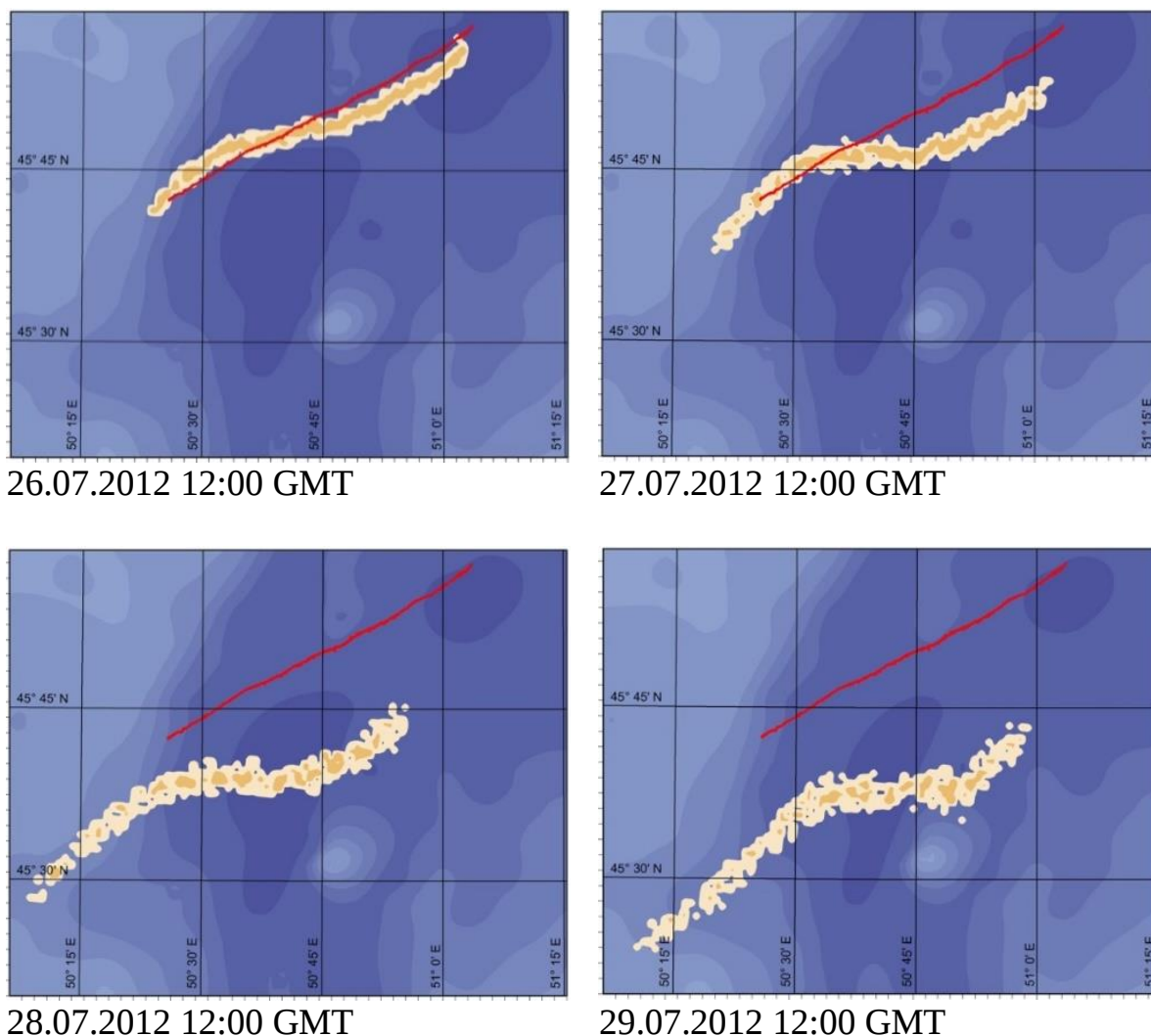


Рисунок 26, лист 2

3.3.3 Модуль расчета карты риска нефтяного загрязнения моря

Рисковое картирование нефтяного загрязнения моря основано на обработке множества данных моделирования аварийного разлива нефти в соответствии со стохастической моделью. Данные по разливу нефти хранятся в файлах формата dfs2. Информация в этих файлах представлена в виде двумерных матриц, содержащих толщину нефтяной пленки, которые распределены на временном ряде. Значения временного ряда от 0 до 120 часов с шагом 1 час. Обработка этих файлов выполняется в несколько этапов:

- В каждом узле расчетной сетки производится выборка всего множества значений концентрации нефти, рассчитанных для данного варианта разлива нефти.
- В каждом узле расчетной сетки строится зависимость повторяемости данного значения концентрации от самой концентрации, аппроксимируя распределение плотности вероятности.
- В каждом узле расчетной сетки выполняется суммирование повторяемости в интервале, где значение концентрации выше ПДК, т.е. рассчитывается математическое ожидание.

– Объединяются все расчетные значения меры риска в узлах сетки в единую карту риска нефтяного загрязнения моря выше ПДК.

На первых стадиях реализации программы расчета рисков модели использовался язык программирования Python. Для дальнейшей обработки данных по разливу, программа поочередно обрабатывает файлы, используя инструменты программного обеспечения MIKE 21, где данные из dfs2 формата конвертировались в shape файлы, известный формат ESRI ArcGIS. После конвертации, из одного файла разлива формата dfs2 получаются 120 shape файлов, отображающие динамику разлива через каждый час.

Для расчета риска необходимо очень много просчитанных файлов разлива, например, для расчета риска за выбранный месяц нужно 30 различных ситуации разлива с 1979 по 2015 годы, итого нужно обработать 36 лет x 30 дней x 120 ч = 129600 файлов. Обработка всех этих файлов занимает много времени и загружает файловую систему. Поэтому необходимо было найти способ, который предоставляет напрямую работать с файлами типа dfs2, вместо 120 shape файлов. В ходе исследования был найден инструмент “DHIMatlabToolbox”, для программного пакета Matlab, который предоставляет методы для обработки dfs2 файлов. С применением “DHIMatlabToolbox” рисковая модель была реализована в среде Matlab. Программа, реализованная на Matlab, значительно сократило время расчета. Но и этого было недостаточно. Поэтому, возник вопрос реализовать рисковую модель, используя технологии параллельного вычисления. Но программа, реализованная в среде Matlab могла работать с программным обеспечением MIKE 21 только с версией 2011 года, а для распараллеливания необходимо было использовать версию 2012 года. Из-за этих несовместимостей версий, для реализации программы расчета воздействия нефтяного загрязнения на биоту с параллельной обработкой данных был выбран язык программирования C#, так как выяснилось, что он имеет возможность работать с библиотекой DHI.Generic.MikeZero.DFS, который предоставляет доступ к методам обработки данных файла формата dfs2.

В итоге для риск-модуля нефтяного загрязнения моря была реализована программа на языке C#, названная *PrepareRiskApp* (листинг программы смотрите в приложении Б). На рисунке 27 приведена блок-схема реализованной программы расчета риска. Входными параметрами для модуля *PrepareRiskApp* являются: путь к файлам разлива (*Oil_Spill*), путь к файлу глубины воды (*Water_Depth*) и значение ПДК (MPC). Программа, используя данные из файлов разливов, вычисляет для каждой ячейки (x, y) три новых поля: (1) Prob – вероятность попадания нефти в данную ячейку за период времени, (2) TotalOilMPC – во сколько раз было превышено ПДК в данной ячейке для определенного момента времени, (3) VolatileOilMPC – во сколько раз было превышено ПДК легкой фракцией нефти в данной ячейке для определенного момента времени.

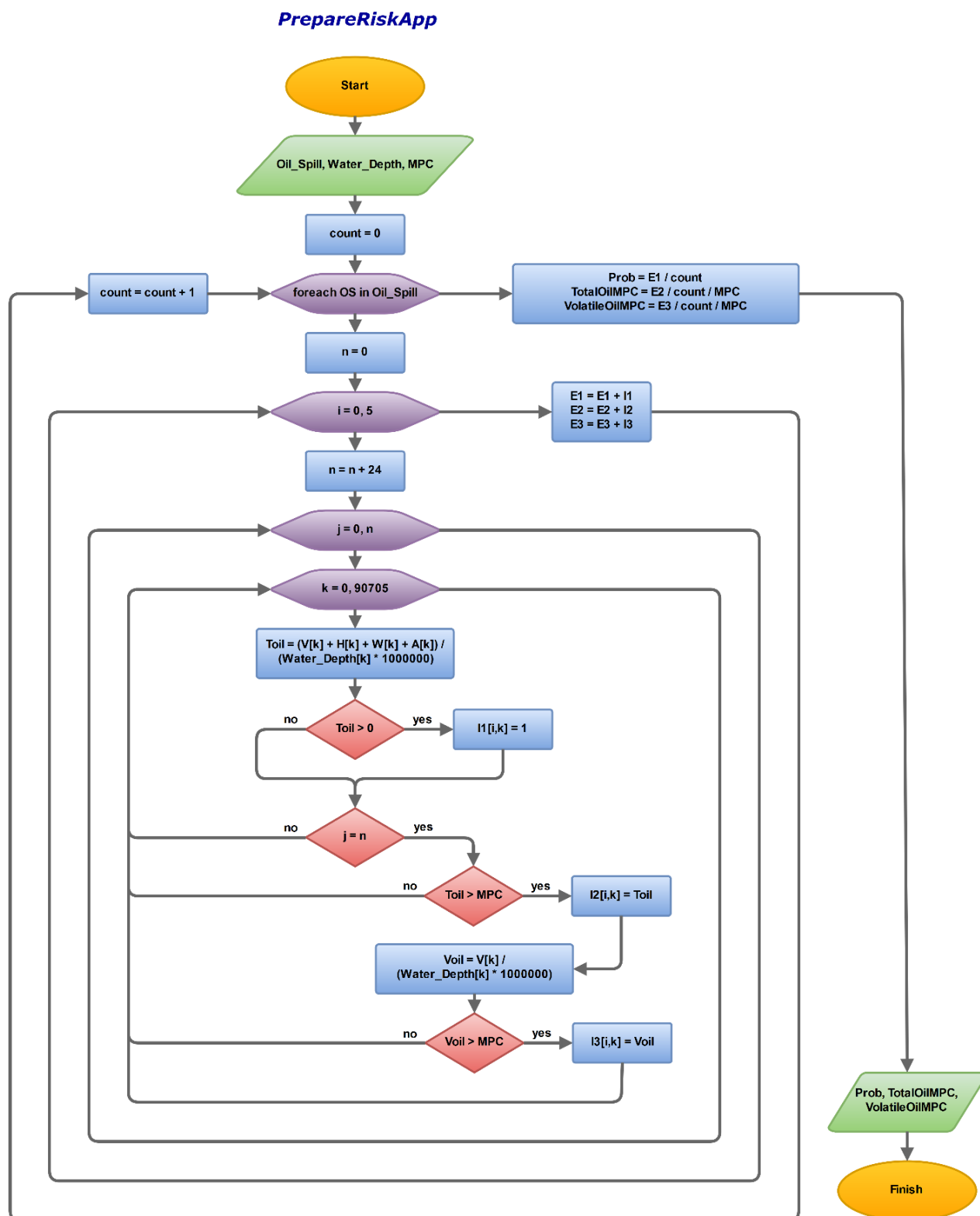


Рисунок 27 – Блок-схема алгоритма приложения PrepareRiskApp.exe для расчета риска нефтяного загрязнения моря

Для того чтобы открыть файл разлива в формате dfs2 используется метод *Dfs2FileOpen(string filename)* класса *DHI.Generic.MikeZero.DFS.DfsFileFactory*. После этого с помощью метода *ReadItemTimeStep(int itemNumber, int timestepIndex)* считываются данные поля за указанный шаг времени, а методом

Data.GetValue(int index) считываются значения массы нефти в каждой ячейке. Для расчета концентрации нефти в ячейке (в блок-схеме Toil) значения массы всех четырех фракции нефти суммируются и делится на объем воды в данной ячейке, который рассчитывается умножением значения глубины воды на площадь ячейки (10^6 м^2). Расчет концентрации легкой фракции нефти в ячейке (в блок-схеме Voil) рассчитывается также, но только для легкой фракции. После считывается количество попадания нефти в ячейку и превышения концентрации нефти ПДК в соответствующих ячейках. Затем полученные значения каждого поля делятся на количество имеющихся наборов разлива нефти, таким образом, получаем усредненные значения. Усредненные значения второго и третьего поля делятся на ПДК и показывают нам, во сколько раз было превышено ПДК в каждой ячейке. Полученные значения полей Prob, TotalOilMPC и VolatileOilMPC записываются в файл формата dfs2 с помощью метода *Data.SetValue(object value, int index)*. Так как файлов разлива для обработки по этому алгоритму очень много, для ускорения расчета был разработан веб-сервис HPCRiskModel, который распределяет сценарии разлива по узлам суперкомпьютера для параллельной обработки. Подробно веб-сервис описывается в следующей главе. После завершения всех расчетов на узлах суперкомпьютера программа **RiskApp** (листинг программы смотрите в приложении Б) объединяет результаты в один файл и сохраняет в файл формата dfs2, называемая Risk.dfs2 (рисунок 28).

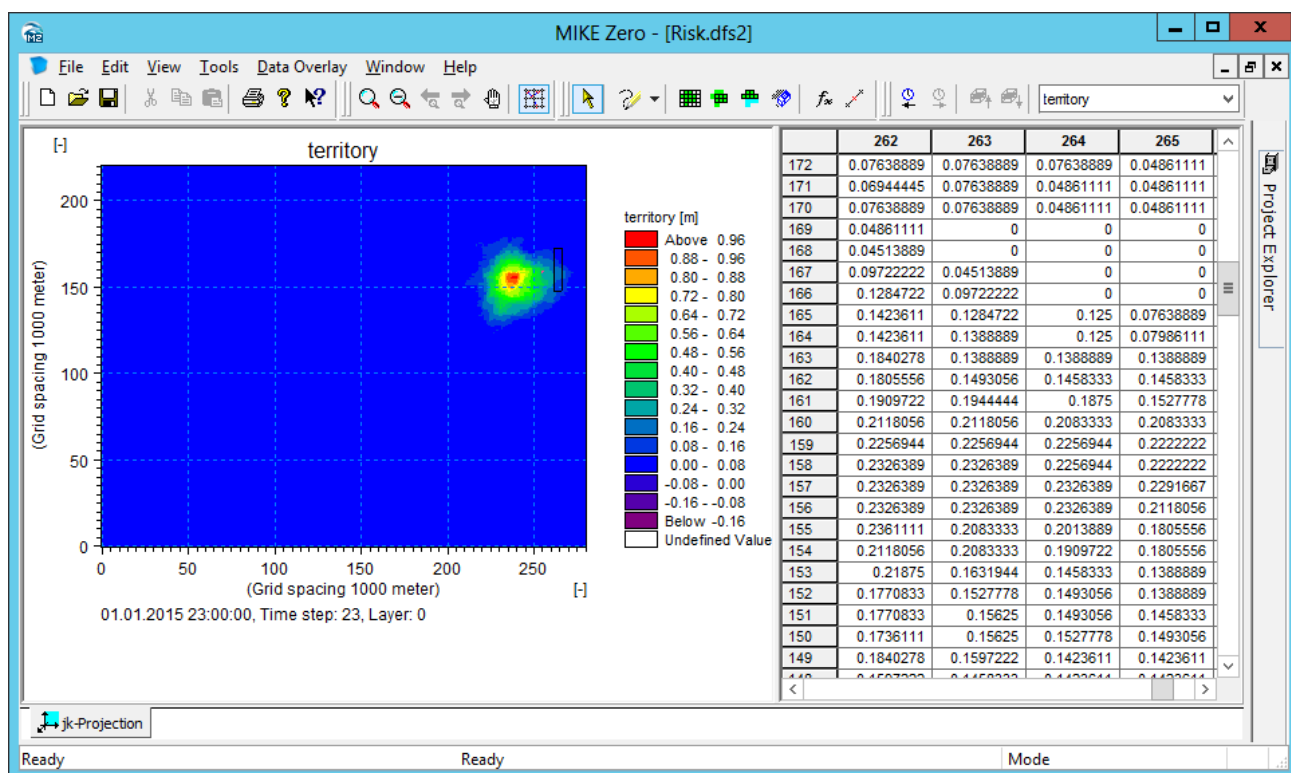


Рисунок 28 – Файл Risk.dfs2 с результатами расчета риска нефтяного загрязнения моря

3.3.4 Модуль расчета карты риска поражения биоты

Напомним, что (α, β, τ) – авария, α – момент аварии, β – мощность аварии, τ – длительность аварии. Под загрязнением окружающей среды в точке понимается концентрация загрязняющего вещества $\xi(t)$, где t – время. Под биотой в точке будем понимать множество видов растительного и животного мира (популяций) в ее окрестности. Биота во всей выбранной области состоит из $n > 0$ популяций $BM_1(t), BM_2(t), \dots, BM_n(t)$.

Для каждого элемента биоты имеется ареал его распространения (см. карту разнообразия элементов биоты для каждого месяца в разделе 3.2.2). Кроме того, будем считать, что каждому i -му элементу биоты соответствует некоторое положительное число π_i (см. карту уязвимости биоты для каждого месяца в разделе 3.2.2). Физический смысл этого числа в том, что при полном уничтожении i -го элемента биоты в точке его полное восстановление займет π_i календарных лет. Кроме того, будем предполагать, что при неполном уничтожении биоты время ее восстановления пропорционально процентному значению гибели биоты, т.е. если погибло $\delta\%$ биомассы, то время полного восстановления займет $\delta/100 * \pi_i$.

Будем считать, что для каждого элемента биоты имеется функция чувствительности, которая зависит от концентрации загрязняющего вещества, его физико-химических свойств и отражает относительное изменение биомассы при воздействии загрязнения. Формализуем данное понятие: пусть в момент времени t значение концентрации загрязняющего вещества в точке $\xi(t)$ и биомасса i -го элемента биоты в точке $BM_i(t)$. Тогда в момент времени $t+1$

$$\frac{BM_i(t) - BM_i(t+1)}{BM_i(t)} = f_i(\xi(t)),$$

где $f_i(\cdot)$ – функция чувствительности i -го элемента биоты.

Таким образом, нетрудно видеть, что для аварии (α, τ, Δ) получаем относительное уменьшение биомассы

$$\frac{BM_i(\alpha) - BM_i(\alpha + \tau + \Delta)}{BM_i(\alpha)} = 1 - \prod_{t=\alpha}^{\alpha+\tau+\Delta-1} (1 - f_i(\xi(t)))$$

при котором полное восстановление i -го вида биоты займет время

$$\left(1 - \prod_{t=\alpha}^{\alpha+\tau+\Delta-1} (1 - f_i(\xi(t))) \right) \times \pi_i.$$

Риском поражения биоты при загрязнении будем называть верхнюю оценку для времени полного восстановления биоты

$$\sum_{i=1}^b \pi_i \times \left(1 - \mathbf{E} \prod_{t=\alpha}^{\alpha+\tau+\Delta-1} (1 - f_i(\xi(t))) \right),$$

В качестве функции чувствительности мы используем линейную функцию:

$$f(\xi) = \begin{cases} 0, & \text{если } \xi \leq \text{ПДК}_i, \\ a_i \times \xi + b_i, & \text{если } \text{ПДК}_i < \xi < \frac{1-b_i}{a_i}, \\ 1, & \text{если } \xi \geq \frac{1-b_i}{a_i}, \end{cases}$$

где $a_i > 0$, b_i – параметры для i -го вида биоты, полученные на основе экспертных оценок, ξ – значение концентрации, ПДК_i – предельно допустимая концентрация загрязняющего вещества для i -го вида биоты.

Алгоритм расчета риска поражения биоты включает следующие этапы (на рисунке 29 представлена блок-схема этого алгоритма):

1. Вводится информация по биоте: карты уязвимости, параметры ПДК_i , $a_i > 0$, b_i .

Примечание: Параметры ПДК_i , $a_i > 0$, b_i берутся из файла (рисунок 29), составленная в ходе исследования биоты Северного Каспия. Параметры ПДК_i находятся в столбце “minПДК”. Параметры $a_i > 0$ и b_i рассчитываются по след. формуле:

$$a_i = \frac{y_i^{(2)} - y_i^{(1)}}{m_i^{(2)} - m_i^{(1)}}$$

$$b_i = \frac{y_i^{(2)} + y_i^{(1)} - a_i(m_i^{(2)} + m_i^{(1)})}{2}$$

где $y_i^{(1)}$ – это столбец “% погибших особей при minПДК”, $y_i^{(2)}$ – это столбец “% погибших особей при maxПДК”, $m_i^{(1)}$ – это столбец “minПДК” и $m_i^{(2)}$ – это столбец “maxПДК”.

2. Вводятся параметры аварии: месяц, длительность аварии в часах, мощность. Например, июнь, 24 часа, 100 тонн.

3. Запускается цикл для множества полей нефтяного загрязнения каждого дня месяца и года, используя многолетние данные реанализа метеоданных.

4. Запускается цикл для по времени от начального поля на следующие 120 часов прогноза нефтяного разлива.

5. Запускается цикл проходящая по всем ячейкам исследуемой территории.

6. Производится расчет концентрации нефти в точке k в момент времени t :

$$\xi_k^t = \frac{OilMass_k^t}{WaterDepth_k^t * 10^6}$$

7. Для каждого i -го вида биоты производится расчет процентного уменьшения этой биоты:

$$d_k^i = \prod_{t=0}^{120} (1 - f_i(\xi_k^t))$$

8. Рассчитывается сумма процентного уменьшения i -го вида биоты по всем метеоситуациям:

$$g_k^i = \sum_{OS=0}^R d_k^i$$

9. Производится расчет времени полного восстановления биоты:

$$Risk_k = \sum_{i=0}^B \pi_i (1 - \frac{g_k^i}{R})$$

10. Полученные значения для каждой точки объединяются в карту риска поражения биоты.

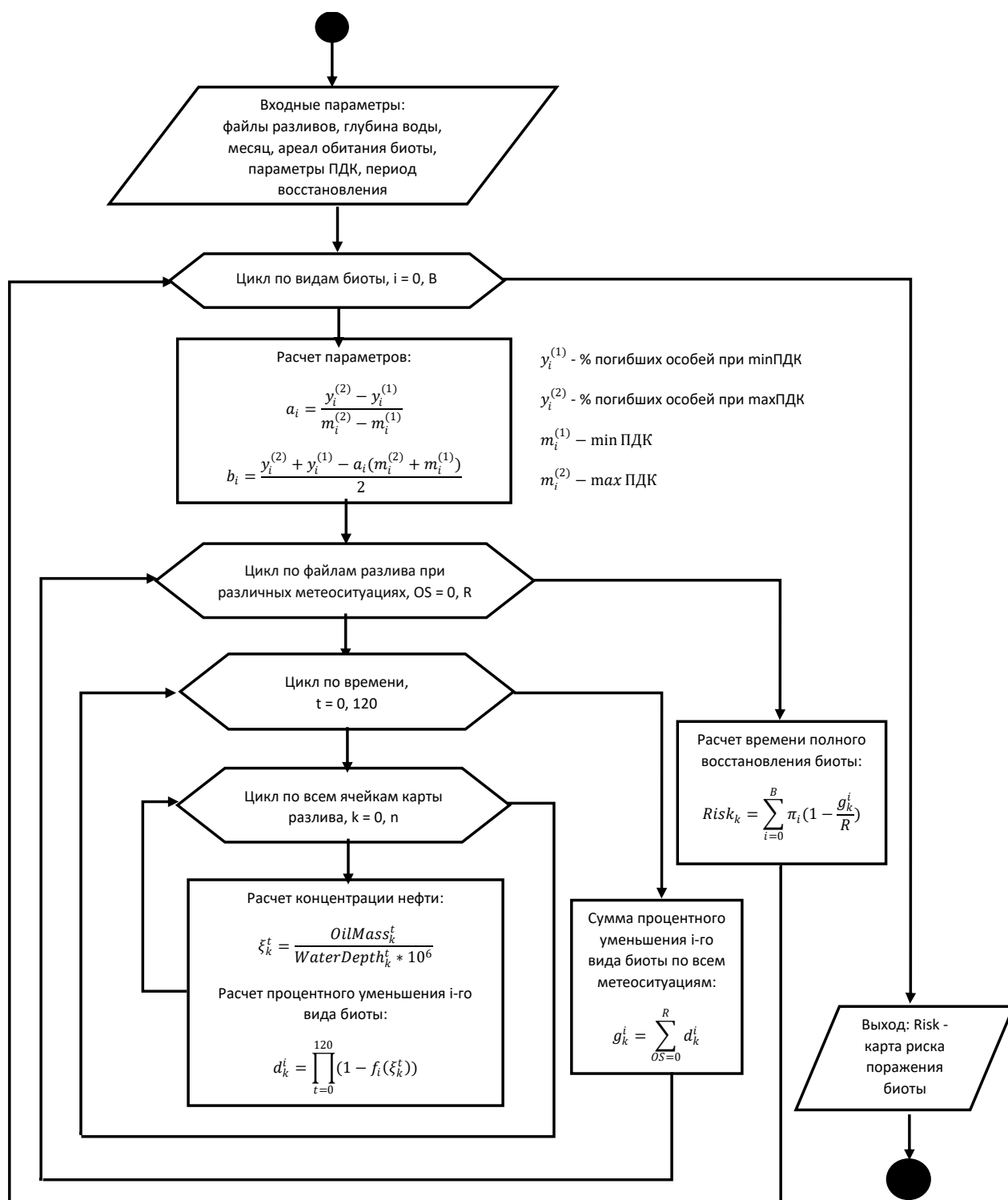


Рисунок 29 – Блок-схема алгоритма расчета риска поражения биоты

PrepareBiotaRiskApp

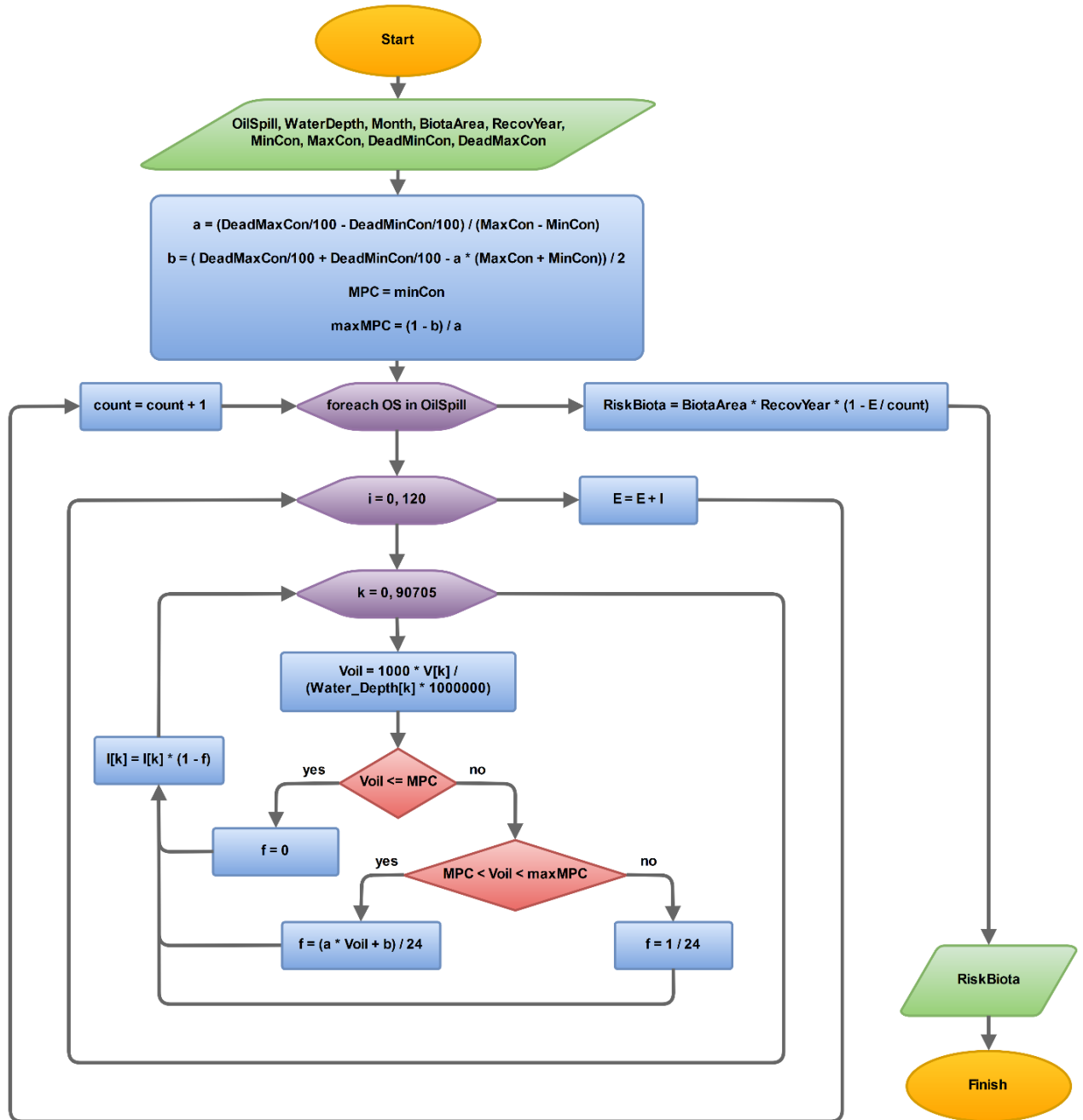


Рисунок 30 – Блок-схема алгоритма приложения PrepareBiotaRiskApp.exe для расчета риска поражения биоты

Для того чтобы открыть файл разлива в формате dfs2 используется метод Dfs2FileOpen(string filename) класса DHI.Generic.MikeZero.DFS.DfsFileFactory. После этого с помощью метода ReadItemTimeStep(int itemNumber, int timestepIndex) считываются данные поля за указанный шаг времени, а методом Data.GetValue(int index) считываются значения массы нефти в каждой ячейке. Для риска поражения биоты рассчитывается концентрация нефти только для легкой фракции нефти (в блок-схеме Voil), где значение массы легкой фракции нефти делится на объем воды в данной ячейке, который рассчитывается

умножением значения глубины воды на площадь ячейки (10^6 м^2). Затем рассчитывается относительное уменьшение биомассы в зависимости от функции чувствительности, используя параметры чувствительности биоты. Полученные значения усредняются и объединяются с картой обитания, умноженной на период восстановления, что дает время полного восстановления биоты (RiskBiota). Полученные значения RiskBiota записываются в файл формата dfs2 с помощью метода Data.SetValue(object value, int index). В результате получается карта поражения для отдельного вида биоты. Так как файлов разлива и биоты для обработки по этому алгоритму очень много, для ускорения расчета был разработан веб-сервис HPCRiskModel, который распределяет каждый вид биоты (175 видов) по узлам суперкомпьютера для параллельной обработки. Подробное описание веб-сервиса в следующей главе. После завершения всех расчетов на узлах суперкомпьютера программа RiskBiotaApp (листинг программы смотрите в приложении Б) объединяет результаты в один файл и сохраняет в файл формата dfs2, названная BiotaRisk.dfs2, представляющая риск поражения биоты (рисунок 31) [91].

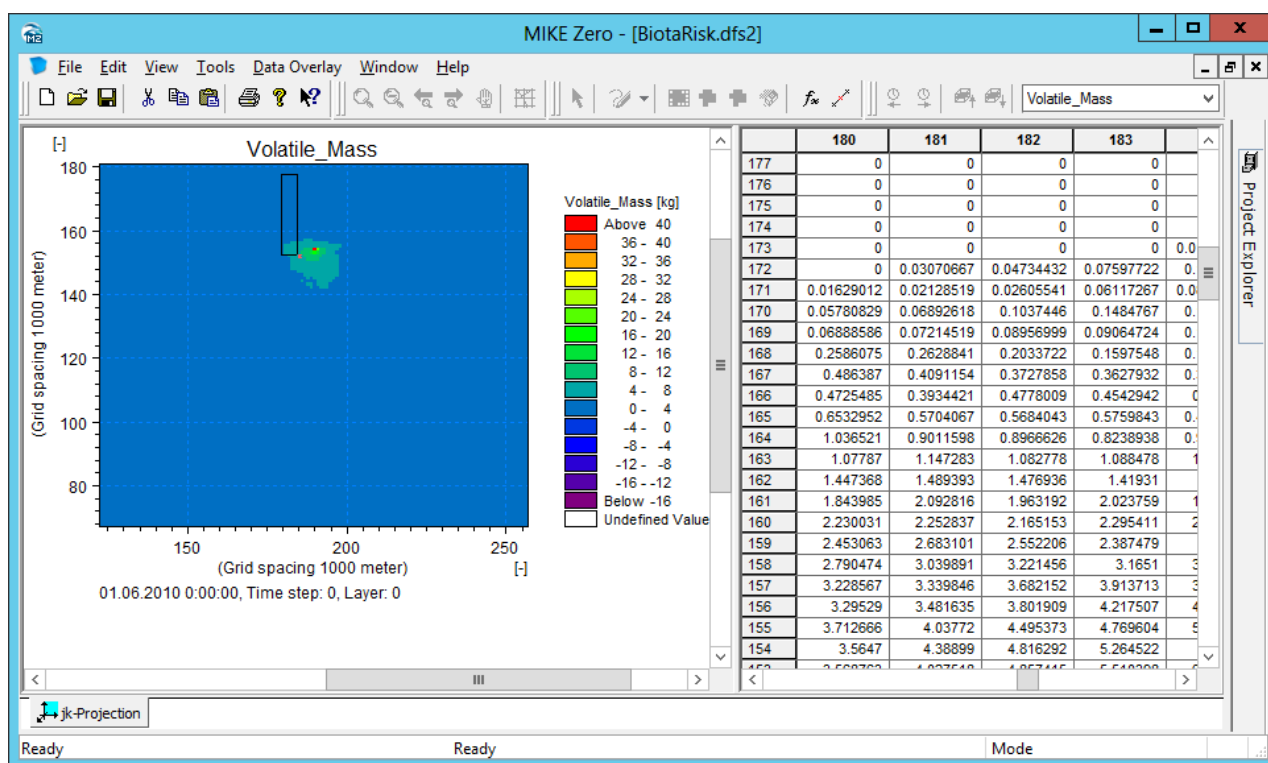


Рисунок 31 – Файл BiotaRisk.dfs2 с результатами расчета риска поражения биоты

Выводы по третьему разделу

В данной главе описан весь вычислительный процесс от формирования информационного обеспечения до расчета и оценки рисков. Наиболее значительные информационные потоки поступают в систему при формировании сервисов по метеорологии и чувствительности биоты.

Атмосфера как наиболее изменчивая среда и как основной фактор, формирующий гидродинамику мелководного Северного Каспия, была выбрана в качестве генератора случайных процессов. Источником метеорологических данных была выбрана база данных ERA Interim.

Чтобы построить карты зон уязвимости различных биологических сообществ был собран и приведен к единой картографической основе огромный и уникальный объем информации о биоразнообразии и зонах обитания многих видов биоты Северного Каспия.

Для расчета гидродинамических ситуаций была выполнена адаптация гидродинамической модели Датского гидрологического института MIKE 21 HD к условиям Северного Каспия.

В качестве расчетного модуля разливов нефти была использована модель MIKE 21 OS (Oil Spill), в которой учитываются физико-химические свойства нефти и такие важные процессы, как перенос, испарение, эмульсификация, осаждение нефти и ее растекание по поверхности моря.

В результате проделанной работы были определены все параметры в моделях расчетов гидродинамики и разлива нефти. Из базы данных ERA Interim были закачаны 8 метеопараметров на каждый день с 1979 по 2014 годы и с помощью специально разработанной программы преобразованы в необходимый для расчетов формат (всего 52 596 файлов). На MIKE 21 HD, которая была автоматизирована для многократных запусков, была сформирована гидродинамика Северного Каспия (13 149 файлов), на все дни с 1979 по 2014 годы, необходимые для последующих расчетов.

Итоговым этапом вычислительных процессов была разработка алгоритмов рискового картирования нефтяного загрязнения моря и негативного воздействия нефтяного загрязнения на биологические сообщества. В результате были разработаны расчетные модули реализующие данные алгоритмы.

4 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ RANDOM

4.1 Архитектура и внутренняя структура системы

Для автоматизации процессов расчета разливов и последующей оценке экологических рисков была спроектирована и реализована 4-х уровневая сервис-ориентированная система автоматизированного расчета рисков картоирования. Выбор сервис-ориентированной архитектуры (SOA) связан с тем, что данная технология в построении корпоративных автоматизированных и информационных систем специально предназначена для интеграции разно-платформенных приложений, обеспечивающих бизнес-процессы, что и требовалось, в связи с включением в систему множества независимого программного обеспечения. Выбор данного подхода основывается на необходимости интеграции разно-платформенных приложений, а также необходимостью их многократного использования.

В данном разделе детализирована структура системы RANDOM в виде 4-х уровневой сервис-ориентированной архитектуры (SOA) на основе стандарта веб-служб W3C. Сервис-ориентированная архитектура представляет собой модульный подход к разработке программного обеспечения, основанный на использовании распределенных, заменяемых компонентов, оснащенных стандартными интерфейсами для взаимодействия по стандартизированным протоколам. Выбор данного подхода основывается на необходимости интеграции разно-платформенных приложений, а также необходимостью их многократного использования. Модульный подход к разработке программного обеспечения предусматривает разложение программных процессов на отдельные услуги, где каждая услуга обладает функциональными возможностями. Тем самым достигается гибкость системы [92].

Рисунок 32 представляет сервис-ориентированную архитектуру системы. На данном рисунке представлены 4 уровня системы: клиентский, интерфейсный, уровень приложений и уровень хранения данных.

Клиентский уровень обеспечивает доступ к системе. Обращение к системе может быть произведено как с персонального компьютера, так и с мобильного устройства.

Презентационный уровень состоит из веб-сервера, на котором развернута платформа Microsoft SharePoint Server 2013 для Демо версии портала и рабочий портал RANDOM на Microsoft ASP.NET, опубликованный на веб-сервере IIS. Выбор платформы Microsoft ASP.NET обусловлен тем, что она предоставляет инструменты для автоматизации бизнес процессов, а также поддерживает принцип сервис-ориентированной архитектуры.

Уровень приложений составляет набор веб-сервисов, которые представляют собой управляющие службы над программным обеспечением, установленным на вычислительном кластере и выполняющих расчеты разливов и анализ риска. Этот уровень представляет собой функциональное ядро системы. На данном уровне будет задействован вычислительный кластер, который обеспечит быструю параллельную обработку данных. На вычислительном кластере устанавливаются следующие программные продукты: Mike 21 SA, Mike

21 HD, Risk Biota, Meteo. Данный уровень является закрытым для пользователя, а взаимодействие с системой и управление программными пакетами осуществляется через веб-сервисы Preprocessing, ProxyService, HPCRiskModel, MapConverter и модуль Task Controller.

Уровень хранения данных составляют базы данных для хранения информации.

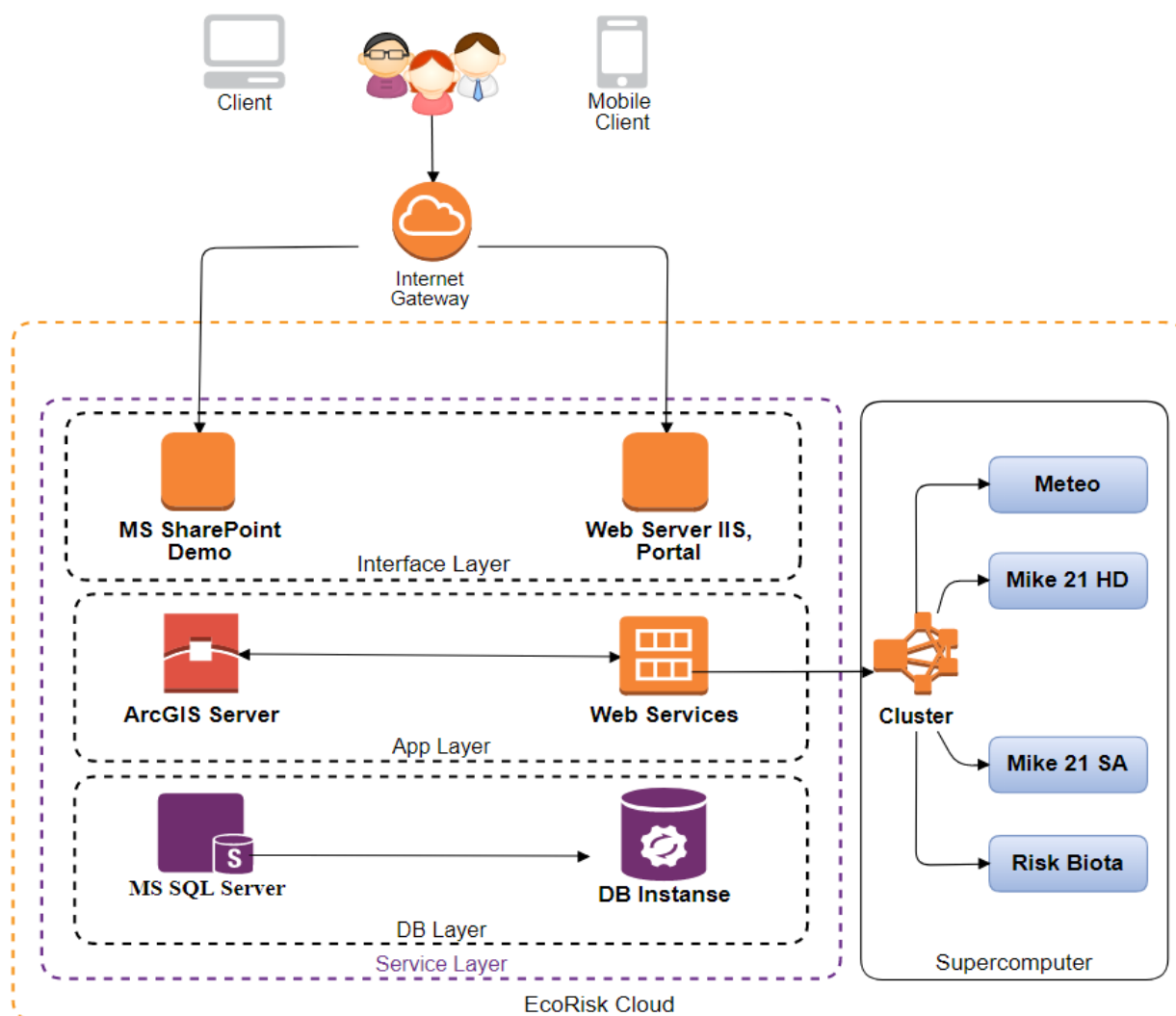


Рисунок 32 – Общая схема архитектуры системы RANDOM

Пользователь, в том числе потенциальный заказчик, обращается к системе через веб-браузер. Перед использованием сервисов пользователю необходимо будет пройти процесс аутентификации на веб-сервере. После аутентификации на веб-сервере пользователь попадает на веб-портал построенный на базе Microsoft ASP.NET. Клиенту предоставляется доступ к составлению заявок на расчет. В системе должна быть предусмотрена возможность следить за ходом расчета, и указываться примерное время завершения расчета. На портале реализован встроенный ГИС модуль для просмотра полученных результатов. Также клиентам предоставляется подробный аналитический отчет в виде электронного

документа, который можно будет скачать или распечатать. В системе ведется журнал ранее посчитанных задач [93].

UML-проектирование предполагает построение серии диаграмм, таких как диаграммы прецедентов, классов, последовательности, активности, компонентов и т.д. В данной работе мы представим некоторые из них.

На рисунке 33 представлена диаграмма последовательности, где для набора объектов системы показан жизненный цикл каждого объекта на единой временной оси. Объекты в диаграмме последовательности обозначены прямоугольниками с названиями объектов, вертикальные пунктирные линии – это «линия жизни», отображающие течение времени, деятельности или функции объектов отражаются прямоугольниками на пунктирной «линии жизни», и стрелки, показывают обмен сигналами или сообщениями между объектами.

В начале пользователь в браузере заполняет заявку на расчет. Данные с браузера попадают в планировщик задач, который в течении всей линии жизни управляет и контролирует запуски расчетных модулей. Первым получает сигнал объект Pre-processing, где подготавливаются конфигурационные файлы для расчетов в MIKE 21 HD и MIKE 21 OS, и файлы сохраняются в базе данных. Затем запускается MIKE 21 HD для расчета гидродинамики. По окончании ссылка к рассчитанным файлам передается в MIKE 21 OS, который считает прогноз распространения нефти на поверхности моря. После неоднократного расчета разливов нефти запускается RiskApp, приложение, которое рассчитывает риски, исходя из данных разливов нефти и карт распространения биоты. Последний сигнал планировщика передается объекту ConvertApp, предназначенный для преобразования полученных рисков карт из цифровых данных в презентабельные географический привязанные к местности слои карт, которые будут отображены в браузере пользователя. Преобразованные карты сохраняются в базе данных и публикуются в виде сервисов. После завершения расчетов система показывает завершенность всех расчетов и выдает ссылку на просмотр карты. По переходу по этой ссылке в браузере открывается карта риска поражения биоты, отображаемая инструментариями ГИС.

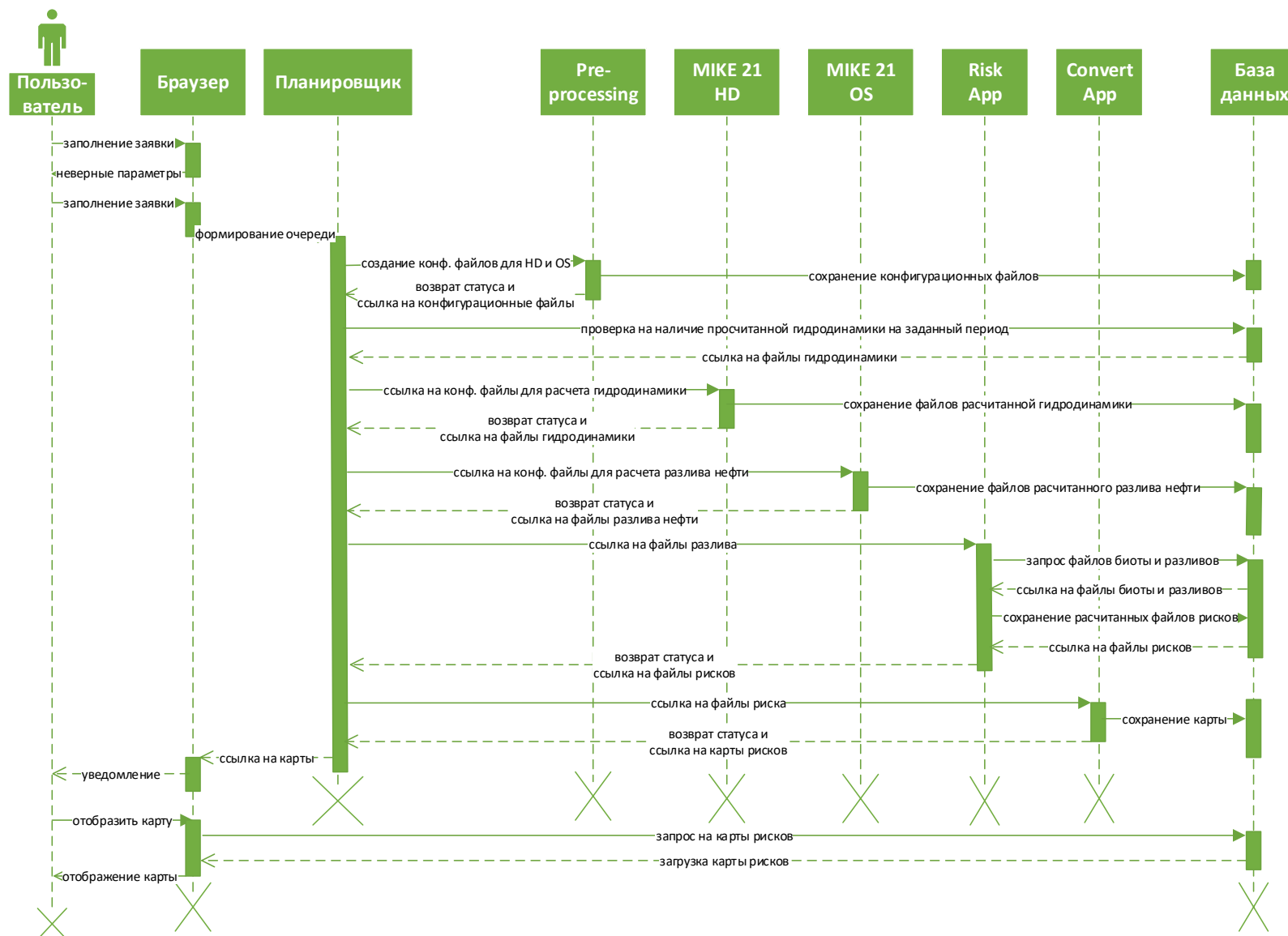


Рисунок 33 – Диаграмма последовательности

Следующей диаграммой представляемой рисунком 34 является диаграмма деятельности. В этой диаграмме отображены действия, которые происходят в процессе расчета, в зависимости от условий. Одно состояние, будучи начальным, в результате какого-либо события может переходить в другое состояние [94].

Ниже представлены состояния этих процессов:

1) Workflow Initial State – Начальное состояние рабочего процесса, переход происходит с момента добавления заявки в список заявок.

2) ApprovalState – Состояние утверждение заявки. На данном этапе происходит оценка временных, вычислительных ресурсов, а также проверка наличия файлов батиметрии, биоты, гидродинамики, ветра. После чего формируется задача, если присутствуют все требуемые данные для расчета, иначе система отклоняет заявку, и пользователь получает сообщение, что его заявка была отклонена, статус заявки задается как «Отменен», рабочий процесс переходит в финальное состояние (Finalize State).

3) PrepareState – Состояние проверки типа расчета. На этом этапе происходит проверка значения типа расчета «Стандартный» или «Нестандартный». Если значение тип расчета указано как «Стандартный» происходит переход с состояние подготовки файлов для расчета разлива (Prepare SA State), если «Нестандартный» происходит переход в состояние подготовки файлов для расчета гидродинамики (Prepare HD State).

4) PrepareSAState – Состояние подготовки файлов для расчета разлива. На этом этапе используется веб-сервис (Preprocessing Service), производится генерация файлов источника («source[id].dfs0»). Веб-сервису передаются данные состава нефти и координаты источника. После чего происходит генерация файлов для расчета разлива («source[id]_sa[ddmmyyyy].npa»).

5) PrepareHDState – Состояние подготовки файлов для расчета гидродинамики. На этом этапе используется веб-сервис (Preprocessing Service), производит генерации файлов для расчета гидродинамики («level1km[ddmmyyyy].dfs2»).

6) CalculateWindState – Состояние расчета ветра.

7) CalculateWindAreaState – Состояние расчета ветра для расчета Разлива.

8) CalculateHDState – Состояние расчета гидродинамики. На этом этапе используется веб-сервис (Proxy HD Service) запускается расчет гидродинамики на вычислительном кластере.

9) CalculateSAState - Состояние расчета разлива. На этом этапе используется веб-сервис (Proxy SA Service) запускается расчет разлива на вычислительном кластере.

10) PreRiskState – Состояние подготовки файлов для расчета риска. На этом этапе используется веб-сервис (Proxy Risk Service).

11) RiskState – Состояние расчета риска. На этом этапе используется веб-сервис (Proxy Risk Service).

12) ConvertState – Состояние конвертации файлов в векторный слой. На этом этапе используется веб-сервис (Map Convert Service) интерполяция точек в растр, классификация по цветам.

13) PublishState – Состояние публикации (отображения карты на портале).

14) FinalizeState – Состояние завершения рабочего процесса.

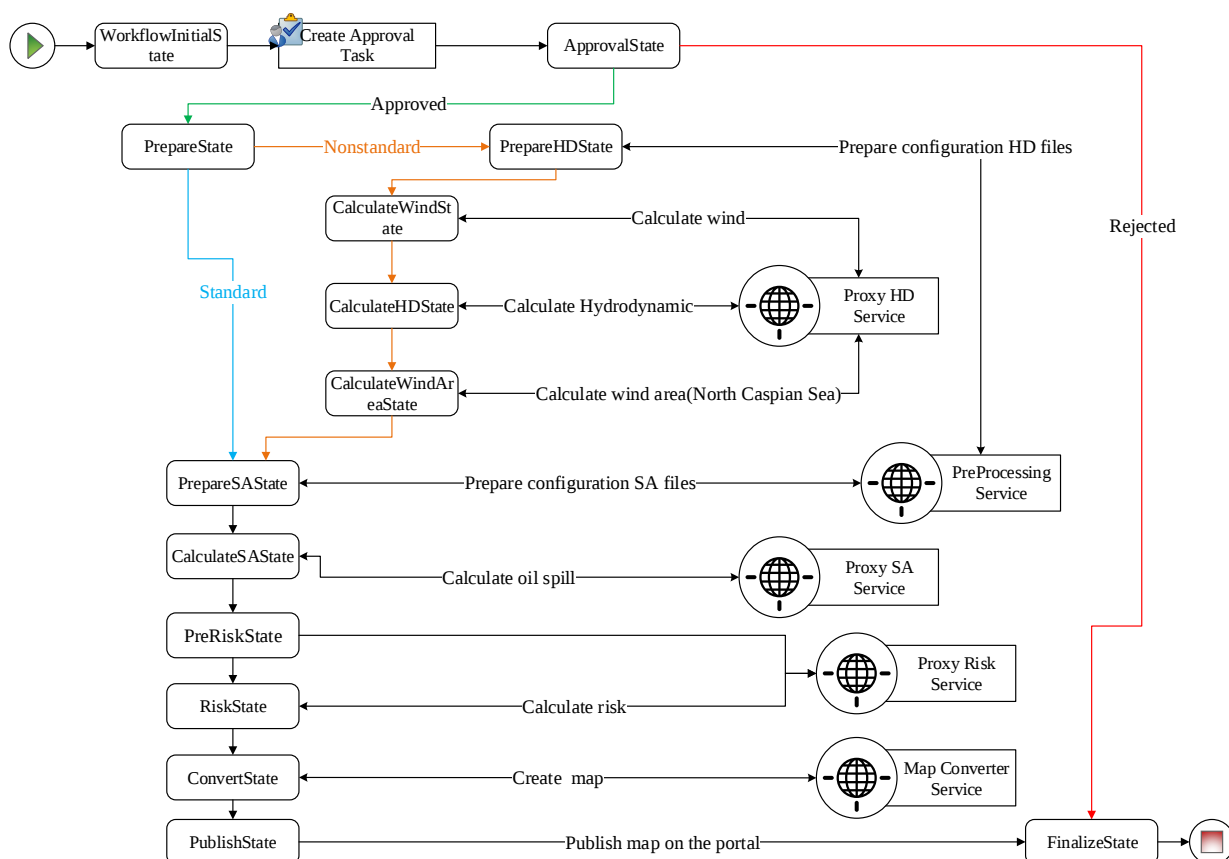


Рисунок 34 – Диаграмма деятельности

Среди UML диаграмм важное место занимает диаграмма компонентов (рисунок 35). Эта диаграмма разрабатывается для следующих целей:

- визуализация общей структуры исходного кода программной системы;
- спецификация исполнимого варианта программной системы;
- обеспечение многократного использования отдельных фрагментов программного кода;
- представление концептуальной и физической схем баз данных.

В качестве физических компонентов могут выступать файлы, библиотеки, модули, исполняемые файлы, пакеты и т.п. Компоненты связываются через зависимости, когда соединяется требуемый интерфейс одного компонента с имеющимся интерфейсом другого компонента. Тем самым иллюстрируются отношения клиент-источник между всеми парами компонентов.

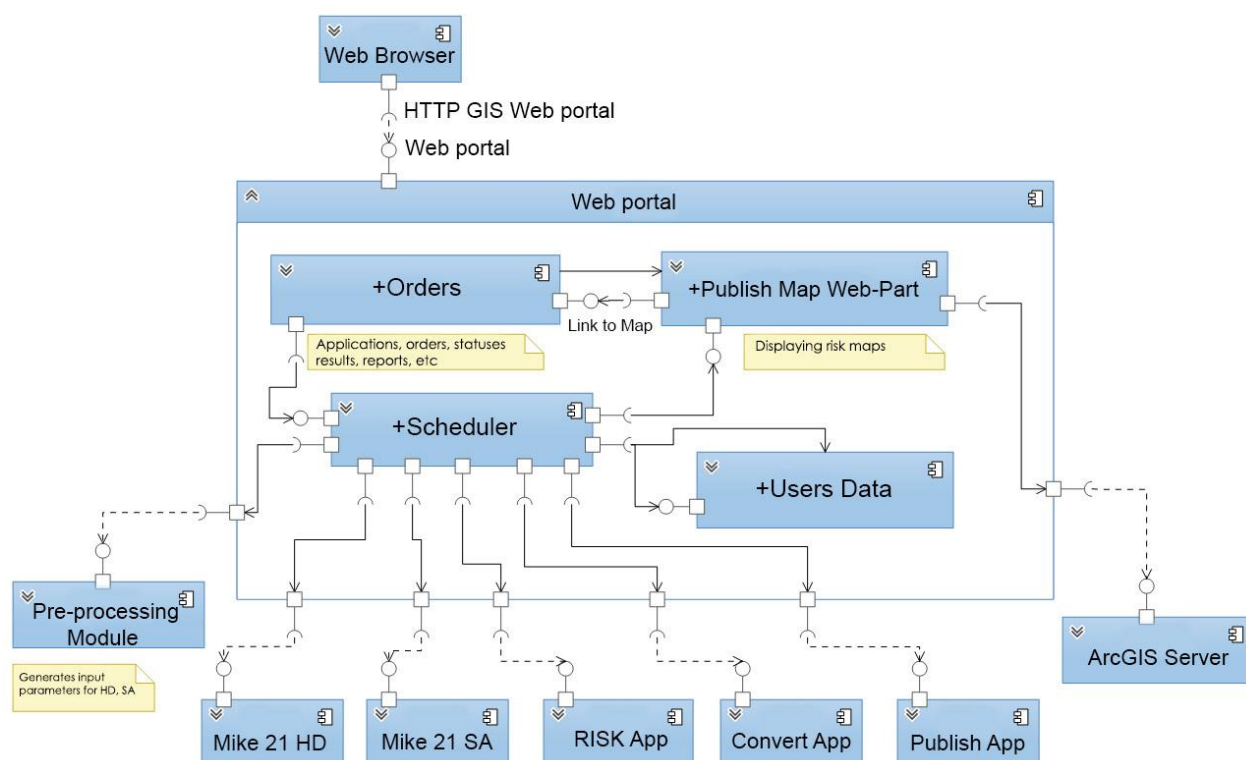


Рисунок 35 – Диаграмма компонентов

Компонент Web Browser – это программное обеспечение для просмотра веб сайтов. Веб-браузер установлен на компьютере клиента. Он обращается к GIS порталу через HTTP порт.

Компонент Web Portal представляет собой веб-сервер, на котором будет развернута Система RANDOM, разработанная на платформе Microsoft ASP.NET. Пользователи получают доступ к системе через веб-браузер. При обращении к системе пользователю будет необходимо пройти аутентификацию на веб-сервере. Веб-сервер отвечает за обработку всех запросов пользователя.

Компонент Orders обеспечивает хранения и структурное представления заявок пользователей.

Компонент Publish Map Web-Part обеспечивает отображение слоев на карте, также предоставляет инструментарий для обработки геоинформационных данных.

Компонент Users Data обеспечивает хранение рисковых карт и прилагающийся к ним отчетов.

Компонент Scheduler отвечает за очередность запуска заявок на расчет, осуществляет регулирование и организацию всего процесса расчета рискового картирования (формирование очередности заявок, осуществление проверки на возможность реализации расчетов и т.п.). Производит координацию расчетов, в зависимости от типа выбранной услуги, передачу параметров, создание подзадач.

Компонент ArcGIS Server обеспечивает хранение карт в виде сервисов для отображения в Publish Map Web-Part.

Компонент Pre-processing Module обеспечивает генерацию конфигурационных файлов необходимых для расчета ветра, гидродинамики и нефтяного разлива.

Компонент Mike 21 HD обеспечивает автоматизированный расчет гидродинамики на заданный период. Функциональная часть компонента Mike 21 HD реализована с помощью приложения DHI MIKE 21 HD, а управляющая часть реализована веб-сервисом ProxyHD, которая обеспечивает взаимодействие планировщика с функциональной частью компонента.

Компонент Mike 21 SA обеспечивает автоматизированный расчет разлива нефти на заданный период. Функциональная часть компонента Mike 21 SA реализована с помощью приложения DHI MIKE 21 SA, а управляющая часть реализована веб-сервисом ProxySA, которая обеспечивает взаимодействие планировщика с функциональной частью компонента.

Компонент RiskApp вычисляет вероятностный риск нефтяного загрязнения моря и поражения биоты на Северном Каспий.

Компонент ConvertApp преобразует цифровые данные полученные с Mike 21 и RiskApp в классифицированные по соответствующим цветам слои карты.

Компонент PublishApp отвечает за автоматизированный сбор сконвертированных данных в картографический сервис и дальнейшую публикацию на сервере ArcGIS, путем использования сервисов ArcMap [95].

4.2 Разработка веб-сервисов для управления расчетными модулями системы

4.2.1 Разработка веб-сервиса предобработки входных данных, расчета морских течений и распространения нефти

Веб-сервис Preprocessing обеспечивает создание конфигурационных файлов и запуск расчетов гидродинамики и разливов нефти. Веб-сервис Preprocessing представляет собой веб-сервисы SOAP, выполняющие подготовку входных данных для расчетов, производящие запуск задач на расчет и выполняющие функции управления задачами. Модуль Preprocessing представлен 3 интерфейсами: *IPreProcessing*, *IProxyService* и *IServiceController*.

IPreProcessing предоставляет методы для подготовки входных данных для расчетов. Сервис *PreProcessing* также предоставляет 3 класса контракта данных (*DataContract*), инкапсулирующих в себе входные параметры для расчетов: *SAParams*, *HDPARAMS*, *SourceParameters* (рисунок 36).

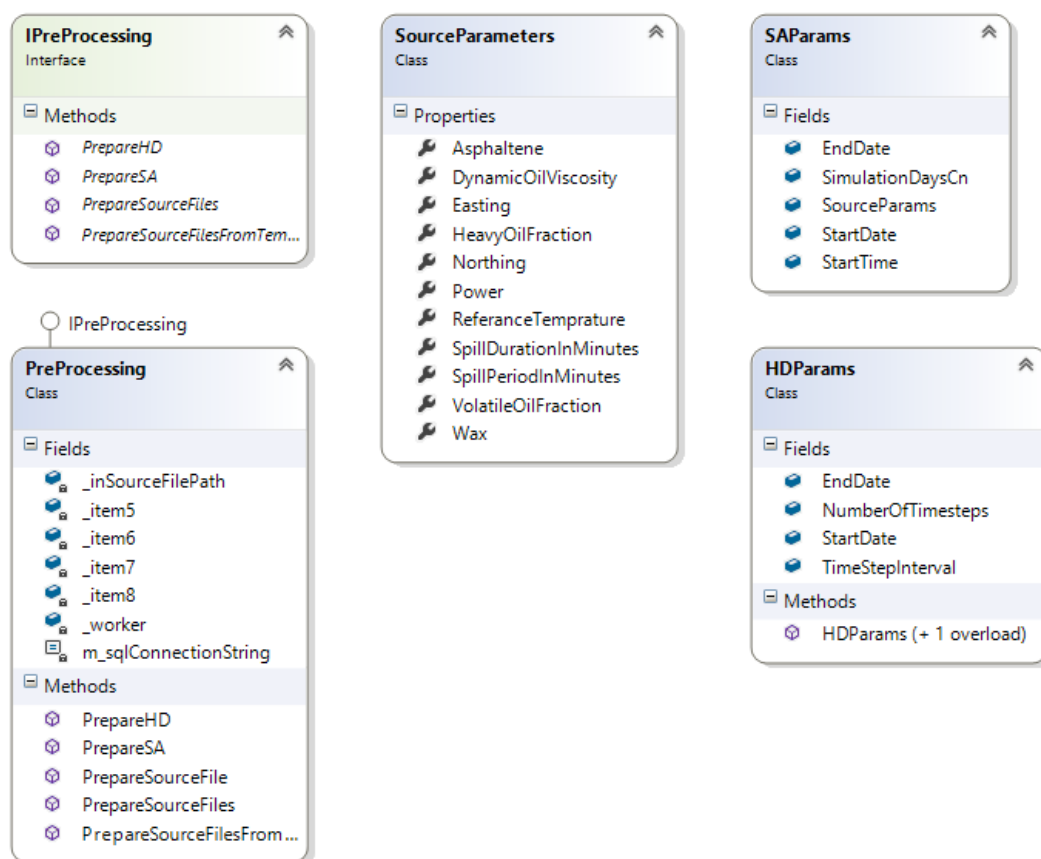


Рисунок 36 – Диаграмма классов. Веб-сервис Preprocessing. Классы и перечисления

При создании конфигурационных файлов для расчета гидродинамики используется метод *PrepareHD*. Для запуска метода создания конфигурационных файлов гидродинамики необходимы следующие входные данные:

- период, в течении которого возможна авария; (период указанный в заявке);
- файл ветра на данный период; (данные из базы данных ветра на период возможной аварии);
- файл батиметрии; (данные из базы данных батиметрии).

Результатом работы метода *PrepareHD* являются конфигурационные файлы для расчета гидродинамики с расширением *m21*. В данных файлах хранятся параметры необходимые для запуска расчета гидродинамики в программном пакете MIKE 21 HD.

При создании конфигурационных файлов для расчета разлива нефти необходимо создать файл источника, для этого используется метод *PrepareSourceFiles*.

Для запуска метода создания файла источника необходимы следующие входные данные:

- дата, когда возможна авария; (дата, указанная в заявке);
- мощность источника; (значение, указанное в заявке);

- длительность аварии; (длительность аварии, указанная в заявке);

Результат работы метода *PrepareSourceFiles*: Файл источника с расширением *dfs0*. В данных файлах хранится значение мощности, распределенное на длительность аварии.

Для запуска метода *PrepareSA* создания конфигурационных файлов разлива необходимы следующие входные данные:

- дата, когда возможна авария; (дата, указанная в заявке);
- данные по нефти; (данные по нефти указанные в заявке);
- файлы ветра на данный период; (данные из базы данных ветра);
- файлы гидродинамики; (данные из базы данных гидродинамики);
- файлы источника. (результат работы метода *PrepareSourceFiles*).

Результатом работы метода *PrepareSA* являются конфигурационные файлы для расчета разлива с расширением *nra*. В данных файлах хранятся параметры необходимые для запуска расчета разлива в программном пакете MIKE 21 SA.

IProxyService предоставляет методы для создания и запуска расчетов гидродинамики и разливов нефти. Данный интерфейс наследует методы *IProxy* (рисунок 37), в котором доступны методы для контроля выполнения задач.

Для запуска расчета гидродинамики вызывается метод *CalculateHD*, который запускает расчет гидродинамики в приложении MIKE21 HD. Этот метод реализован в веб-сервисе Preprocessing, указанный на рисунке 37. Для расчета гидродинамики необходимы следующие входные данные:

- Конфигурационные файлы для расчета гидродинамики; (результат работы метода *Prepare HD*)

Результатом работы метода *CalculateHD* являются файлы посчитанной гидродинамики в формате *dfs2*. В данных файлах хранится информацию о движении водяной поверхности на заданный период. Данные файлы сохраняются в базе данных файлов гидродинамики.

Для запуска расчета разлива используется метод *CalculateSA*, который запускает расчет разлива в приложении MIKE 21 SA. Этот метод реализован в веб-сервисе Preprocessing, указанный на рисунке 37. Для расчета разлива необходимы следующие входные данные:

- Конфигурационные файлы для расчета разлива; (результат работы метода *PrepareSA*)

Результатом работы метода *CalculateSA* являются файлы посчитанных разливов в формате *dfs2*. В данных файлах хранится информация о толщине пленки нефти в каждой точке водяной поверхности.

Алгоритм получения файла разлива нефти состоит из следующих операций:

- 1) построение трехмерной модели батиметрии и гипсометрии Каспия (*bathimetry_1km.dfs2*);
- 2) интерполяция данных по атмосферному давлению и скоростям ветра на сетку 1км*1км (файл *wind1km.dfs2*);
- 3) ввод данных по температуре морской поверхности;
- 4) расчет гидродинамики Каспия (файл *level1km.dfs2*);
- 5) обрезка файла прогноза ветра *wind1km.dfs2* (*wind1km_area.dfs2*);

- 6) определение мощности источника нефтяного загрязнения (source.dfs0);
- 7) ввод данных по уровню поверхности Северного Каспия (Initial Surface Elevation);
- 8) расчет разлива нефти на указанный период (oil.dfs2);

IServiceController предоставляет методы для создания заявок на расчет, и их исполнение (рисунок 37). К данному сервису обращается непосредственно веб-портал для создания и запуска расчетов. Веб-сервисы *ProxyService* и *PreProcessing* используются модулем *TaskController* [96].

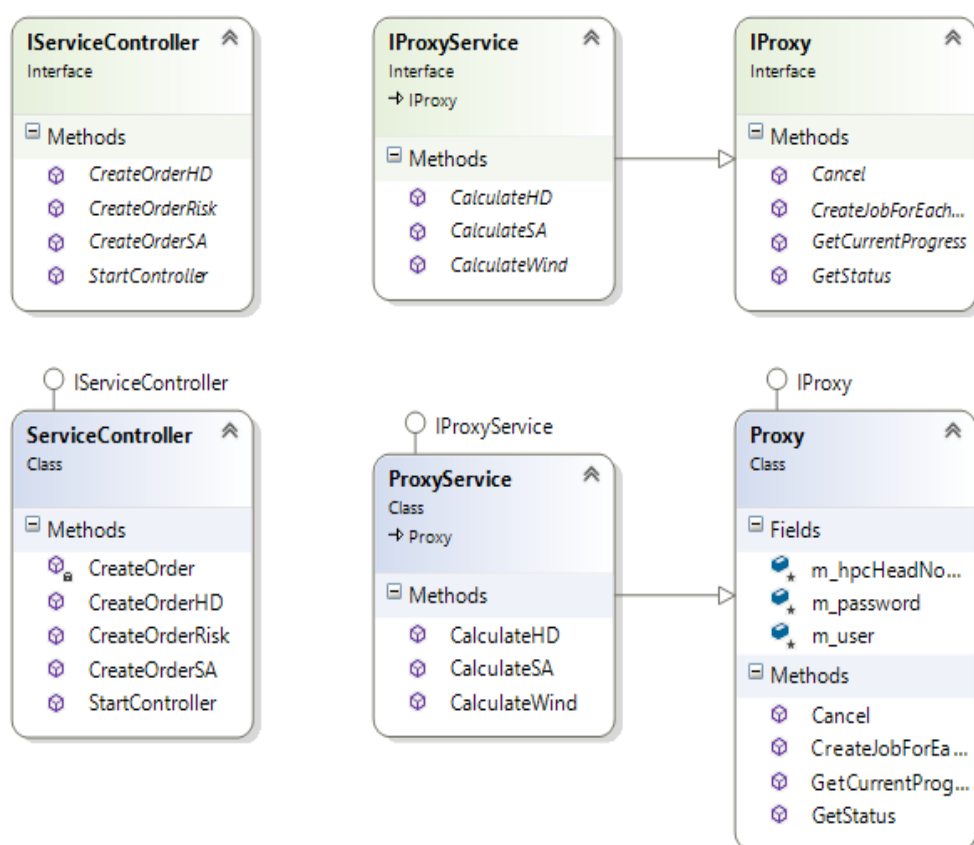


Рисунок 37 – Диаграмма классов. Веб-сервис Preprocessing. Интерфейсы и веб-сервисы

4.2.2 Разработка веб-сервиса расчета риска загрязнения моря и риска поражения биоты

Веб-сервис *HPCRiskModel* – был реализован для того чтобы планировщик мог управлять модулем расчета риска загрязнения моря и риска поражения биоты. Веб-сервис принимает от планировщика необходимые параметры и запускает расчет. Для контроля процесса в качестве обратной связи веб-сервис передает информацию о статусе выполнения и дает возможность прервать расчет.

Проектирование веб-сервиса *HPCRiskModel* началось с определения интерфейсов и связей между ними. Были определены два интерфейса *IPreRiskMod* и *IRiskMod* для логики работы веб-сервиса *HPCRiskModel*, который

реализует запуск расчета риска. Каждый интерфейс был имплементирован в отдельном классе *PreRiskMod* и *RiskMod* (рисунок 38).

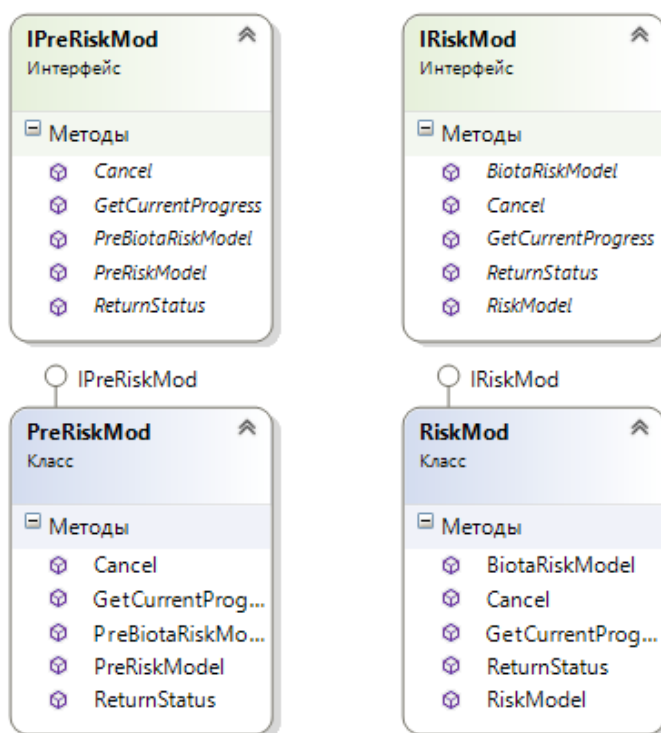


Рисунок 38 – Интерфейсы и классы веб-сервиса NPCRiskModel.

Веб-сервис имеет следующие основные методы:

- методы *PreRiskModel* и *PreBiotaRiskModel* запускают программы на кластере для предварительного расчета;
- методы *RiskModel* и *BiotaRiskModel* запускают программы на кластере для расчета риска;
- метод *GetCurrentProgress* получает текущее состояние выполненности расчета;
- метод *ReturnStatus* получает статус завершенности расчета;
- метод *Cancel* останавливает расчеты.

Метод *PreRiskModel* запускает программу *PrepareRiskApp.exe* на расчет. Из-за большого объема входных данных программа запускается на Суперкомпьютере. *PreRiskModel* в цикле отправляет команду менеджеру задач вычислительного кластера для параллельного запуска программы на расчет, при этом, для каждого экземпляра программы передается как входной параметр год, путь к каталогу с файлами разлива, путь к каталогу с файлом гидродинамики, так и путь к каталогу для сохранения файлов с результатами и значение ПДК. Экземпляры *PrepareRiskApp.exe* параллельно запускаются на 36 ядрах, что соответствует количеству лет статистических данных. После того как все экземпляры программы закончат расчеты на узлах, файлы с результатами расчетов помещаются в указанный каталог и статус о завершенности расчета возвращается планировщику.

Планировщик, получив статус завершенности расчета от *PreRiskModel*, вызывает метод *RiskModel*, который запускает программу *RiskApp.exe*. Метод передает программе *RiskApp.exe* путь к каталогу с результатами расчета *PrepareRiskApp.exe*, путь к каталогу для вывода файла с результатами и значение вероятности аварии. После окончания расчета планировщику возвращается статус завершенности и в каталоге для результатов появляется файл формата *dfs2*, который содержит результаты риска нефтяного загрязнения.

Аналогично методу *PreRiskModel* метод *PreBiotaRiskModel* запускает программу *PrepareBiotaRiskApp.exe* на расчет. *PreBiotaRiskModel* также в цикле отправляет команду менеджеру задач вычислительного кластера для параллельного запуска, при этом, для каждого экземпляра программы передается те же параметры как для *PrepareRiskApp.exe* и дополнительно путь к файлам биоты и выбранный для расчета риск месяц. Экземпляры *PrepareBiotaRiskApp.exe* параллельно запускаются на 151 ядрах, что соответствует количеству биоразнообразию видов используемых для расчета. После того как программа закончит расчеты, файлы с результатами каждого экземпляра помещаются в указанный каталог и статус о завершенности расчета возвращается планировщику.

Планировщик, получив статус завершенности расчета от *PreBiotaRiskModel*, вызывает метод *RiskBiotaModel*, который запускает программу *BiotaRiskApp.exe*. Метод передает программе *BiotaRiskApp.exe* путь к каталогу с результатами расчета *PrepareBiotaRiskApp.exe*, путь к каталогу для вывода файла с результатами и путь к файлам биоты. После окончания расчета планировщику возвращается статус завершенности и в каталоге для результатов появляется файл формата *dfs2*, который содержит результаты риска поражения биоты.

4.2.3 Разработка веб-сервиса конвертации и публикации карт

Веб-сервис *MapConverter* был реализован для конвертирования файлов формата *dfs2* (DHI MIKE 21) в векторные карты программы ESRI ArcGIS и публикации этих карт в ArcGIS Server. Веб-сервис принимает от планировщика необходимые параметры и запускает соответствующие программы. Для контроля выполнения веб-сервис передает информацию о статусе выполнения и дает возможность прервать расчет.

Проектирование веб-сервиса *MapConverter* началось с определения интерфейса *IMapConvert*, который реализует запуск программ конвертации и публикации карт. Интерфейс был имплементирован в отдельном классе *MapConvert*, интерфейс и класс представлены на Рисунок 39.

Веб-сервис имеет следующие основные методы:

- методы *ConvertHD*, *ConvertOS*, *Convert* и *ConvertBiotaRisk* запускают программы для конвертации карт;
- методы *PublishHD*, *PublishOS*, *Publish* и *PublishBiotaRisk* запускают программы для публикации карт;
- метод *GetCurrentProgress* получает текущее состояние выполненности расчета;
- метод *ReturnStatus* получает статус завершенности расчета;

– метод *Cancel* производит остановку расчетов.

К методам *ConvertHD*, *ConvertOS*, *Convert* и *ConvertBiotaRisk* передаются id заявки, путь к каталогу с результатами и путь к каталогу для вывода сконвертированного файла. Каждый метод соответственно вызывает необходимый скрипт, который преобразовывает данные с формата dfs2 в векторные слои. В результате, после завершения конвертации, веб-сервис возвращает планировщику статус о завершенности работы. Планировщик, получив статус завершенности расчета от соответствующего метода, вызывает необходимый метод *PublishHD*, *PublishOS*, *Publish* или *PublishBiotaRisk*, который публикует карты в ArcGIS Server. После чего опубликованные карты будут доступны в системе RANDOM.

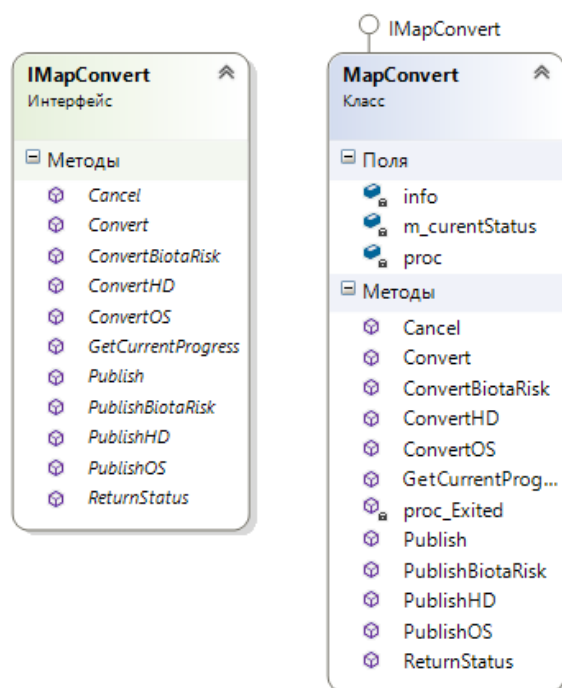


Рисунок 39 – Интерфейс и класс веб-сервиса MapConverter.

4.2.4 Разработка модуля управления веб-сервисами

Модуль *TaskController* (далее контроллер) – это приложение, отвечающее за запуск, выполнение и контроль запущенных задач по расчетам; представляет собой исполняемый файл Windows x64. Диаграмма классов данного модуля *TaskController* приведена на рисунке ниже (рисунок 40). При запуске получает в качестве параметра идентификатор заявки расчета.

Пример запуска:

TaskController.exe 1052

После запуска контроллер запрашивает данные о заявке из базы данных. Заявка может быть одной из четырех доступных типов (перечисление *OrderType* на рисунке ниже (рисунок 40): расчет модели гидродинамики (hd), расчет модели нефтяного разлива (sa), расчет модели рискового картирования (risk), расчет модели рисков поражения биоты (biota). После определения типа заявки

контроллер начинает работу по созданию выполнению задач, соответствующих данному типу заявки. За контроль выполнения задач отвечает класс *CalculationController*, который содержит методы для контроля каждого из типа заявок: *ControlHdCalculation*, *ControlSaCalculation*, *ControlRiskCalculation*, *ControlBiota*. Далее, рассмотрим алгоритмы работы контроллера для каждого из типа заявок.

Алгоритм работы контроллера для расчета модели гидродинамики:

1) Подготовка входных данных – для запуска расчета модели гидродинамики необходимо подготовить входные файлы Mike21 с расширением *.m21 на заданный период. Данные файлы содержат данные о рассчитываемой модели. Для подготовки входных файлов вызывается метод *PrepareHD* класса *CalculationController*, данный метод обращается к веб-сервису *PreProcessing* вызывая одноименный метод *PrepareHD*.

2) Запуск расчета модели гидродинамики – после подготовки входных файлов вызывается метод *RunHdCalculation* класса *CalculationController*, данный метод обращается к веб-сервису *ProxyService* и вызывает метод *CalculateHD*.

3) Завершение выполнения заявки. После завершения расчетов заявка помечается как завершенная.

Алгоритм работы контроллера для расчета модели нефтяного разлива:

1) Подготовка входных данных – для запуска расчета модели распространения нефтяного разлива необходимо подготовить файлы Mike21 с расширением *.poi1, содержащие параметры нефтяного разлива (дата, время, координаты, и т.д.), а также файлы источника разлива с расширением *.dfs0, содержащие информацию об источнике нефтяного разлива (объем, состав и т.д.). Для подготовки входных файлов вызывается метод *PrepareSA* класса *CalculationController*, данный метод обращается к веб-сервису *PreProcessing* вызывая одноименный метод *PrepareSA*.

2) Запуск расчета модели нефтяного разлива – после подготовки входных файлов вызывается метод *RunSaCalculation* класса *CalculationController*, данный метод обращается к веб-сервису *ProxyService* и вызывает метод *CalculateSA*.

3) Конвертация в растровое изображение – после завершения расчетов производится конвертация выходных файлов в растровые изображения для отображения на карте. Для это вызывается метод *RunSaMapConverter* класса *CalculationController*, данный метод обращается к веб-сервису *MapConverter* вызывая метод *ConvertOS*.

4) Публикация изображения на карте – растровые изображения распространения нефтяного разлива публикуются на сервере ArcGis. Для этого вызывается метод *PublishSaMap* класса *CalculationController*, данный метод обращается к веб-сервису *MapConverter* вызывая метод *PublishOS*.

Алгоритм работы контроллера для расчета модели рисков нефтяного загрязнения:

1) Подготовка входных данных – для запуска расчета модели распространения нефтяного разлива необходимо подготовить файлы Mike21 с расширением *.poi1, содержащие параметры нефтяного разлива (дата, время,

координаты, и т.д.), а также файлы источника разлива с расширением *.dfs0, содержащие информацию об источнике нефтяного разлива (объем, состав и т.д.). Для подготовки входных файлов вызывается метод *PrepareSA* класса *CalculationController*, данный метод обращается к веб-сервису *PreProcessing* вызывая одноименный метод *PrepareSA*.

2) Запуск расчета модели нефтяного разлива – после подготовки входных файлов вызывается метод *RunSaCalculation* класса *CalculationController*, данный метод обращается к веб-сервису *ProxyService* и вызывает метод *CalculateSA*.

3) Подготовка данных для расчета модели рисков нефтяного загрязнения – вызывается метод *RunPreRisk* класса *CalculationController*, для этого данный метод обращается к веб-сервису *PreRiskMod* вызывая метод *PreRiskModel*.

4) Расчет модели рисков нефтяного загрязнения – вызывается метод *RunRiskModel* класса *CalculationController*, для этого данный метод обращается к веб-сервису *RiskMod* и вызывает метод *RiskModel*.

5) Конвертация в растровое изображение – после завершения расчетов производится конвертация выходных файлов в растровые изображения для отображения на карте. Для это вызывается метод *RunRiskMapConverter* класса *CalculationController*, данный метод обращается к веб-сервису *MapConverter* вызывая метод *Convert*.

6) Публикация изображения на карте – растровые изображения распространения нефтяного разлива публикуются на сервере ArcGis. Для этого вызывается метод *PublishRiskMap* класса *CalculationController*, данный метод обращается к веб-сервису *MapConverter* вызывая метод *Publish*.

Алгоритм работы контроллера для расчета модели рисков поражения биоты:

1) Подготовка входных данных – для запуска расчета модели распространения нефтяного разлива необходимо подготовить файлы Mike21 с расширением *.noil, содержащие параметры нефтяного разлива (дата, время, координаты, и т.д.), а также файлы источника разлива с расширением *.dfs0, содержащие информацию об источнике нефтяного разлива (объем, состав и т.д.). Для подготовки входных файлов вызывается метод *PrepareSA* класса *CalculationController*, данный метод обращается к веб-сервису *PreProcessing* вызывая одноименный метод *PrepareSA*.

2) Запуск расчета модели нефтяного разлива – после подготовки входных файлов вызывается метод *RunSaCalculation* класса *CalculationController*, данный метод обращается к веб-сервису *ProxyService* и вызывает метод *CalculateSA*.

3) Подготовка данных для расчета модели рисков нефтяного загрязнения – вызывается метод *RunPreBiota* класса *CalculationController*, для этого данный метод обращается к веб-сервису *PreRiskMod* вызывая метод *PreBiotaRiskModel*.

4) Расчет модели рисков нефтяного загрязнения – вызывается метод *RunBiotaModel* класса *CalculationController*, для этого данный метод обращается к веб-сервису *RiskMod* и вызывает метод *BiotaRiskModel*.

5) Конвертация в растровое изображение – после завершения расчетов производится конвертация выходных файлов в растровые изображения для отображения на карте. Для это вызывается метод *RunBiotaMapConverter* класса

CalculationController, данный метод обращается к веб-сервису *MapConverter* вызывая метод *ConvertBiotaRisk*.

6) Публикация изображения на карте – растровые изображения распространения нефтяного разлива публикуются на сервере ArcGis. Для этого вызывается метод *PublishBiotaMap* класса *CalculationController*, данный метод обращается к веб-сервису *MapConverter* вызывая метод *PublishBiotaRisk* [96].

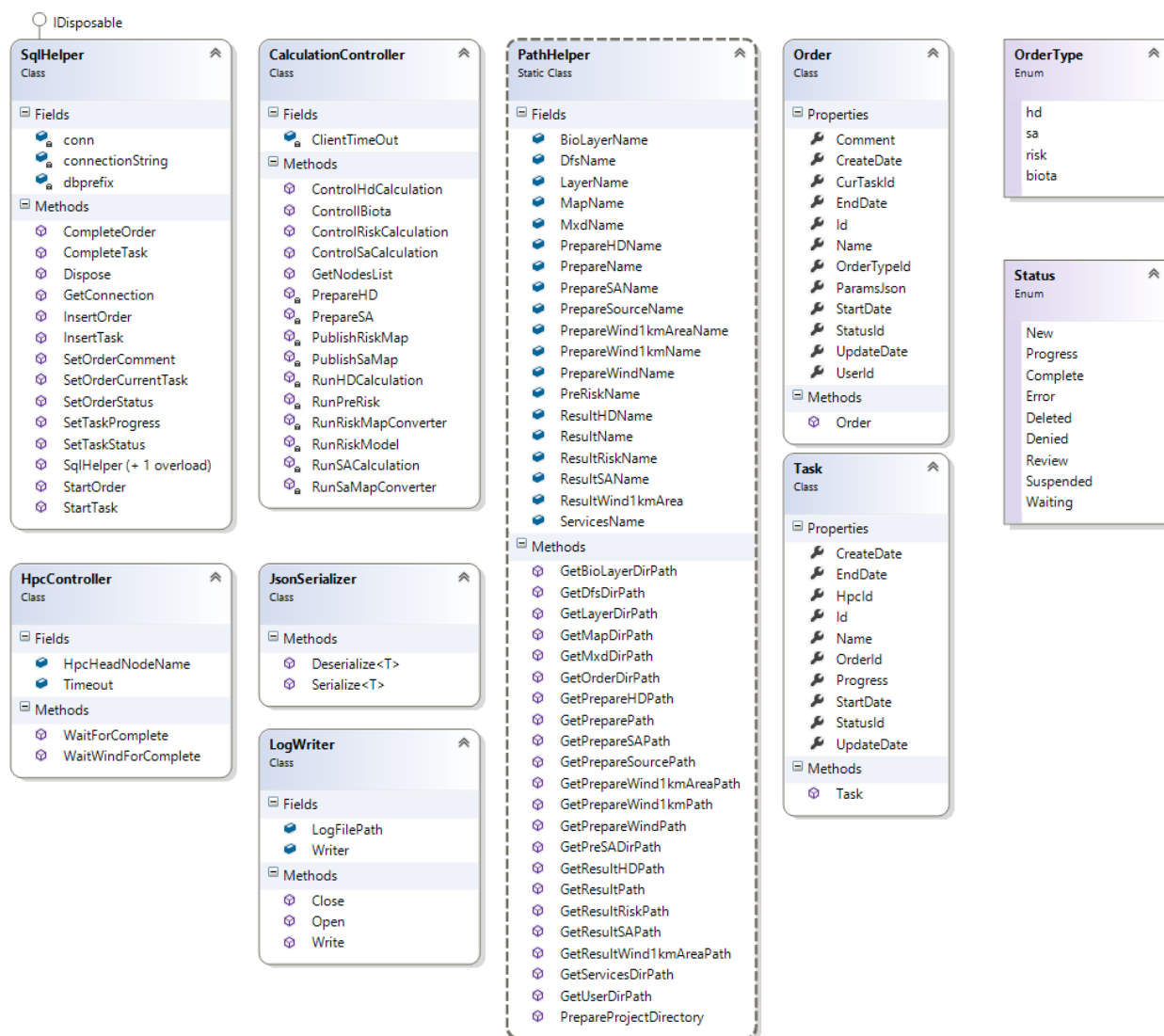


Рисунок 40 – Диаграмма классов модуля TaskController

4.3 Пользовательский интерфейс для запуска задач и визуализации результатов расчета

Была разработана система RANDOM (рисунок 41). Пользовательский интерфейс был разработан на веб-фреймворке ASP.NET компании Microsoft. А визуализация результатов на карте реализована с помощью ArcGIS for Server компании ESRI.

В системе RANDOM реализованы следующие сервисы [97]:

- 1) Постобработка метеоданных (сервис **Meteo**);
- 2) Прогноз морских течений (сервис **Hydro**);

- 3) Прогноз распространения нефтяного разлива (сервис **Oil Migration**);
 - 4) Рисковое картирование нефтяного загрязнения моря (сервис **Risk Oil**);
 - 5) Рисковое картирование поражение морской биоты (сервис **Risk Biota**).
- Опишем подробно каждый из сервисов.

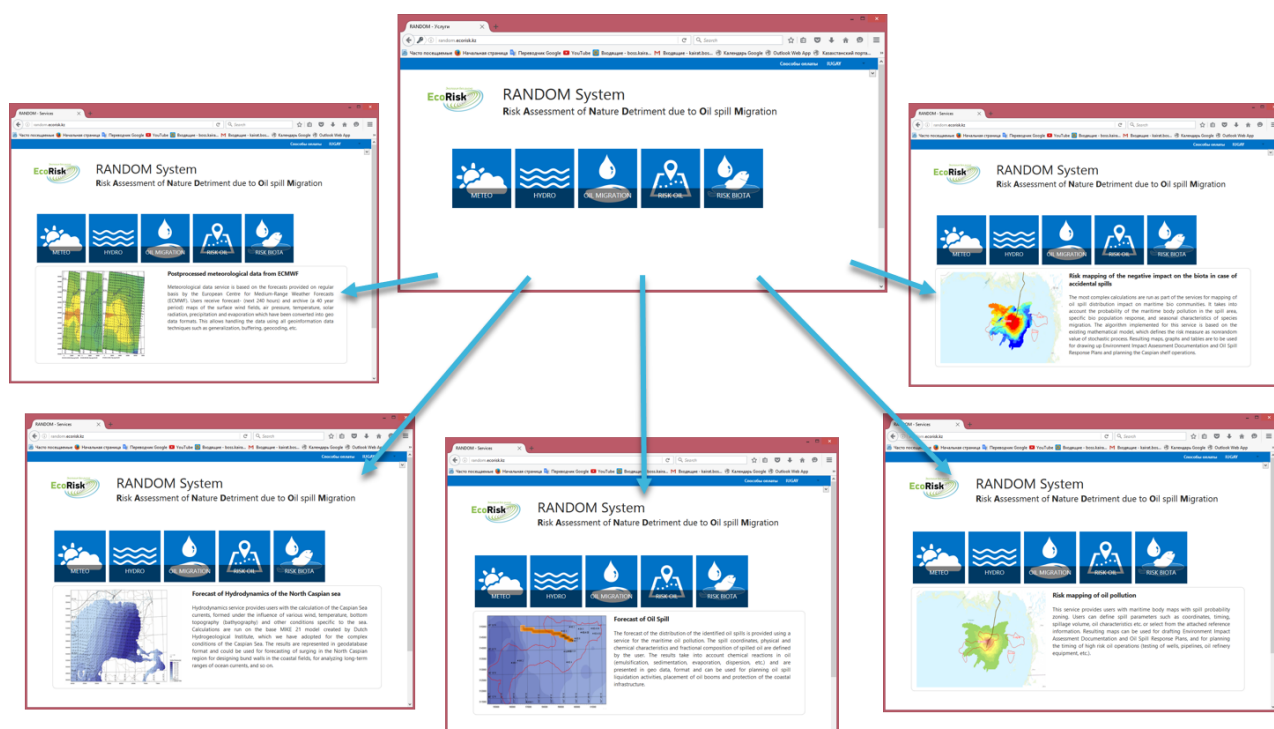


Рисунок 41 – Сервисы системы RANDOM

Сервис Meteo

Данный сервис основан на метеопрогнозе, регулярно получаемом из Европейского Центра Среднесрочных Прогнозов Погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)). Пользователю предоставляются прогнозные (на ближайшие 120 часов) и статистически проанализированные архивные (за 36-летний период) данные приземных полей ветра, давления, температуры воздуха и морской поверхности, преобразованные в цифровой и векторный форматы. Благодаря последнему есть возможность манипулировать ими с помощью инструментов геоинформатики.

Метеорологические данные, используемые в системе RANDOM, подразделяются на исторические и прогнозные. Исторические данные загружаются из базы данных реанализа ERA Interim, созданной ECMWF. Прогнозные метеорологические данные ECMWF поступают на ftp-сервер.

Рисунок 42 иллюстрирует пример визуализации метеорологических параметров в системе RANDOM.

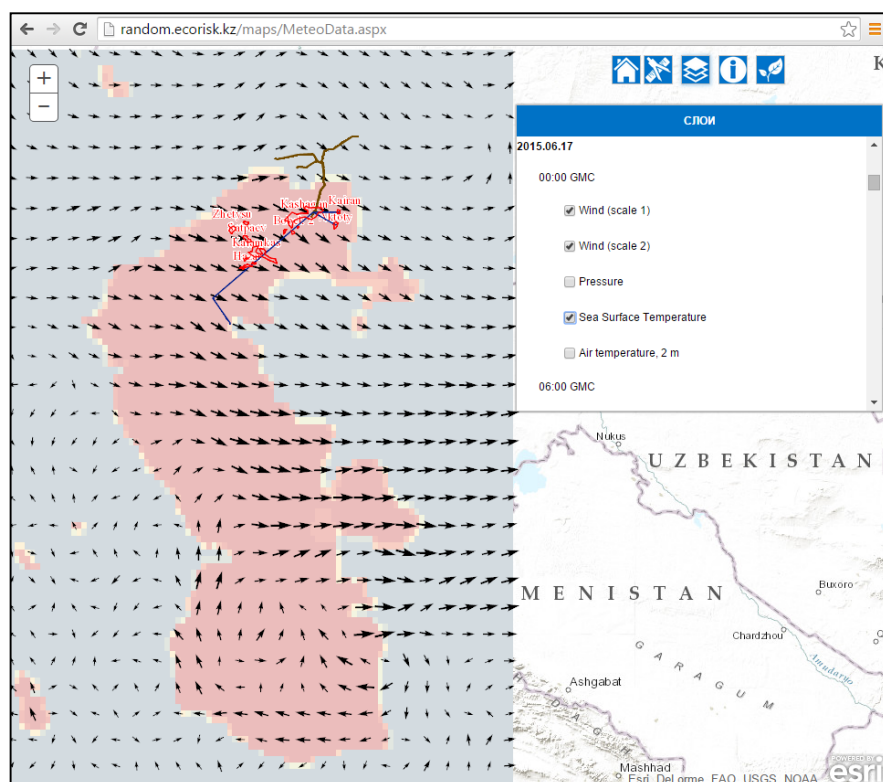


Рисунок 42 – Окно системы RANDOM с визуализированными метеопараметрами (температура морской поверхности, ветер) за 17.06.2015 00:00 GMC

Сервис Hydro

Сервис по гидродинамике предоставляет пользователю результаты расчета морских течений на Каспии, формирующихся под влиянием ветра, рельефа дна (батиметрии) и других условий, присущих именно этому морю. Расчет выполняется в модуле MIKE 21 Hydrodynamic (HD) Датского гидравлического института, который адаптирован нами к сложным условиям Каспийского моря. Результаты предоставляются в цифровом и векторном форматах и могут быть использованы при прогнозе сгонно-нагонных явлений на Северном Каспии, при проектировании защитных дамб на прибрежных месторождениях, при анализе многолетних рядов морских течений и т.д.

Точность расчета полей уровня поверхности в MIKE 21 HD определяется хорошим информационным обеспечением: точными метеогидрологическими параметрами и особенно качественной картографией, поэтому для проведения моделирования гидродинамики Каспия осуществляется выполнение следующих основных задач:

1. Разработка процедуры подготовки к моделированию в MIKE 21 HD метеорологических данных;
2. Подготовка батиметрических данных;
3. Расчет гидродинамики моря по модели MIKE-21 HD;
4. Проведение тестовых расчетов и сравнение результатов моделирования с натурными измерениями;
5. Публикация результатов в системе RANDOM

Для запуска расчета необходимо вписать название и выбрать дату начала моделирование, в результате получим прогноз на 10 дней с направлениями и скоростями течений и глубины моря (рисунок 43).

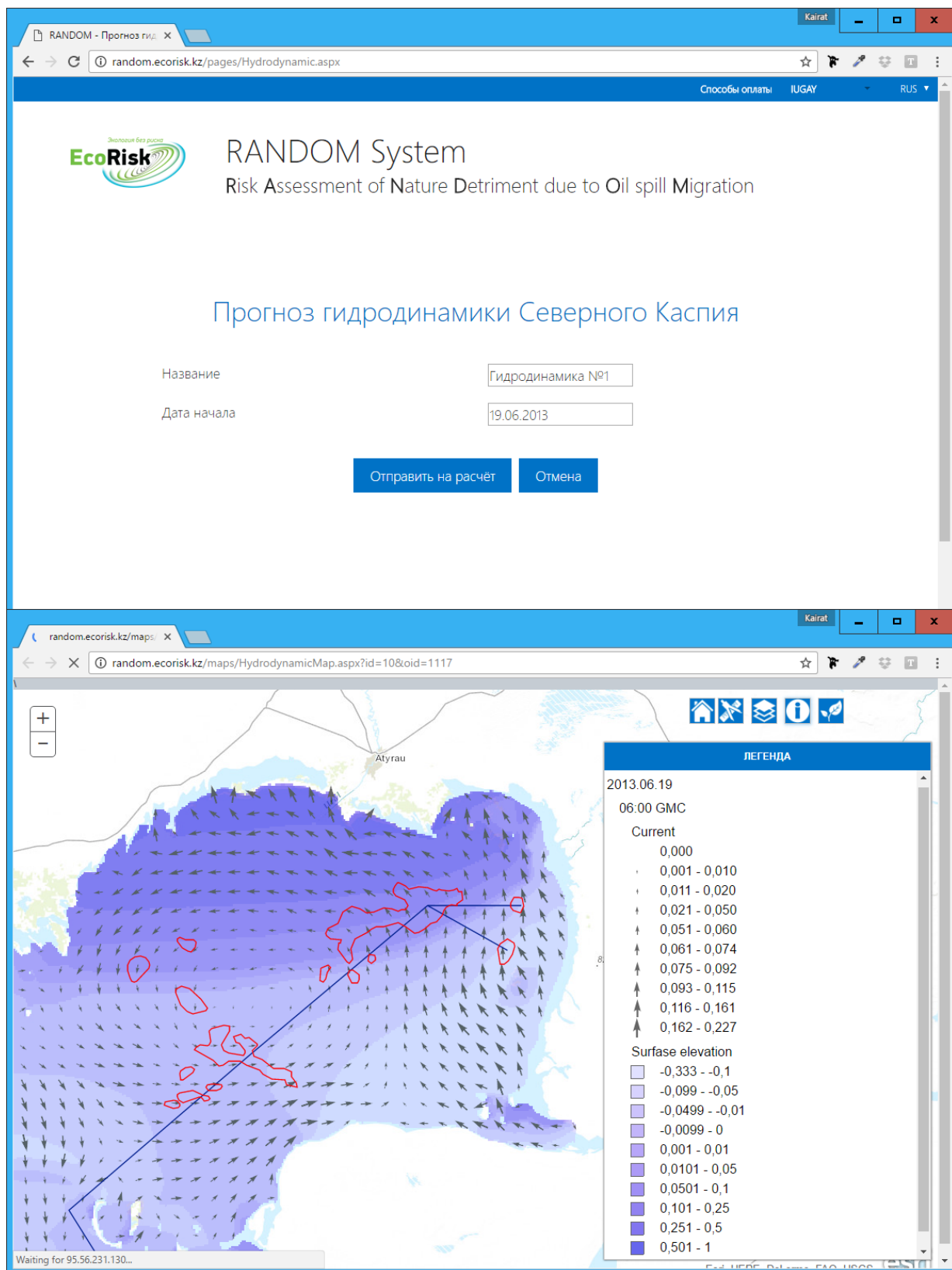


Рисунок 43 – Окно системы RANDOM с визуализированными данными гидродинамики (скорость течения и глубина) за 19.06.2013 06:00 GMC

Сервис Oil Migration

Сервис «Прогноз распространения нефтяного разлива» это сервис по расчету распространения нефтяного разлива, работающий в режиме реального времени и предоставляющий пользователю карты распространения нефтяной пленки по морской поверхности от заданных пользователем источников с учетом введенных им физико-химических свойств нефти. Расчеты осуществляются по модели MIKE 21 Oil Spill, где учитываются основные процессы переноса и физико-химические превращения нефти (эмульсификации, осаждения, испарения, дисперсии, растворения, биodeградации и т.д.). Результаты предоставляются в векторном формате и могут быть использованы при планировании мероприятий по ликвидации нефтяного разлива, размещению боновых заграждений, защите береговой инфраструктуры и др.

Для разработки сервиса по моделированию распространения нефтяного разлива были реализованы следующие процедуры:

- 1) Предобработка необходимых метеорологических данных;
- 2) Расчет гидродинамики моря по модели MIKE-21 HD на выбранную дату;
- 3) Расчет распространения нефтяного загрязнения по модели MIKE21 OS;
- 4) Постобработка результатов и публикация в системе RANDOM;
- 5) Формирование аналитического отчета по результатам моделирования и его размещение в системе RANDOM.

Рисунок 44 иллюстрирует форму с входными параметрами и пример визуализации результатов моделирования нефтяного разлива в системе RANDOM. Для запуска расчета необходимо указать название, дату и время начала разлива, координаты источника загрязнения в метрах (UTM-39), мощность источника в килограммах (общее количество вылившейся нефти), производственный риск в процентах, длительность разлива в часах и тип нефти с указанием химических и физических свойств.

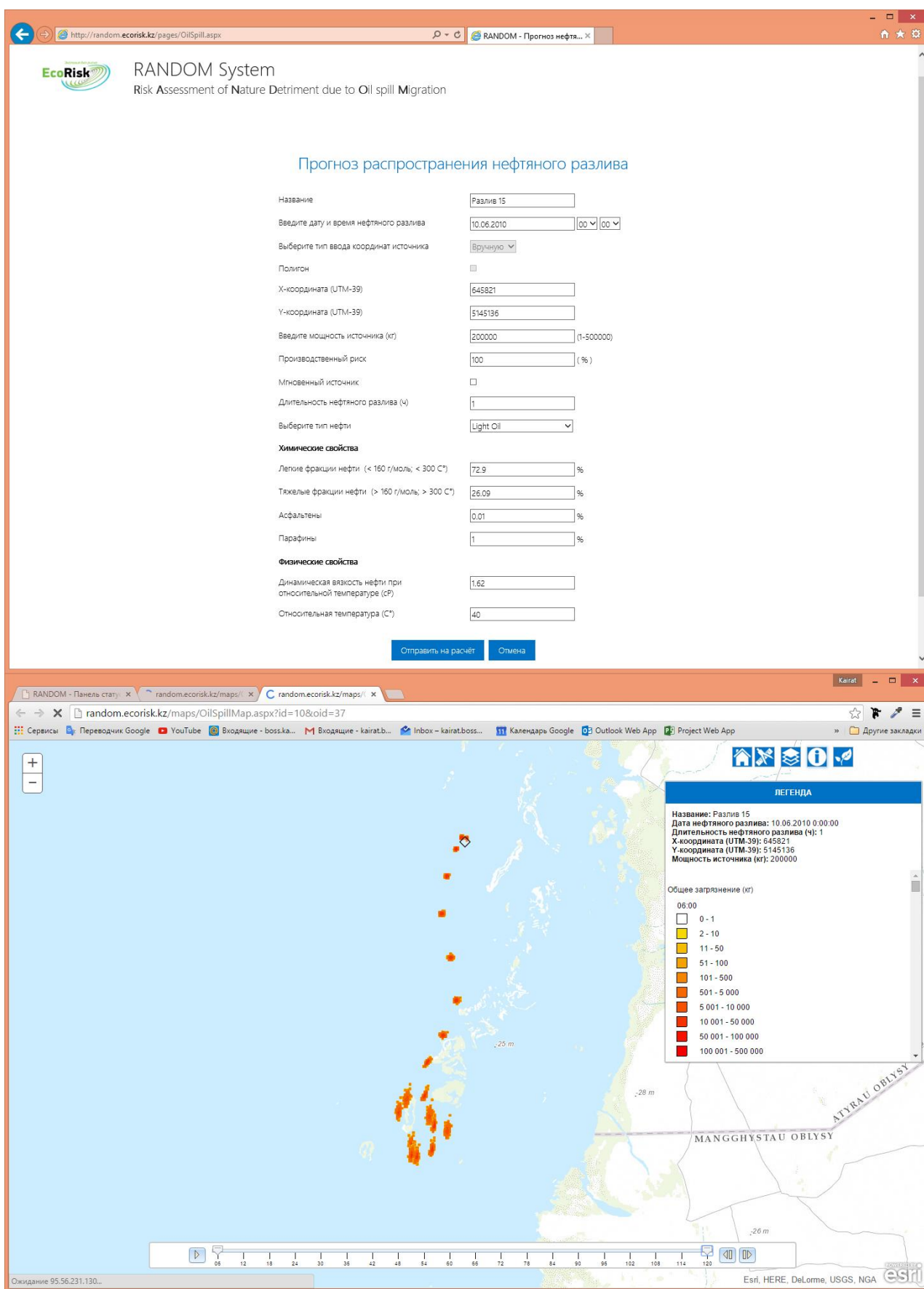


Рисунок 44 – Визуализация результатов моделирования нефтяного разлива на месторождении Кайран 10.06.2010 в системе RANDOM

Сервис Risk Oil

В данном сервисе осуществляется построение карты риска нефтяного загрязнения моря. Карта зонирована по степени вероятности нефтяного загрязнения. Пользователь имеет возможность задавать параметры аварии (координаты источника, время аварии, мощность разлива, свойства нефти) или выбрать из приложенной справочной информации. Результирующие карты могут быть использованы при подготовке документов ОВОС (Оценка Воздействия на Окружающую среду) и ПЛАРН (План Ликвидации Аварийных Разливов Нефти), а также при выборе сроков проведения опасных нефтяных операций (испытаний скважин, трубопроводов, установок по переработке нефти).

Технология рискованного картирования нефтяного загрязнения включает в себя следующие этапы:

- 1) Предварительная обработка пакета исторических метеорологических данных, включающего в себя каждый день выбранного пользователем месяца за период с 1979 г. по настоящее время;
- 2) Моделирование гидродинамики моря по модели MIKE-21 HD на каждый день выбранного месяца;
- 3) Расчет распространения нефтяного загрязнения по модели MIKE21 OS на каждый день выбранного месяца;
- 4) Расчет риска нефтяного загрязнения;
- 5) Постобработка результатов и публикация в системе RANDOM;
- 6) Формирование аналитического отчета по результатам моделирования и его размещение в системе RANDOM.

Рисунок 45 иллюстрирует форму для заполнения входных параметров для запуска расчета и результат карты риска нефтяного загрязнения моря на момент времени 96 ч при возможной аварии на месторождении Каламкас-море. Для запуска расчета необходимо присвоить название, выбрать месяц, указать координаты источника загрязнения в метрах (UTM-39), мощность источника в килограммах (общее количество вылившейся нефти), производственный риск в процентах, длительность разлива в часах и тип нефти с указанием химических и физических свойств.

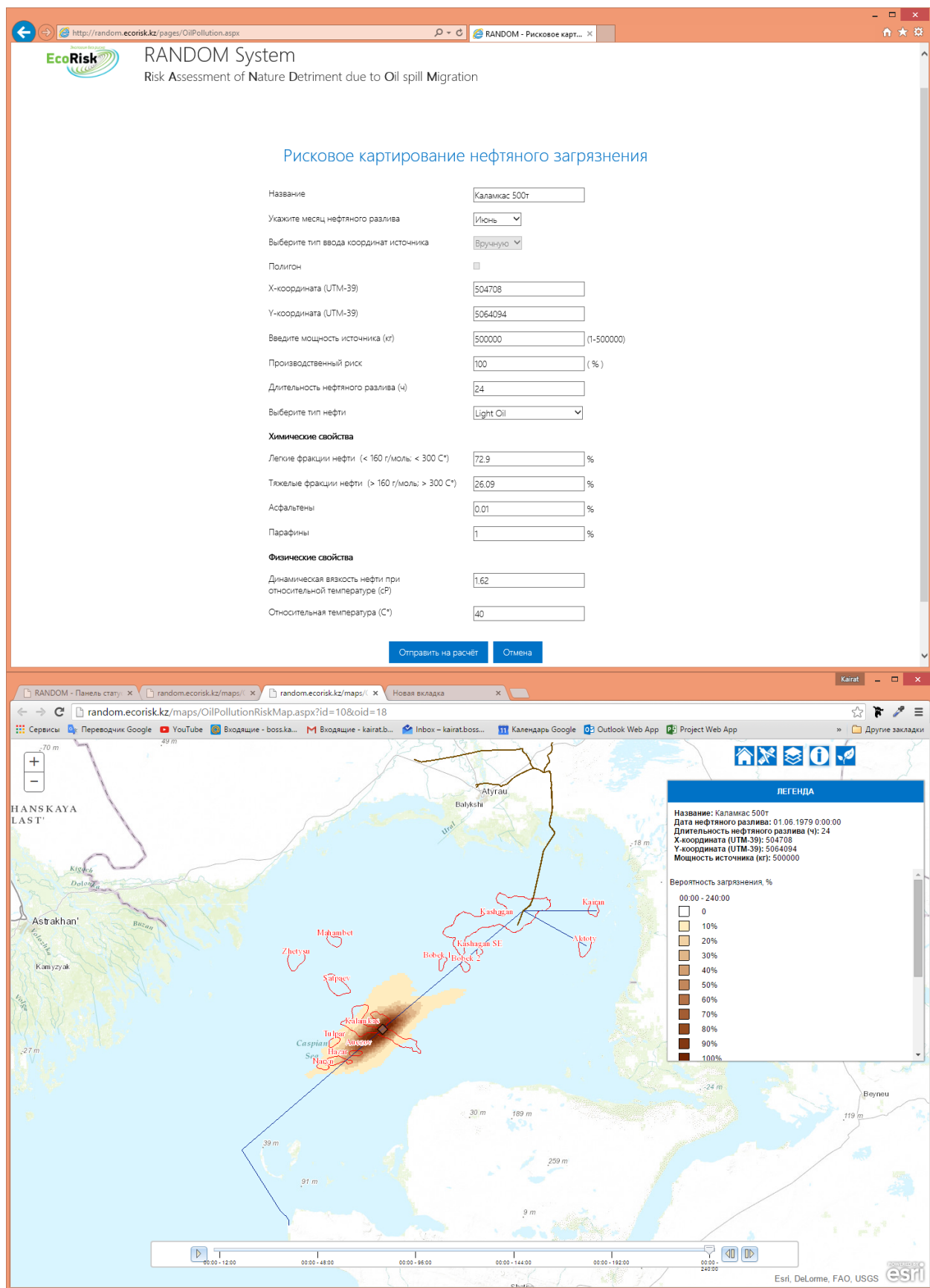


Рисунок 45 – Визуализация карты риска нефтяного загрязнения моря на момент времени 96 ч

Сервис RiskBiota

Данный сервис осуществляет рисковое картирование ущерба морским биологическим сообществам при распространении аварийного разлива нефти. В рамках данного сервиса выполняются наиболее сложные расчеты. Здесь учитываются и вероятность загрязнения акватории моря в районе аварии, и чувствительность обитающих там популяций к этому загрязнению, и сезонные особенности миграции биологических видов. Алгоритм, реализованный в этом сервисе, опирается на разработанную ранее математическую модель. Результирующие карты и графики предназначены для использования в документах ОВОС, ПЛАРН и при планировании нефтяных операций на шельфе Каспия.

Технология рискового картирования поражения морской биоты включает в себя следующие этапы:

1. Предварительная обработка пакета исторических метеорологических данных, включающего в себя каждый день выбранного пользователем месяца за период с 1979 г. по настоящее время;
2. Моделирование гидродинамики моря по модели MIKE-21 HD на каждый день выбранного месяца;
3. Расчет распространения нефтяного загрязнения по модели MIKE21 OS на каждый день выбранного месяца;
4. Построение карт биоразнообразия и чувствительности биоты;
5. Расчет риска поражения биоты;
6. Постобработка результатов и публикация в системе RANDOM;
7. Формирование аналитического отчета по результатам моделирования и его размещение в системе RANDOM.

Рисунок 46 иллюстрирует форму для заполнения входных параметров для запуска расчета и результат рискового картирования поражения биоты при возможной аварии на месторождении Каламкас-море. Для запуска расчета необходимо присвоить название, выбрать месяц, указать координаты источника загрязнения в метрах (UTM-39), мощность источника в килограммах (общее количество вылившейся нефти), производственный риск в процентах, длительность разлива в часах и тип нефти с указанием химических и физических свойств.

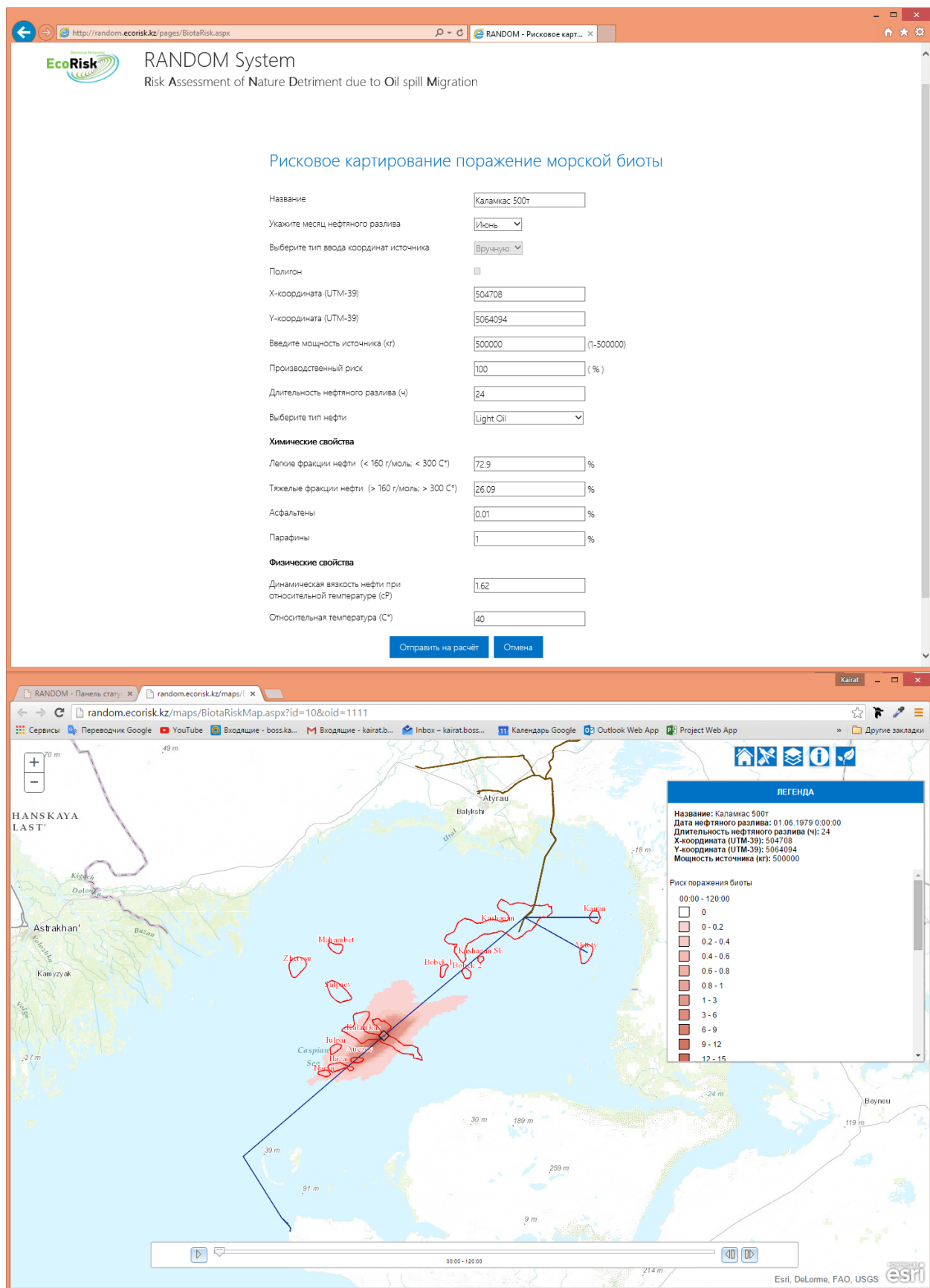


Рисунок 46 – Карта риска поражения биоты при аварии от источника на м. Каламкас-море после 240 часов

Выводы по четвертому разделу

В данной главе было описано проектирование разрабатываемой системы с помощью UML диаграмм и приведена архитектура системы, интегрированная с высокопроизводительным кластером. Методология проектирования и интеграции системы основана на сервис-ориентированной архитектуре, которая позволяет легко и гибко интегрировать любую службу в настольное или мобильное приложение. Была разработана и построена 4-уровневая SOA на основе стандарта W3C Web Service. Процесс многомерного моделирования разливов нефти был автоматизирован на высокопроизводительном кластере.

Для взаимодействия и управления расчетными модулями были разработаны веб-сервисы. За счет них были автоматизированы процессы, обеспечивающие оперативную обработку данных, хранение данных, возможность производства многократных расчетов без участия специалиста.

Разработан портал с удобным пользовательским интерфейсом и последовательностью обработки заявок пользователей.

Были полностью реализованы и интегрированы в единую систему все блоки платформы, включая портал, интерфейсы, базы геоданных, расчетные модули и др. Пользовательский интерфейс был разработан на веб-фреймворке ASP.NET компании Microsoft. А визуализация результатов на карте реализована с помощью ArcGIS for Server компании ESRI.

В разработанной системе реализованы следующие услуги:

- 1) Постобработка метеоданных (сервис Meteo);
- 2) Прогноз морских течений (сервис Hydro);
- 3) Прогноз распространения нефтяного разлива (сервис Oil Migration);
- 4) Рисковое картирование нефтяного загрязнения моря (сервис Risk Oil);
- 5) Рисковое картирование поражения морской биоты (сервис Risk Biota).

5 ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ДРУГИХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

5.1 Гидродинамическая модель атмосферы и модель атмосферного переноса химических веществ

На региональном уровне, и особенно в районах с потенциально различными источниками промышленных загрязнителей, оценка риска воздействия на окружающую среду и население имеет критическое значение. При нормальной работе, риск минимален. Тем не менее, во время аварийных ситуаций, риск увеличивается за счет выбросов вредных загрязняющих веществ в различных средах, таких как вода, почва и атмосфера, которая следует в процессе непрерывного преобразования и транспортировки. Загрязнение атмосферы промышленными выбросами приводит к ухудшению экологической ситуации, как на прилегающих территориях, так и на дальних расстояниях от источника.

Многие международные научно-исследовательские проекты реализовали модели и методы, описывающие отдельные части в оценке риска, например, вероятностной оценки безопасности, переноса на большие расстояния и моделирования загрязнения, радиоэкологической чувствительности, оценка дозы и т.д. Моделирование химических полей и прогноз погоды имеют все большую популярность в научной среде. Существуют две парадигмы моделирования для прогнозирования химической погоды; онлайн подход и автономный подход [98]. Исследование распространения сернистого ангидрида на северное полушарие выполнялся с помощью онлайн модели Enviro-HIRLAM. В результате расчета был получен большой набор данных, который обрабатывался с помощью специально разработанной процедуры. Основная цель данной работы заключается в анализе распространения загрязняющих веществ, основанную на краткосрочном моделировании для оценки временной и пространственной изменчивости атмосферного переноса в выбранной области, и используя полученные результаты интеграция в ГИС для картирования риска и уязвимости.

Enviro-HIRLAM представляет собой полностью онлайн интегрированную систему, включающую гидродинамическую модель атмосферы и модель атмосферного переноса химических веществ (АПХВ), используемую для прогнозирования и исследования метеорологической и химической погоды [98]. В модели Enviro-HIRLAM используются шесть уравнений, описывающие следующие процессы: эмиссии, адвекции, горизонтальной и вертикальной диффузия, сухого мокрого и конвекционного осаждения, и химию газообразных примесей и аэрозолей. Реализованный аэрозольный микрофизический модуль M7 использует 5 типов - сульфаты, морская соль, пыль, черный и органический углерод; а также распределены в 7 режимах. Удалены процессы с аэрозолями, включающие в себя гравитационное осаждение и влажностное осаждение [99]. Поскольку модель Enviro-HIRLAM является онлайн интегрированной моделью, оба процесса, метеорологические и химические, одновременно моделируются на каждом временном шаге. ГИС-инструменты используются для визуализации и

обработки выходных данных модели Enviro-HIRLAM и анализа полученных результатов.

Начальные и граничные условия для метеорологии и химии

Начальные и граничные условия для метеорологических параметров были получены по данным ЕЦСПП (Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды) с горизонтальным разрешением $0,75^\circ$. Данные включают в себя начальные и граничные поля для таких параметров, как температура воздуха, скорости ветра, удельной влажности и давления на поверхности. Полученные начальные и граничные условия охватывает период с 16 по 27 января 2010 года включительно с 3-часовым временным шагом.

Данные ретроспективного анализа МСАК (Мониторинг состава атмосферы и климата) были использованы в качестве начальных и граничных условий для модели АПХВ. Глобальные данные были загружены с сервера данных ЕЦСПП [100], с горизонтальным разрешением 1.125° . Из этой базы данных извлекается интересующий нас диоксид серы (SO_2), и затем используется в модели Enviro-HIRLAM.

Также была использована глобальная база данных антропогенных выбросов ECLIPSE v5a [101]. База данных была собрана из модели GAINS (The Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies), которая обеспечивает основу для анализа сокращения выбросов от источников загрязнения воздуха и парниковых газов. Данные ECLIPSE v5a носят глобальный охват с горизонтальным разрешением 0.5° и предоставляется в виде накопленной суммы в тысячу тонн загрязняющих веществ в год в каждой ячейке сетки. В модели Enviro-HIRLAM могут использоваться химические вещества как черный углерод (BC), органические вещества (OM), диоксид серы (SO_2) и др. Для каждого загрязняющего вещества, данные о выбросах соответствуют так называемым десяти кодом SNAP (Standard Nomenclature for Air Pollution), которые соответствуют различным категориям выбросов (таблица 5).

Таблица 5 – SNAP emission sectors

SNAP code	Sector
SNAP-1	Combustion in energy and transformation industries
SNAP-2	Non-industrial combustion plants
SNAP-3	Combustion in manufacturing industry
SNAP-4	Production processes
SNAP-5	Extraction and distribution of fossil fuels and geothermal energy
SNAP-6	Solvents and other product use
SNAP-7	Road transport
SNAP-8	Other mobile sources and machinery
SNAP-9	Waste treatment and disposal
SNAP-10	Agriculture

Интересующая область

Перед запуском расчета необходимо определить расчетную область (домен). Определение и создание новых доменов моделирования является начальным, подготовительным этапом для дальнейшего расчета файлов генерации климата для выбранного разрешения домена. В нашем исследовании был выбран моделируемый домен – K15 с горизонтальным разрешением 0.15 градусов. Параметры домена приведен в таблице 6. Наглядно охватываемая доменом территория представлена на рисунке 47.

Таблица 6 – Параметры домена K15 модели Enviro-HIRLAM

Описание параметров	K15
Горизонтальное разрешение в градусах	0.15
Количество ячеек по долготе	334
Количество ячеек по широте	148
Количество вертикальных уровней	40
Площадь, покрываемая доменом в км ²	11122200
Южная граница	25,495
Северная граница	47,545
Западная граница	0,495
Восточная граница	50,445
Полюс широты	-80,0
Полюс долготы	30,0

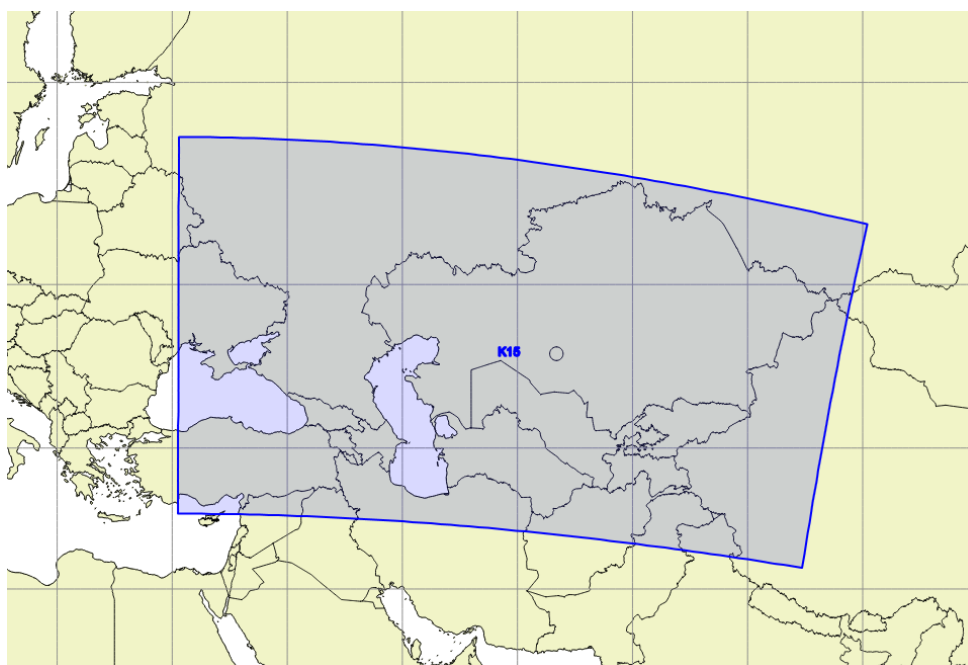


Рисунок 47 – Домен K15 модели Enviro-HIRLAM для территории Казахстана

После того, как расчет Enviro-HIRLAM-K15 был завершен, были получены результаты моделирования для территории Казахстана (как показано на

Рисунках 48-52, в качестве примеров). Рисунки представляют собой 2D поля пространственно-временной изменчивости - температуры воздуха (рисунок 48), атмосферное давление (рисунок 49), удельная влажность (рисунок 50), ветровые характеристики - скорость и направление (рисунок 51), а также концентрация диоксида серы (SO_2) (рисунок 52) - на высоте 32 метров над поверхностью Земли.

Моделируемые метеорологические параметры хорошо воспроизводятся по области модели, отражающие доминирующее синоптические атмосферные циркуляции в этом регионе, показывающие влияние горных районов в южном секторе области, лежащие в основе влияния засушливых районах и т.д. В частности, температура воздуха на территории Казахстана колеблется от -30°C до $+5^\circ\text{C}$ от Севера до Юга, из поля давления наглядно видно где расположены горные местности, удельная влажность на юге выше чем на севере страны, постоянный ветер в западном направлении наблюдаются в Восточном Казахстане и на территории Каспийского моря, SO_2 концентрации ясно показывают основные и доминирующие источники загрязнения в исследуемой области с упором на Казахстан и прилегающих к нему районов. В годовом масштабе, в этом географическом регионе, доминирующий атмосферный перенос загрязнения в западном направлении отчетливо виден в течение января месяца. Сравнительно более высокие уровни концентрации наблюдаются в непосредственной близости от основных источников, таких как «Балхашцветмет» (ранее известный как Балхашский горно-металлургический комбинат) - медеплавильное предприятие, расположенный на северном побережье озера Балхаш в городе Балхаш, ТОО "Павлодарский нефтехимический завод", Жезказганский горно-металлургический комбинат им. К. И. Сатпаева - казахстанское предприятие цветной металлургии, ТОО "PetroKazakhstan Oil Products" (ранее - Открытое акционерное общество (ОАО) "Шимкентнефтеоргсинтез") по сравнению с другими прилегающими территориями [102].

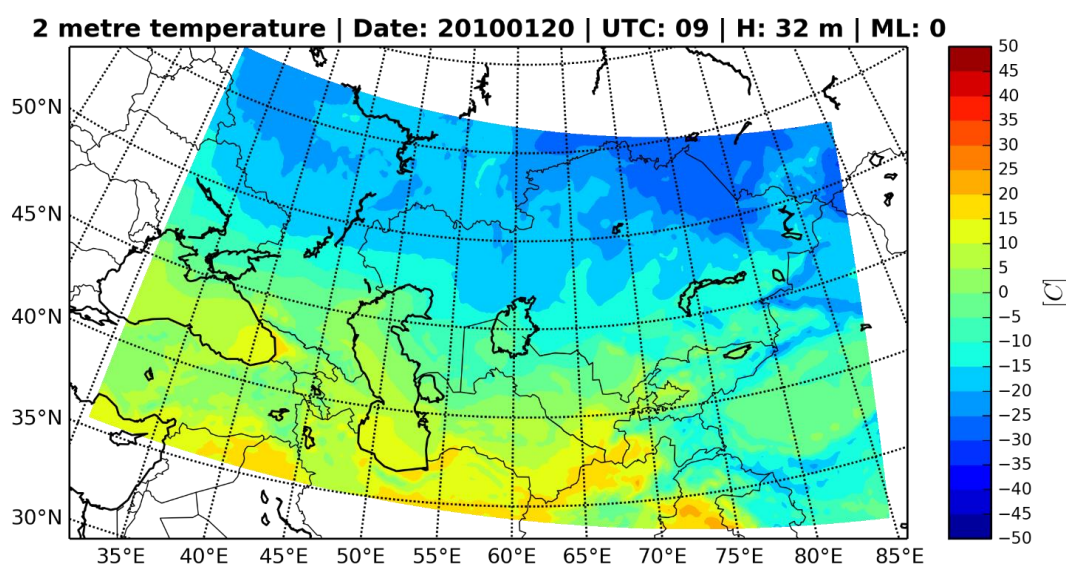


Рисунок 48 – Температура поверхности земли

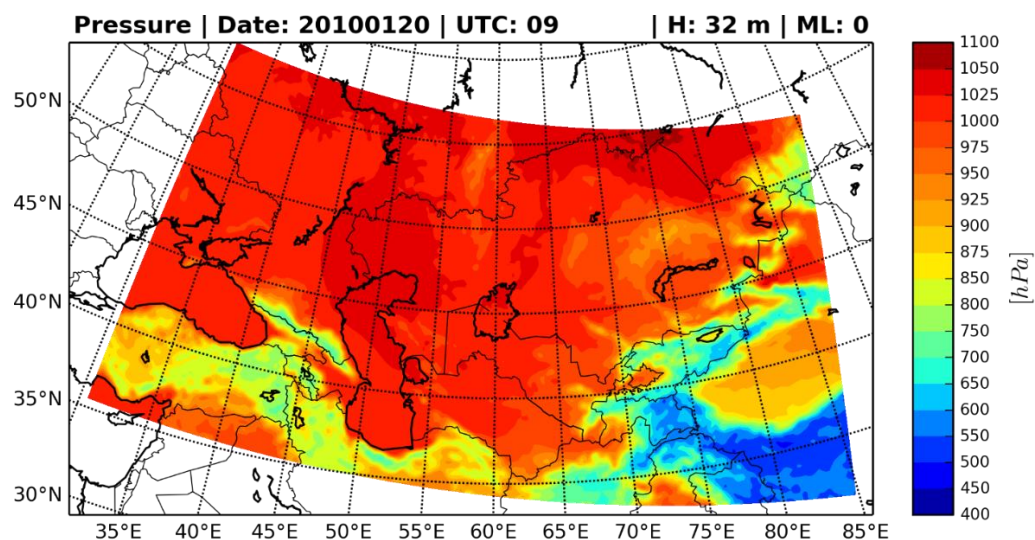


Рисунок 49 – Давление

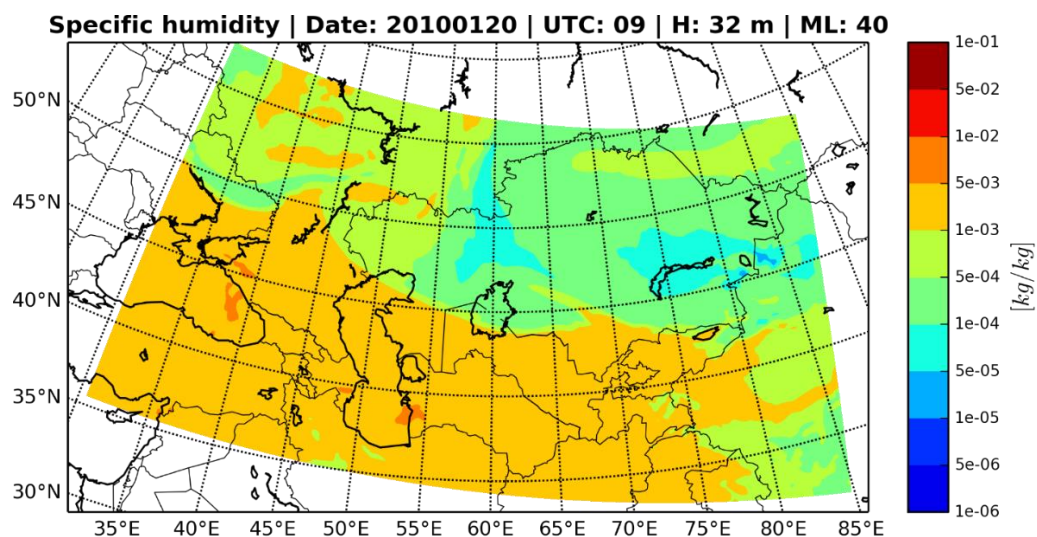


Рисунок 50 – Удельная влажность

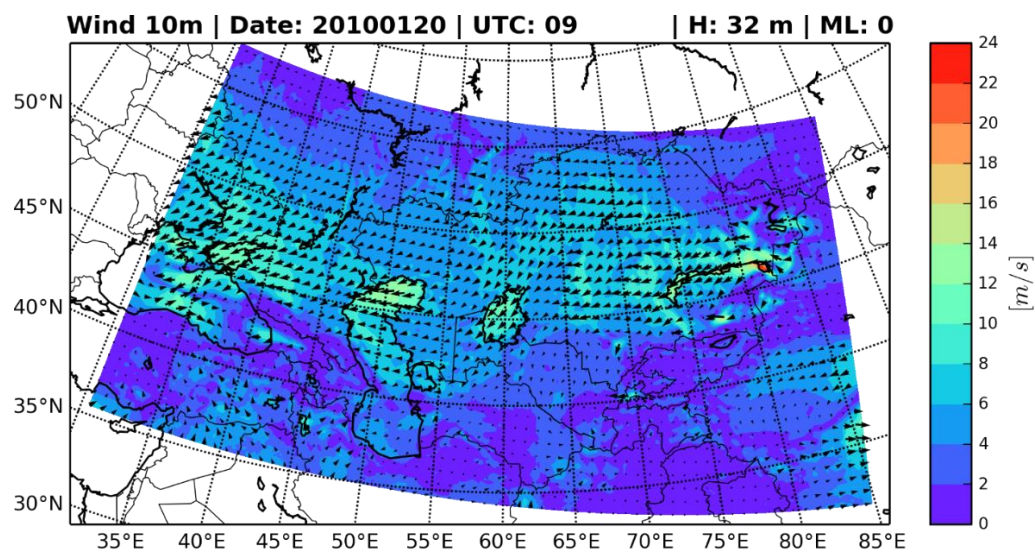


Рисунок 51 – Ветер, 10 метров над поверхностью земли

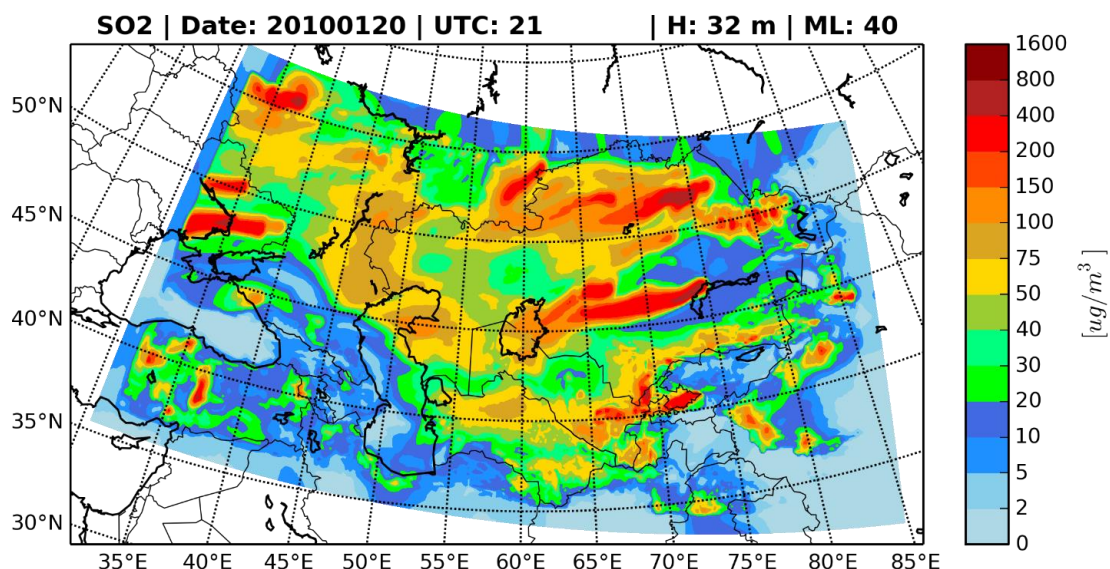


Рисунок 52 – Концентрация сернистого ангидрида (SO_2) без добавления дополнительного источника загрязнения

5.2 Моделирование переноса загрязняющих веществ при аварийных возгораниях нефтехранилищ

Значительный вклад в загрязнение атмосферы вносят металлургические заводы и нефтегазовая промышленность в основном при сжигании попутного нефтяного газа на факельных установках. Продукты сгорания нефтяного газа представляют собой достаточно токсичную смесь. Для высокосернистой нефти преобладающую роль в загрязнении играет сернистый ангидрид (SO_2). Кроме того, этот газ является одним из основных загрязнителей воздуха в выбросах тепловых станций, работающих на угле [103].

На сегодняшний день имеется 3 крупных НПЗ, суммарная мощность переработки которых составляет около 19,5 млн. тонн. Одним из источников выбросов большого количества загрязняющих веществ, в частности SO_2 , является Атырауская область Казахстана, где сосредоточена нефтегазовая и другие промышленные предприятия страны. Основной целью данной работы является анализ трансграничного атмосферного переноса и осаждения загрязняющих веществ из Атырауской области, а также оценка его воздействия на территории сопредельных государств. Это исследование посвящено изучению распространения сернистого ангидрида при авариях в резервуарах нефтехранилища, находящихся в Атырауской области Республики Казахстан. Эта область, расположенная на берегу Каспийского моря, является промышленно развитым нефтедобывающим регионом Казахстана. Для экспериментального расчета распространения сернистого ангидрида (SO_2) при аварийном выбросе на территории Казахстана мы выбрали Атырауский нефтеперерабатывающий завод. Завод был пущен в эксплуатацию 8 сентября 1945 года. Первой продукцией завода был автомобильный бензин. С середины 1999 года держателем контрольного пакета акций (86%) завода стало ЗАО «Казахойл», впоследствии - АО «КазМунайГаз» (рисунок 53).

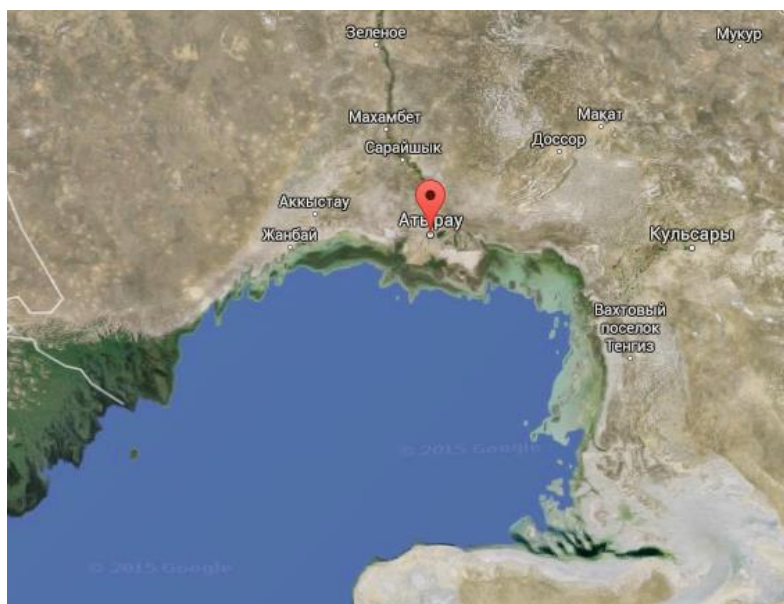


Рисунок 53 – Атырауский нефтеперерабатывающий завод

При сгорании нефтяных продуктов в атмосферу выбрасывается огромное количество токсичной смеси. Для высокосернистой нефти преобладающую роль в загрязнении играет сернистый ангидрид (SO_2). Основной целью данной работы является анализ атмосферного переноса и осаждения загрязняющих веществ при аварийном выбросе из Атырауской НПЗ, а также оценка его воздействия на территорию Казахстана и сопредельных государств.

Для добавления источника загрязнения в нашу расчетную модель нам необходимо знать координаты источника, дату выброса, длительность выброса и скорость выброса исследуемого химического вещества (в нашем случае SO_2). Смоделируем сценарий, при котором произошла авария и началось возгорание нефтяного резервуара с объемом 5000 м^3 . Предположим, что горение нефтяного продукта происходит по всей поверхности резервуара. Высота такого резервуара составляет около 11,9 метров, а площадь поверхности резервуара - 420 м^2 [104]. При горении нефтяного продукта с площадью 1 м^2 выделяется 405 кг/ч диоксид серы [105]. В итоге при возгорании резервуара скорость выброса SO_2 составляет 170100 кг/ч . Мы моделируем ситуацию, где продолжительность выброса будет 24 часа, следовательно в атмосфере будет выброшено $4082,4$ тонны диоксида серы.

Для моделирования атмосферных процессов и переноса загрязнения на территории Казахстана были выбраны следующие параметры:

- 1) расчетный период – с 17 по 26 января 2010 года;
- 2) момент аварии – 20 января 2010 года, в 00 часов по UTC;
- 3) длительность аварии – 24 часа
- 4) источник выброса – Атырауский НПЗ (широта: 47.0734, долгота: 51.9261)
- 5) скорость выброса – 170100 кг/ч
- 6) загрязняющее вещество – диоксид серы (SO_2)

После расчетов с добавлением источников выброса мы провели сравнительный анализ результатов с контрольным запуском и выявили

изменчивость концентрации SO_2 для выбранной территорий. Рисунок 54 показывает смоделированные поля концентрации SO_2 в 02 и 21 часов на 20 января 2010 года. На рисунке 55 представлен результат моделирования, отображающий распространение SO_2 в случае аварийного возгорания резервуара для хранения нефти за 2, 9, 21 и 30 часов после момента аварии. Как мы видим по результатам моделирования в выбранные нами даты преобладал восточный ветер и в результате чего ветер понес загрязнение на территории соседних государств. С самого начала до конца аварийного выброса облако загрязнения быстро расширяется на запад от источника и проходит над относительно плоской территорией Северных гор Кавказа и достигает Азовского моря к концу первого дня от начала выброса. Уровень концентрации достигает 150 мкг/м^3 в городе Астрахань, а в городах близ Азовского моря уровень достигает 40 мкг/м^3 . Облака концентрации также расширяется в северном и южном направлениях, достигая территорий Украины и Черного моря, но уровни концентрации здесь были ниже по сравнению с основным направлением атмосферного переноса [106].

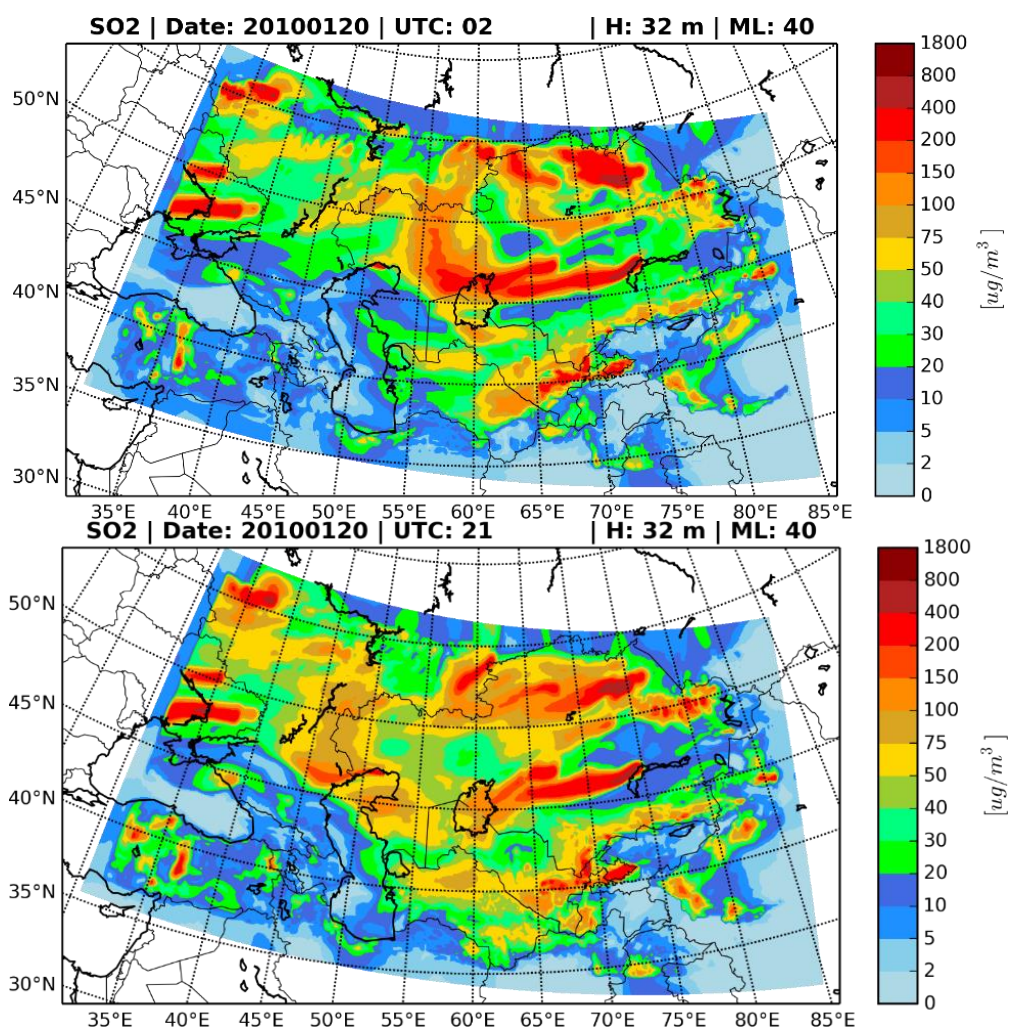


Рисунок 54 – Концентрация диоксида серы (SO_2) в случае возникновения аварий в нефтехранилище за 02 и 21 ч. на 20 января 2010 года

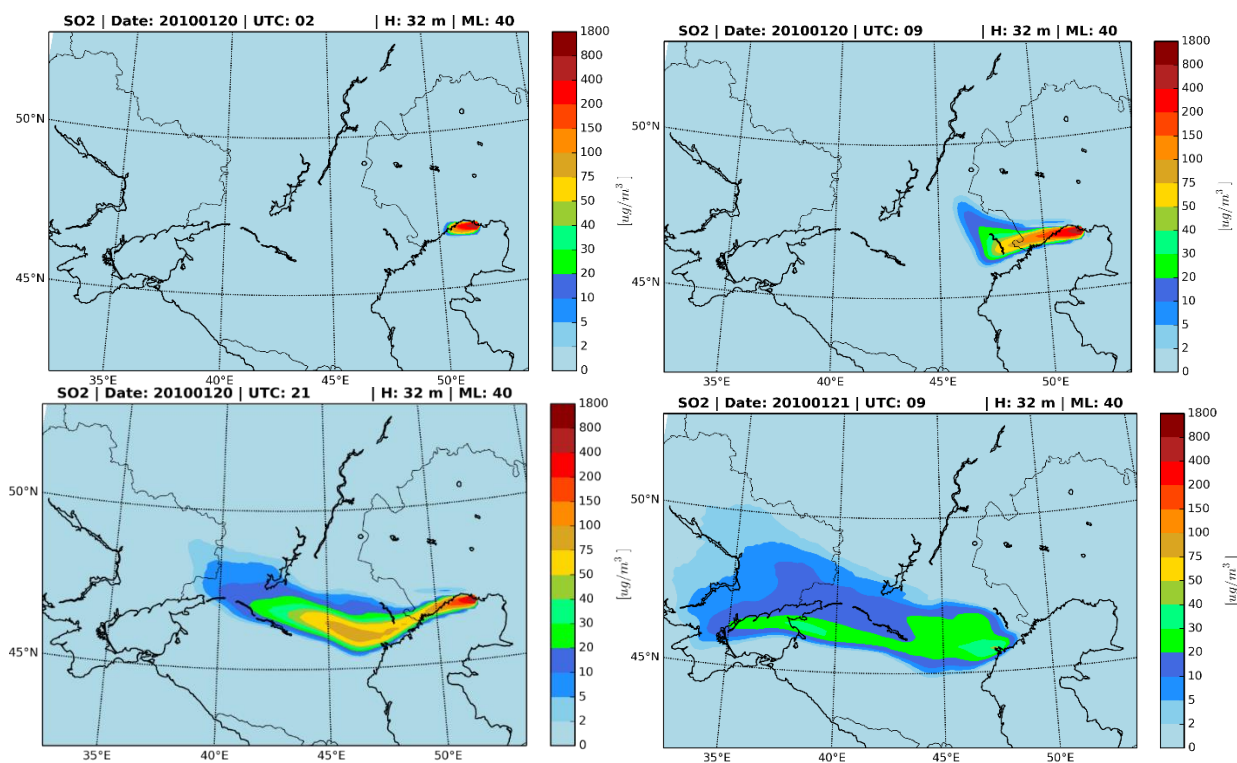


Рисунок 55 – Разница в концентрации диоксида серы (SO_2) между расчетами контрольного запуска и запуска с аварийным выбросом (на АНПЗ) для выбранных часов в течении 20-21 января 2010 года

5.3 Оценка влияния выпадения загрязняющих веществ с учетом плотности распределения населения

В данном разделе описывается проведенный анализ оценки влияния загрязняющих веществ на популяцию и построена карта, отображенная на Рисунке 56. Для построения такой карты была выбрана база данных плотности населения и объединена с усредненным накопленным значением концентрации диоксида серы после аварийного выброса из нефтеперерабатывающего завода в городе Атырау, описываемая в предыдущем разделе. Из рисунка 28 видим, что загрязнение распространилась на соседние государства, в частности на территорию России и Украины. На этом рисунке показано вся охватываемая территория загрязняющего облака, и уровень его влияния на население. Отображаемое поле влияния концентрации SO_2 на население охватывает период с 00 UTC 20 января по 22 UTC 22 января 2010 года. Как видно на рисунке 28, облако загрязнения с самого начала аварийного выброса до исчезновения с поля зрения охватила территорию от Каспийского моря на востоке до Черного моря на западе, и от гор Кавказа на юге до городов Волгоград в России и Киева в Украине. Наибольшее влияние как мы видим было нанесено населению городов Астрахань, Ростов-на-Дону и Мариуполь. Шкала была нормирована относительно максимального значения риска, и была принята как 100%. Этого значения достиг город Ростов-на-Дону. К шкале свыше 50 % также входят города как Астрахань, Мариуполь, Донецк и Севастополь. Остальные города ниже уровня 50% [107].

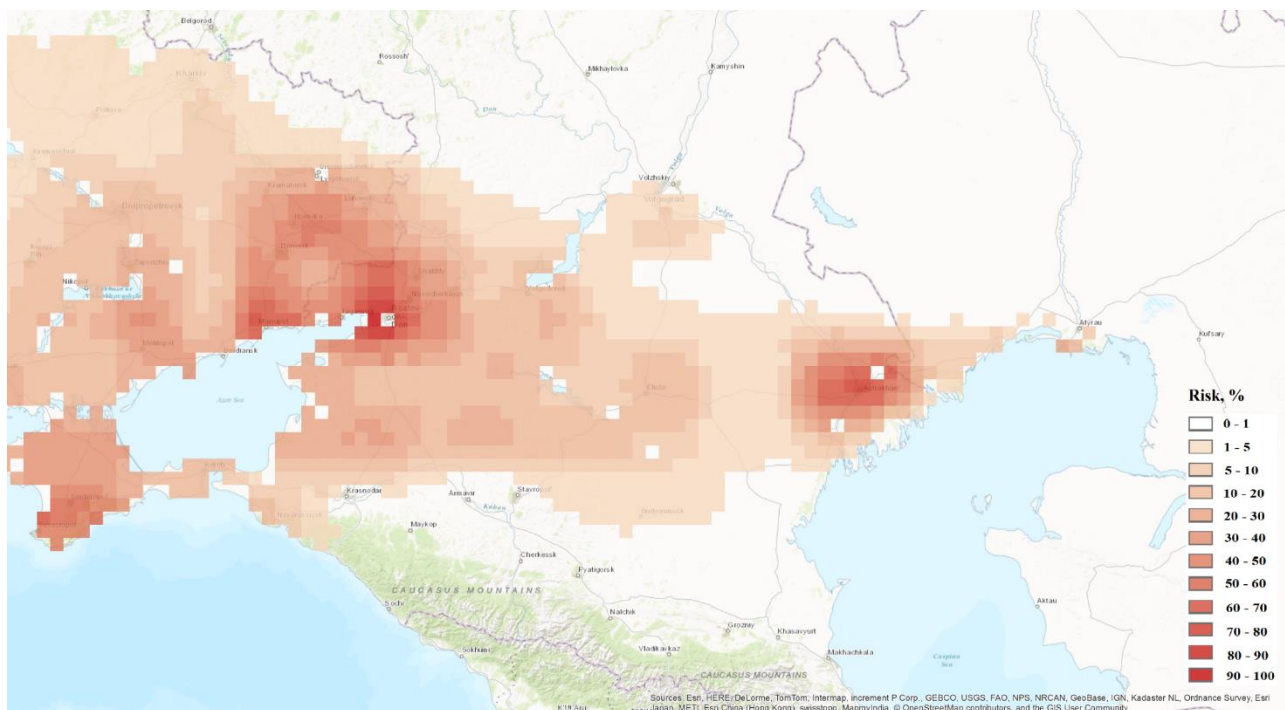


Рисунок 56 – Карта загрязнения атмосферы с учетом плотности распределения населения

5.4 Анализ концентрации диоксида серы (SO_2) в городах Казахстана

В этом разделе описывается анализ значения концентрации сернистого ангидрида (SO_2) в городах Казахстана с населением свыше 50 тыс. человек для периода с 17 по 26 января 2010 года. Так как горизонтальное разрешение моделирования 15 км, для точности определения значения в точке были интерполированы данные вокруг исследуемой местности. Интерполяция проводилась только вблизи точки, чтобы сократить время и память, затрагиваемое при расчете. Для этого использована 4 вида интерполяции: среднее ближайших соседей (average), линейное (linear), кубический сплайн (cubic) и сплайн 5-го порядка (quintic) (рисунок 57). И как результат выбиралось среднее значение этих 4-х методов интерполяции. На Рисунке 58 можно увидеть результаты интерполяции данных вокруг городов Казахстана.

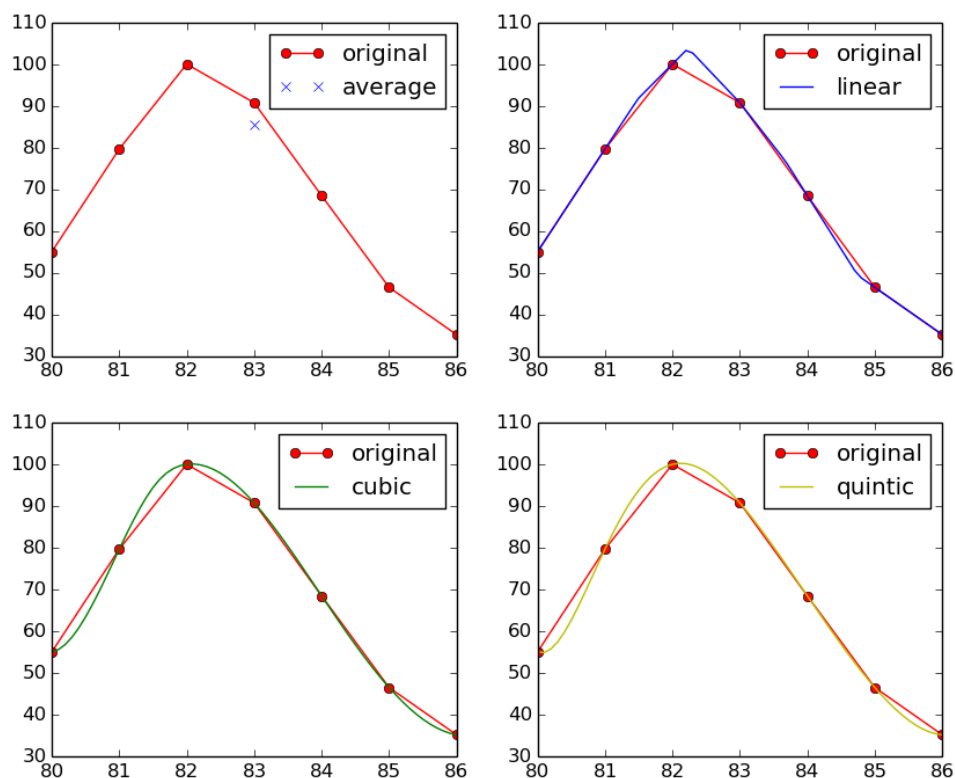


Рисунок 57 – Пример интерполяции различными методами

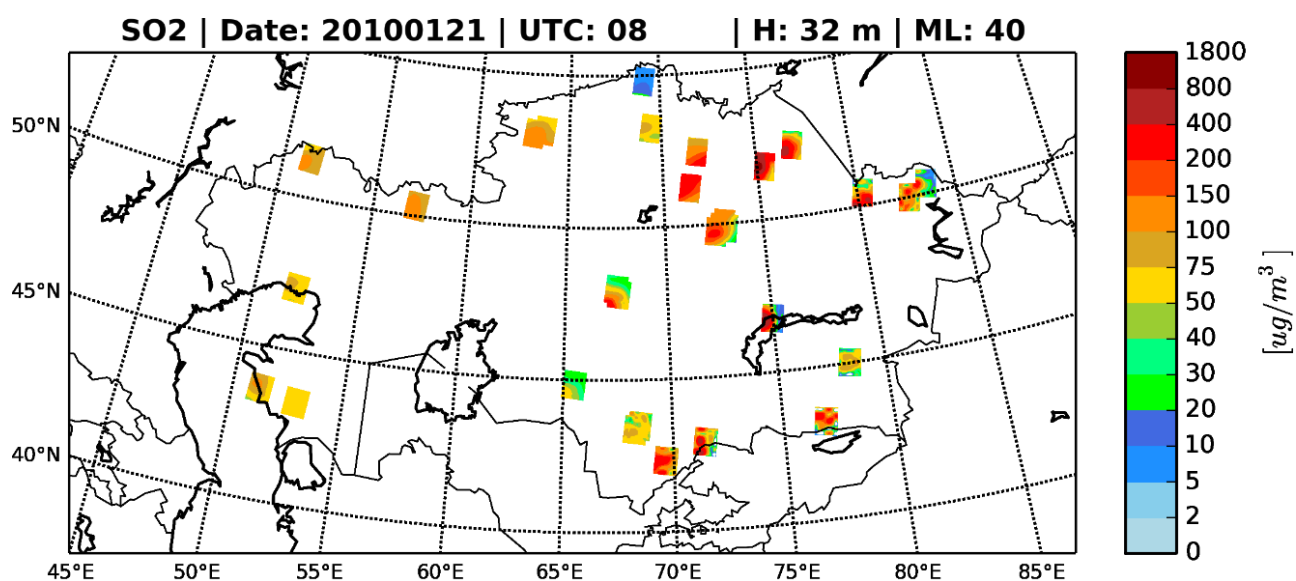


Рисунок 58 – Интерполированные данные SO₂ для городов Казахстана

Используя полученные результаты моделирования, описанные в предыдущем разделе, построены временные ряды концентрации SO₂ для 30 городов Казахстана. ПДК (предельно допустимая концентрация) в атмосферном воздухе для максимально-разовой дозы не должна превышать — 0,5 мг/м³, а среднесуточная — 0,05 мг/м³. Как видно на рисунке 59 максимально-разовую концентрацию в отметку 500 мкг/м³, которая отмечена красной пунктирной

линией, превысили несколько городов в течение исследуемого периода. Это такие города как Балхаш, Экибастуз, Павлодар, Шахтинск, Сарань, Караганда и Алматы. Самые низкие концентрации были получены для 5 городов - Петропавловск, Талдыкорган, Туркестан, Жанаозен и Кентау, где концентрация не превышала 100 мкг/м³. Как видно из временного ряда, уровни концентрации существенно изменялись в течение исследуемого периода. Такая изменчивость зависит от уровня выбросов, от расположения источников загрязнения, от преобладающего направления ветра, атмосферных потоков и т.д.

На рисунке 60 представлен дневной цикл для тех же городов и как видим Экибастуз и Балхаш в основном превышают ПДК. Для промышленного города Экибастуз, уровень концентрации все время выше 400 мкг/м³ для суточного цикла. Уровень ниже чем 500 мкг/м³ был в течении 04-09 ч. и выше 500 мкг/м³ в течении остальной части дня. Абсолютный максимум 650 мкг/м³ был зарегистрирован в 19 часов. Для города Балхаш, уровень концентрации всегда был выше 290 мкг/м³ для суточного цикла. Уровень концентрации был ниже чем 500 мкг/м³ в течении 02-15 ч. и превышала отметку в остальной части дня. Абсолютный максимум значения 690 мкг/м³ был достигнут в 22 часа. На суточном цикле, наименьшие концентрации среди анализируемых были замечены в 5 городах - Петропавловск, Талдыкорган, Туркестан, Жанаозен и Кентау. Они не достигли уровня 65 мкг/м³ [108].

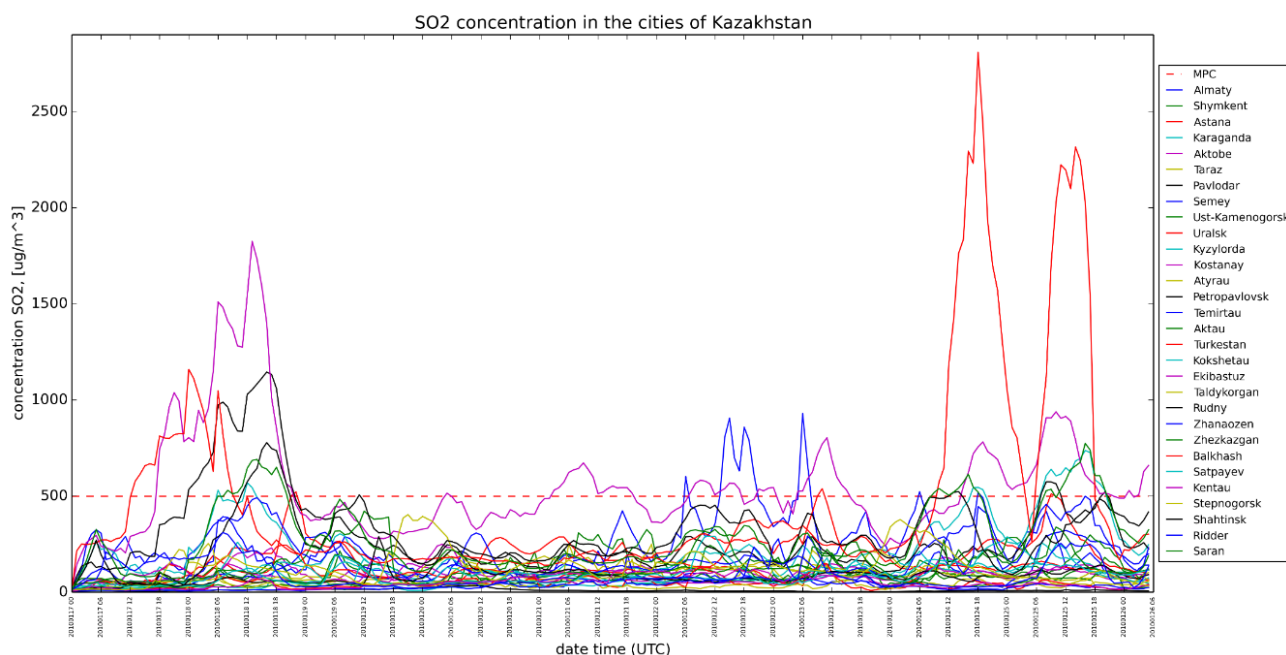


Рисунок 59 – Временной ряд концентрации SO₂ для городов Казахстана

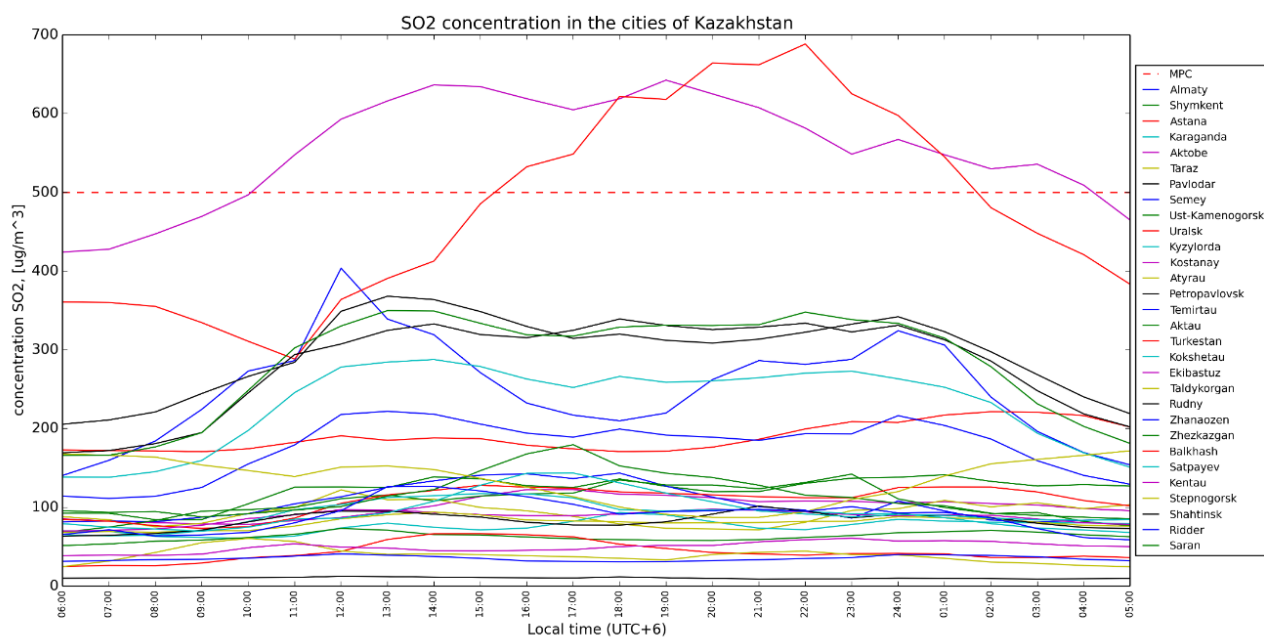


Рисунок 60 – Суточный цикл концентрации SO_2 для городов Казахстана

Выводы по пятому разделу

В данной главе диссертационной работы проводилось исследование сценарии аварийного выброса загрязняющих веществ, которое осуществлялось путем анализа атмосферного переноса, дисперсии и осаждения загрязнений с использованием онлайн интегрированной модели метеорологии, химии и аэрозолей Eпvigo-HIRLAM, адаптированная и настроенная для территории Казахстана.

В результате получены пространственно-временные поля концентрации диоксида серы (SO_2), с временным шагом 1 час на расчетный период с 17 по 26 января 2010 года. Данные были визуализированы, что дало возможность построить карты распространения и уровней загрязнения на исследуемой территории. В случае аварийного выброса с Атырауского НПЗ облако дыма достигло Азовского моря на западе от источника, и до гор Кавказа на юге, также загрязнение настигло такие города как Ростов-на-Дону, Волгоград и Киев. Помимо аварийного выброса проанализировали концентрационные поля диоксида серы и провели оценку уровня загрязняющего вещества для городов Казахстана с населением свыше 50 тыс. Были идентифицированы наиболее и наименее загрязненные города из оценки временных рядов смоделированной концентрации диоксида серы. Наиболее загрязненными городами оказались Балхаш и Екибастуз, а наименьшими Петропавловск и Талдыкорган.

Модель рассчитывает множество метеорологических и химических параметров, что позволяет проводить анализ других метеопараметров и загрязняющих веществ, которые не были отображены в этой работе. Модель впервые была использована для территории Казахстана, и в будущем планируется продолжить использование этой модели для территории нашей страны в других научно-исследовательских работах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задачи, связанные с экологией, требуют создания геоинформационных систем, предназначенных для хранения, обработки и визуализации пространственно-распределённых временных рядов различных исследований. Цель данной работы заключалась в том, чтобы проанализировать и обосновать особенности использования технологий ГИС в экологических исследованиях и создать единую геоинформационную платформу с дружественным интерфейсом для проведения расчетов, в частности для оценки состояния территории от воздействия нефтяного разлива, основанные на теории рисков, статистических методах обработки данных и применения моделей визуализации информации.

В ходе исследования был проведен обзор работ по оценке экологических рисков и описаны особенности Каспийского моря, которые нужно учитывать при разработке информационной модели Каспия. Так как в основе стохастической модели оценки рисков лежит прогноз распространения нефтяного разлива, были приведены существующие модели расчета морских течений и расчета распространения нефти.

Атмосфера как наиболее изменчивая среда и как основной фактор, формирующий гидродинамику мелководного Северного Каспия, была выбрана в качестве генератора случайных процессов. В качестве источника этих данных была выбрана база данных ERA Interim, созданная Европейским центром среднесрочных прогнозов (ECMWF).

Особое внимание было уделено биоте как основной жертве возможной аварии. Для построения карт зон уязвимости различных биологических сообществ был собран и приведен к единой картографической основе огромный и уникальный объем информации о биоразнообразии и зонах обитания многих видов биоты Северного Каспия.

Приземные поля ветра, давления и температуры для каждой метеоситуации были использованы для расчета соответствующих полей морских течений. Многократный расчет с перебором метеоситуаций дал возможность сформировать множество гидродинамических ситуаций. Для решения этой задачи была выполнена адаптация гидродинамической модели Датского гидрологического института MIKE 21 HD к условиям Северного Каспия.

Не менее сложной задачей было построение множества ситуаций нефтяного загрязнения моря при заданных параметрах аварии – мощности, локализации, длительности. В качестве расчетного модуля была использована модель MIKE 21 OS (Oil Spill), в которой учитываются физико-химические свойства нефти и такие важные процессы, как перенос, испарение, эмульсификация, осаждение нефти и ее растекание по поверхности моря.

В результате проделанной работы были подобраны наиболее подходящие значения параметров в моделях расчетов гидродинамики и разлива нефти. Создана система генерации конфигурационных файлов для расчетов гидродинамики и разлива нефти (модели HD и OS). Разработано программное обеспечение по автоматизации многократного запуска моделей на расчеты в MIKE 21.

Одним из необходимых и важных результатов данной работы является рисковое картирование нефтяного загрязнения моря выше предельно допустимой концентрации (ПДК). Итоговым этапом является разработка расчетного модуля рискового картирования негативного воздействия нефтяного загрязнения на биологические сообщества. В результате были разработаны модули, реализующие алгоритмы расчета карты риска нефтяного загрязнения моря и карты риска поражения биоты.

Модули расчета реализованы с использованием программных и аппаратных средств высокопроизводительных вычислений, что позволил нам одолеть временные ограничения для получения результатов. Для взаимодействия модуля с системой разработаны веб-сервисы для управления запуском расчетов риска. Автоматизированная система рискового картирования обеспечивает оперативную обработку данных, хранение данных, возможность произведения многократных расчетов без промежуточного участия специалиста.

В добавок к данному исследованию, были проведены работы по анализу атмосферного переноса, дисперсии и осаждения загрязнений с помощью онлайн интегрированной модели Enviro-HIRLAM, адаптированная и настроенная для территории Казахстана. Проведена оценка влияния загрязняющих веществ при аварийном возгорании нефтехранилища с учетом плотности распределения населения. Также, были проанализированы концентрационные поля диоксида серы для оценки уровня загрязнения на основных населенных городах Казахстана.

Используя предложенный в данной работе сервис-ориентированный подход, подобную атмосферную модель также можно интегрировать в разработанную платформу без глубокого вмешательства в архитектуру системы и использовать для исследования экологических задач.

По итогам данной диссертационной работы были получены следующие результаты:

- Реализован алгоритм численной реализации вероятностной оценки риска загрязнения моря при аварийном разливе нефти.
- Реализован алгоритм численной реализации вероятностной оценки риска поражения биоты при аварийном разливе нефти.
- Реализован параллельный алгоритм построения рисковых карт для оптимизации времени расчета и анализа результатов.
- Разработана сервис ориентированная архитектура геоинформационной системы для взаимодействия расчетных модулей и управления задачами.
- Разработана веб-ориентированная геоинформационная система для запуска расчетов и отображения результатов на карте, в виде единого интерфейса с ориентацией на профессионального пользователя.
- Проведены серии численных экспериментов, подтверждающие адекватность разработанной модели.

Основная цель создание новой, расширяемой и гибкой геоинформационной платформы, предназначенная для специалистов, занимающихся оценкой экологических рисков окружающей среды была выполнена.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Швыряев А.А., Меньшиков В.В. Оценка риска воздействия загрязнения атмосферы в исследуемом регионе: учебное пособие для вузов. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 124 с.
- 2 Елисеева М.А., Никишин В.В. Прикладные задачи моделирования технических рисков АЭС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – С. 117-126.
- 3 Plattner Th., Plapp T., Hebel B. Integrating public risk perception into formal natural hazard risk assessment // Natural Hazards Earth System Sciences. – 2006. – P. 471-483.
- 4 Van Hauwermeiren M., Vose D. and Vanden B Bossche S. A Compendium of Distributions (2nd ed). –Vose Software [ebook]. – Ghent, 2012.
- 5 Vose D. Risk analysis: a quantitative guide // John Wiley & Sons, Ltd. 3rd ed. Chichester. – 2007. – 729 p.
- 6 Pastorok R. et al. Role of Ecological Modeling in Risk Assessment // Human and Ecological Risk Assessment. – 2003. – Vol. 9, №. 4. – P. 939-972.
- 7 Яковлев В. В. Экологическая безопасность, оценка риска. – СПб.: СПбГПУ, 2007. – 399 с.
- 8 Шмаль А. Г. Факторы экологической опасности и экологические риски. – Броницы: Изд-во МП «ИКЦ БНТВ», 2010. – 192 с.
- 9 Dale V., Meyer J. Advice to EPA on Advancing the Science and Application of Ecological Risk Assessment in Environmental Decision Making: A Report of the U.S. EPA Science Advisory Board / U.S. Environmental Protection Agency, Office of the Administrator, Science Advisory Board. – 2007. – 163 p.
- 10 Меншуткин В. В. Математическое моделирование популяций и сообществ водных животных. – Л.: Наука, 1971.
- 11 Меншуткин В. В. Модель экологической системы пелагиали Тихого океана. // Океанология. – 1979. – Т. 19, №2. – С. 318-325.
- 12 Беляев В. И., Лепин А. И., Макаров О. М., Петипа Т. С. Математическая модель пелагической экосистемы Черного моря / Рукопись деп. в ВИНТИ №3480 – 75. – М.: – 1975.
- 13 Беляев В. И. Модель шельфовой экосистемы для оценки ее потенциальной биопродуктивности. // Системный анализ и моделирование процессов на шельфе Черного моря. – Севастополь, 1983. – С. 7-18.
- 14 Ворович И. И., Горелов А. С. Рациональное использование водных ресурсов бассейна Азовского моря. Математические модели. – М.: Наука, 1981. – 359 с.
- 15 Домбровский Ю. А., Селютин В. В., Эпштейн Л. В. Применение имитационного моделирования для экологических последствий хозяйственного освоения района озера Байкал. // Проблемы развития и размещения производительных сил Сибири. – Новосибирск, 1976.
- 16 Свирежев Ю. М., Елизаров Е. Я. Математическое моделирование биологических систем. // Проблемы космической биологии. – М.: Наука, 1972. – Вып. 20.

- 17 Сергеев Ю. Н. Проблема математического моделирования многокомпонентной физико-биологической системы моря. // Вестник Ленингр. ун-та. Сер. геол.-географ, 1972. – №24. – С. 114-125.
- 18 Алексеев В. В., Федоров В. Д. Теоретическая экология: сборник научных трудов. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 200 с.
- 19 Ардабьева А. Г., Барабашева Ю. М., Бродский Л. И., Девяткова Г. Н., Катунин Д. Н., Кольцова Т. И., Курашова Е. К., Левшакова В. Д., Осадчих В. Ф., Полякова Т. В. Экологические основания моделирования планктонного сообщества Северного Каспия. // Теоретическая экология. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – С. 85–105.
- 20 Барабашева Ю. М., Бродский Л. И., Девяткова Г. Н. Имитационная модель динамики планктонного сообщества Северного Каспия. // Теоретическая экология. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – С. 121-132.
- 21 Барабашева Ю. М., Бродский Л. И., Девяткова Г. Н. Об оценивании параметров точечной модели водной экосистемы. // Теоретическая экология. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – С. 105-110.
- 22 Зацепя С.Н., Ивченко А. А., Журавель В.И., Солбаков В.В., Становой В.В. Анализ риска распространения аварийных разливов нефти на примере Обской губы // Арктика: экология и экономика. – 2014. – 3(15). – С. 30-45.
- 23 Овсиенко С.Н., Зацепя С.Н., Ивченко А.А. Математическое моделирование как элемент информационной поддержки принятия решения при выборе стратегии защиты морской среды от нефтяного загрязнения. // Труды ГОИН: вып. 213. – М.: Гидрометеиздат, 2011.
- 24 Овсиенко С.Н., Зацепя С.Н., Ивченко А.А. Моделирование разливов нефти и оценка риска воздействия на окружающую среду. // Труды ГОИН: вып. 209. – М.: Гидрометеиздат, 2005.
- 25 Kochergin I.E., Bogdanovsky A.A., Budaeva V.D. et al. Modeling of oil spills for the shelf conditions of northeastern Sakhalin // PICES Scientific Report. – 1999. – V. 12. – 123 p.
- 26 Skognes K., Johansen O. Statmap – a 3-dimensional model for oil spill risk assessment // Environmental Modelling & Software. – 2004. – V.19. – P. 727-737.
- 27 Ovsienko S. An updated assessment of the risk for oil spills in the Baltic Sea area // Fifth meeting of the Sea-based Pollution Group HELCOM SEA. – Turku, 2002. – 77 p.
- 28 Журавель В.И., Журавель И.В., Зацепя С.Н., Зеленко А.А., Ивченко А.А., Кулаков М.Ю., Лобов А.Л., Попов С.К., Реснянский Ю.Д., Светов С.А., Смоляницкий В.М., Солбаков В.В., Становой В.В. Моделирование поведения возможных разливов нефти при эксплуатации МЛСП «Приразломная». Оценка возможности ликвидации чрезвычайных ситуаций, связанных с разливами нефти. // Отчет о научно-исследовательской работе. – М.: 2012.
- 29 Акимов В.А., Бодриков О. В., Ульянов С. В. Методология и основные практические результаты работ по комплексной оценке риска от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера для населения. // Вопросы анализа риска. – 2000. – № 3-4. – С. 18-57.

- 30 Sensitivity mapping for oil spill response. // IMO, IPIECA, OGP. – London, 2012. – 36 p.
- 31 Gundlach E.R., Hayes M. O. Vulnerability of coastal environments to oil spill impacts // Marine Technology Society Journal. – 1978. – V. 4. – P. 18-27.
- 32 Kleissen F., Arentz L., Reed M., Johansen O. Marine Environmental Risk Assessment System: conceptual design and preliminary demonstration for the Dutch Continental Shelf / Delft Hydraulics Report. – 2007. – Z4339.
- 33 Offringa H., Lahr J., Safety at Sea. An integrated approach to map ecologically vulnerable areas in marine waters in the Netherlands (V-maps) / Report №A09. Revision №4. Centre for Ecosystem Studies. – 2007. – 93 p.
- 34 Ihaksi T., Kokkonen T., Helle I., Jolma A., Lecklin T., Combining conservation value, vulnerability, and effectiveness of mitigation actions in spatial conservation decisions: an application to coastal oil spill combating. // Env. Management. – 2011. – Vol. 47, №. 2. – P. 802-813.
- 35 <http://chelovek-online.ru/> 10.02.2016
- 36 Сулейменов Б. Охрана водных ресурсов // Экологический курьер INT. – 2006.
- 37 Нестерова М.П. Проблема химического загрязнения вод Мирового океана Т. 8. Методы и средства борьбы с нефтяным загрязнением вод Мирового океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 208 с.
- 38 Израэль Ю.А., Цибань А.В. Антропогенная экология океана. – М.: Флинта: Наука, 2009. – 529 с.
- 39 <http://kt.kz/index.php> 10.02.2015
- 40 Закарин Э. А., Балакай Л. А., Дедова Т. В., Ким Д. К. Разработка системы рискового картирования поражения животного и растительного мира на Северном Каспии. // Международный союз ученых «Наука. Технологии. Производство». – 2015. – № VI (10). – С. 42-46.
- 41 Закарин Э. А., Ким Д. К, Вероятностная модель риска поражения биоты при аварийном загрязнении окружающей среды. // Сибирский Журнал Индустриальной Математики. – 2013. – Т. 16, №3. – С. 95-105.
- 42 Дедова Т.В., Ким Д.К., Кобегенова С.С., Адырбекова К.Б., Бостанбеков К.А. Геоинформационная модель биоразнообразия и уязвимости биоты Северного Каспия. // Геоинформатика. – М., 2016. – №3. – С. 55-63.
- 43 <http://www.nauticalcharts.noaa.gov> 21.02.2016
- 44 Ивкина Н.И., Строева Т.П. Усовершенствование схемы прогноза неперiodических колебаний уровня воды Каспийского моря на основе учета элементов водного баланса // Гидрометеорология и экология. – 2003. – № 3. – С. 25-32.
- 45 Ивкина Н.И. Метод исследования и прогнозирования сгонно-нагонных явлений в казахстанской части Каспийского моря с учетом изменяющихся воднобалансовых характеристик // Материалы международной научной конференции «Изменения климата и водного баланса Каспийского региона». – Астрахань, 2011. – С. 37-42.

- 46 Закарин Э.А., Балакай Л.А., Дедова Т.В. Моделирования гидродинамики Северного Каспия // Труды междунаро. науч. Конф. «Экстремальные гидрологические события в Арало-Каспийском регионе». – М.: 2006. – 544 с.
- 47 Балакай Л.А., Дедова Т.В. Моделирование гидродинамики Северного Каспия // Российско-Казахстанский сборник научных трудов. – М: ООО «Центр информационных технологий в недропользовании», 2007. – С. 52-66
- 48 MIKE 21 Flow Model. Hydrodynamic Model / Scientific documentation. MIKE by DHI. – 2014. – 60 p.
- 49 MIKE 21 Flow Model. Hydrodynamic Module / User Guide. – MIKE by DHI. – 2014. – 130 p.
- 50 Надиров Н.К. Нефть и газ Казахстана: В 2-х частях. Часть 1, Часть 2. – Алматы: Гылым, 1995. – 316 и 396 с.
- 51 MIKE 21 & MIKE 3 PA/SA. Particle Analysis and Oil Spill Analysis Module / User Guide. MIKE by DHI. – 2008. – 108 p.
- 52 MIKE 21/3 Oil Spill. Oil Spill Model / User Guide. – MIKE by DHI. – 2014. – 52 p.
- 53 Gardiner, C.W., Handbook of stochastic methods for Physics Chemistry and Natural Science. // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2009. – 447 p.
- 54 Kloeden P.E., Platen E. Numerical solution of stochastic differential equations. // Berlin: Springer-Verlag, Third corrected printing. – 1999. – 636 p.
- 55 Mackay D., Buist I., Mascaraenhas R., Paterson S. Oil spill processes and models: Report to Environment Protection Service. // Ottawa: University of Toronto, 1980. – № EE-8. – 120 p.
- 56 Betancourt F., A. Palacio, and A. Rodriguez. Effects of the Mass Transfer Process in Oil Spill. // American Journal of Applied Science. – 2005. – № 2. – P. 939-946.
- 57 Reed, M. The physical fates component of the natural resource damage assessment model system. // Oil and Chemical Pollution. – 1989. – № 5. – P. 99-123.
- 58 Xie, H., Yapa P. D., Nakata K. Modeling emulsification after an oil spill in the sea. // Journal of Marine Systems. – 2007. – № 68. – P. 489-506.
- 59 Sebastião, P., and C. Guedes Soares, Modeling the fate of oil spills at sea. // Spill Science & Technology Bulletin. – 1995. – № 2. – P. 121-131.
- 60 Mackay, D., and W. Zagorski. Water-in-oil emulsions: a stability hypothesis. // Proceedings of the Fifth Annual Arctic Marine Oil spill Program Technical Seminar. – 1982. – P. 61-74.
- 61 Delvigne, G., and C. Sweeney. Natural dispersion of oil. // Oil and Chemical Pollution. – 1988. – № 4. – P. 281-310.
- 62 French-McCay, D. P. Oil spill impact modeling: Development and validation. // Environmental Toxicology and Chemistry. – 2004. – № 23. – P. 2441-2456.
- 63 Muhamedyev R.I., Giyenko A.D., Pyagai V.T., Bostanbekov K.A. Premises for the creation of renewable energy sources GIS monitoring // Proceedings of 8th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies - AICT2014. – Astana, 2014. – P.398-402.
- 64 <http://mapserver.org> 05.10.2014
- 65 <http://mapfish.org> 05.10.2014

- 66 <http://geomixer.ru> 05.10.2014
- 67 <http://esri.com> 05.10.2014
- 68 <http://apps.ecmwf.int> 01.04.2013
- 69 MIKE 21 SDK User Guide. DFS file system, PFS file system / MIKE by DHI. – 2017. – 62 p.
- 70 <https://software.ecmwf.int/wiki/display/GRIB> 01.04.2013
- 71 Бостанбеков К.А., Балакай Л.А. Преобразование метеопараметров из формата GRIB в форматы, требуемые для моделирования в ПО MIKE 21 и визуализации в ГИС // Вестник ПГУ серия «Энергетическая». – Павлодар, 2017. – №1 – С. 62-70.
- 72 Коноплёва И.В., Ходоревская Р.П., Романов А.А. Распределение и качественная структура популяции русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii* в Каспийском море. // Вопросы рыболовства. – 2007. – Т.8. №4(32). – С.641–652.
- 73 Богуцкая Н.Г., Кияшко П.В., Насека А.М., Орлова М.И. Определитель рыб и беспозвоночных Каспийского моря. // Рыбы и моллюски – СПб.; М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. – Т.1. – 543 с.
- 74 Казанчеев Е.Н. Рыбы Каспийского моря (определитель). – М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1981. – 168 с.
- 75 Abdoli A., Naderi M. Biodiversity of Fishes of the Southern Basin of the Caspian Sea. // Tehran: Abzian Scientific Publications. – 2009. – 243 p.
- 76 Рагимов Д.Б. Видовой состав, биология, и запасы бычковых у западного побережья Среднего и Южного Каспия: Автореф. дис. канд. биол. наук. – Баку: Ин-т зоологии АН Азерб. ССР, 1966. – 20 с.
- 77 Рагимов Д.Б. Бычковые рыбы Каспийского моря (систематика, экология, значение): Автореф. дис. докт. биол. наук. – Л.: ЛГУ, 1988. – 32 с.
- 78 Щур Л.А. О соотношении хлорофилла «а» и биомассы фитопланктона. // Материалы международной научной конференции. – Томск, 2001.
- 79 <http://asascience.com/software/oilmap/> 09.06.2015
- 80 King B., F.McAllister, G. Hubbert. Data requirements for calibration and validation of the spill model OILMAP. // In, Marine Meteorology and Related Oceanographic Activities. WMO Report №. 44. MARPOLSER 98 Proceedings Vol. 1 – Research Papers. WMO/TD – №. 959. – P. 35-52.
- 81 Applied Science Associates, Inc. (ASA). Technical Manual, OILMAP for Windows, Applied Science Associates, Inc., Narragansett, RI. – 2004.
- 82 Ovsienko, S., Zatsepa, S., Ivchenko, A., Study and Modeling of Behavior and Spreading of Oil in Cold Water and in Ice Conditions. // 15th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Espoo. – Finland, 1999.
- 83 R. Miranda, F. Braunschweig, P. Leitão, R. Neves, F. Martins, A. Santos MOHID 2000-A coastal integrated object oriented model. Hydrosoft 2000, 2007.
- 84 Braunschweig, F., P. Chambel, L. Fernandes, P. Pina, and R. Neves,. The object-oriented design of the integrated modelling system MOHID. // Computational Methods in Water Resources International Conference, Chapel Hill. – North Carolina, 2004.
- 85 <http://www.mohid.com> 09.06.2015

86 Joseph P. Spruce, Callie Hall, Vicki Zaroni, Slawomir Blonski, Eurico D'Sa, Lee Estep, Donald Holland, Roxzana F. Moore, Mary Pagnutti, Gregory Terrie, Decision Support Tool Evaluation Report for General NOAA Oil Modeling Environment (GNOME) Version 2.0/ DST Evaluation Report. NASA ESA. – 2004. – SWR C05C-SE15-05. – 65 p.

87 Beegle-Krause C. J. General NOAA oil modeling environment (GNOME): A new spill trajectory model // International Oil Spill Conference. – 2001. – P. 865-871.

88 NOAA, GNOME / User's Manual, NOAA ORR HAZMAT Response Division. – 2002. – 91 p.

89 Dominicis De M., Pinardi N., Zodiatis G., Lardner R. "MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting – Part 1: Theory". Geosci. Model Dev., 6. – 2013. – P. 1851-1869.

90 Dominicis De M., Pinardi N., Zodiatis G., Archetti R. "MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting – Part 2: Numerical simulations and validations". Geosci. Model Dev., 6. – 2013. – P. 1871-1888.

91 Bostanbekov K.A., Nurseitov D.B., Kim D.K. Risk Assessment Model of Technogenic Pollution of the Environment from Oil Spill in the Northern Caspian Sea // International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology. – Padang, 2018. – Vol.8, No.1. – P. 37-43.

92 Бостанбеков К.А., Зейнуллина А.А. Архитектура ГИС системы для рискованного картирования поражения морской биоты при аварийном разливе нефти // Вестник ЕНУ серия «Естественно-технические науки». – Астана, 2017. – №4 II часть. – С. 256-260.

93 Bostanbekov K.A., Jamalov J.K., Kim D.K., Nurseitov D.B., Tursunov I.E., Zakarin E.A., Zaurbekov D.L. Integrated workflow-based system for Risk Mapping of Oil Spills with Using High Performance Cluster // International Journal of New Computer Architectures and their Applications (IJNCAA): The Society of Digital Information and Wireless Communications. – 2013. – № 3(4) – P. 115-131.

94 Bostanbekov K.A., Jamalov J.K., Kim D.K., Nurseitov D.B., Tursunov I.E., Zakarin E.A., Zaurbekov D.L. Service-Oriented GIS System for Risk Mapping of Oil Spills Integrated with High Performance Cluster // The Second International Conference on Informatics Engineering & Information Science (ICIEIS2013). – Kuala Lumpur, 2013. – P. 343-354.

95 Bostanbekov K.A., Nurseitov D. B. The Development of Risk Assessment System for Accidental Oil Spill in the Northern Caspian Sea // Computer Modelling & New Technologies. – Riga, 2016. – № 20(3). – P.35-41.

96 Бостанбеков К.А. Разработка системной оболочки для рискованного картирования поражения морской биоты при аварийном разливе нефти // Вестник ЕНУ серия «Естественно-технические науки». – Астана, 2017. – №4 II часть. – С. 249-255.

97 Бостанбеков К.А. Разработка системы оценки риска при аварийном разливе нефти с использованием высокопроизводительных вычислений // Вестник ПГУ серия «Энергетическая». – Павлодар, 2017. – №1. – С. 52-61.

98 Baklanov A. Integrated Meteorological and Atmospheric Chemical Transport Modeling: Perspectives and Strategy for HIRLAM/HARMONIE. – HIRLAM Newsletter. – N53. – 2008.

99 Korsholm U.S., A. Baklanov, A. Gross, A. Mahura, B.H. Sass, E. Kaas. Online coupled chemical weather forecasting based on HIRLAM – overview and prospective of Enviro-HIRLAM. – HIRLAM Newsletter. – N54. – 2008.

100 <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/macc-reanalysis> 21.11.2015

101 <http://www.iiasa.ac.at> 21.11.2015

102 Бостанбеков К.А., Куандыков А.А. Моделирование переноса загрязняющих веществ при аварийных возгораниях нефтехранилищ // Вестник КазННТУ, серия «Технические науки». – Алматы, 2017. – №1. – С. 357-361.

103 Zakarin E, Balakay L, Mirkarimova B, Mahura A, Baklanov A, Sorensen J. Transboundary Atmospheric Pollution of Oil-Gas Industry Emissions from North Caspian region of Kazakhstan // Abstracts of European Geosciences Union (EGU) General Assembly. – Vienna, 2012. – Vol.14

104 <http://worldtek.ru> 22.11.2015

105 <http://response.restoration.noaa.gov> 22.11.2015

106 Bostanbekov K., Mahura A., Nuterman R., Nurseitov D., Zakarin E., Baklanov A. On-line Meteorology-Chemistry/Aerosols Modelling and Integration for Risk Assessment: Case Studies // European Geosciences Union General Assembly. – Vienna, 2016. – Vol. 18.

107 Sass B., Mahura A., Nuterman R., Baklanov A., Palamarchuk J, Ivanov S., Nielsen K., Penenko A., Edvardsson N, Stysiak A., Bostanbekov K., Amstrup B, Yang X., Ruban I., Jensen M., Penenko V., Nurseitov D., Zakarin E. Enviro-HIRLAM/HARMONIE Studies in ECMWF HPC EnviroAerosols Project // European Geosciences Union General Assembly. – Vienna, 2017. – Vol. 19.

108 Bostanbekov K., Mahura A., Nuterman R., Nurseitov D., Zakarin E., Baklanov A. On-line Meteorology-Chemistry/Aerosols Modelling and Integration for Risk Assessment: Case Studies / Scientific Report, Danish Meteorological Institute, Copenhagen. 2015. – № 15-06. – 32 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А – Патент на изобретение



(19) МИНИСТЕРСТВО ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

(12) **ПАТЕНТ**

(11) **№ 31877**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

(54) **НАЗВАНИЕ:** Способ прогнозирования загрязнения окружающей среды

(73) **ПАТЕНТООБЛАДАТЕЛЬ:** Товарищество с ограниченной ответственностью "EcoRisk" (KZ)

(72) **АВТОР (АВТОРЫ):** Закарин Эдиге Аскарович (KZ); Дедова Татьяна Владимировна (KZ); Ким Дмитрий Константинович (KZ); Нурсеитов Данияр Борисович (KZ); Балакай Лариса Анатольевна (KZ); Бостанбеков Кайрат Аратович (KZ)

(21) **Заявка № 2015/0722.1**

(22) **Дата подачи заявки:** 29.05.2015

Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Республики Казахстан 31.01.2017.

Действие патента распространяется на всю территорию Республики Казахстан при условии своевременной оплаты поддержания патента в силе.

Заместитель министра юстиции
Республики Казахстан

Э. Азимова

Сведения о внесении изменений приводятся на отдельном листе в виде приложения к настоящему патенту



МИНИСТЕРСТВО ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

УДОСТОВЕРЕНИЕ АВТОРА

№ 96905

Настоящим удостоверяется, что Бостанбеков Кайрат Аратович (KZ)

и Закарин Эдиге Аскарович (KZ); Дедова Татьяна Владимировна (KZ);
Ким Дмитрий Константинович (KZ); Нурсеитов Данияр Борисович (KZ);
Балакай Лариса Анатольевна (KZ)

является(ются) автором(ами) изобретения

(11) 31877

(54) Способ прогнозирования загрязнения окружающей среды

(73) *Патентообладатель:* Товарищество с ограниченной
ответственностью "EcoRisk" (KZ)

(21) 2015/0722.1

(22) 29.05.2015

Заместитель министра юстиции
Республики Казахстан

Э. Азимова

ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Листинг программы

Листинг программы PrepareBothRiskApp:

```
using System;
using System.IO;
using DHI.Generic.MikeZero.DFS;
using DHI.Generic.MikeZero.DFS.dfs123;
using System.Text;

namespace PrepareBothRiskApp
{
    class Program
    {
        static void Main(string[] args)
        {
            try
            {

                string year = args[0];
                string url_sa = args[1];
                string url_hd = args[2];
                string url_biota = args[3];
                string file_prsa = args[4];
                string PDU = args[5];

                var dir_sa = new DirectoryInfo(url_sa);
                var dir_hd = new DirectoryInfo(url_hd);
                var dir_biota = new DirectoryInfo(url_biota);
                string file_empty = Path.Combine(dir_biota.FullName, @"RiskEmpty.dfs2");
                string file_hd = Path.Combine(dir_hd.FullName, @"WaterDepth.dfs2");
                string file_sa = "";

                Dfs2File dfs2empty = DfsFileFactory.Dfs2FileOpen(file_empty);
                Dfs2File hd_dfs2 = DfsFileFactory.Dfs2FileOpen(file_hd);
                IDfsItemData2D water_depth = (IDfsItemData2D)hd_dfs2.ReadItemTimeStep(1, 0);

                int nsteps = dfs2empty.FileInfo.TimeAxis.NumberOfTimeSteps;
                int datasize = dfs2empty.SpatialAxis.SizeOfData;

                // I - for one scene
                double[,] I1 = new double[nsteps, datasize];
                double[,] I2 = new double[nsteps, datasize];
                double[,] I3 = new double[nsteps, datasize];
                // E - average for all scene
                double[,] E1 = new double[nsteps, datasize];
                double[,] E2 = new double[nsteps, datasize];
                double[,] E3 = new double[nsteps, datasize];

                int count = 0;
                foreach (FileInfo file in dir_sa.GetFiles("*" + year + ".dfs2"))
                {

                    file_sa = file.FullName;

                    Dfs2File dfs2 = DfsFileFactory.Dfs2FileOpen(file_sa);

                    int n = 0;
                    for (int i = 0; i < nsteps; i++)
                    {
```

```

// steps from 00 to 12
if (i < 4) n += 3;
// steps from 12 to 24
if (i >= 4 && i < 6) n += 6;
// steps from 24 to 120
if (i >= 6) n += 12;

for (int j = 0; j <= n; j++)
{
    IDfsItemData2D V_mass = (IDfsItemData2D)dfs2.ReadItemTimeStep(1, j);
    IDfsItemData2D H_mass = (IDfsItemData2D)dfs2.ReadItemTimeStep(2, j);
    IDfsItemData2D W_mass = (IDfsItemData2D)dfs2.ReadItemTimeStep(3, j);
    IDfsItemData2D A_mass = (IDfsItemData2D)dfs2.ReadItemTimeStep(4, j);
    IDfsItemData2D area = (IDfsItemData2D)dfs2.ReadItemTimeStep(7, j);

    double W_depth = 10;
    double area_data = 0;
    double Toil = 0;
    double Voil = 0;
    for (int k = 0; k < V_mass.Data.GetLength(0); k++)
    {
        W_depth = Convert.ToDouble(water_depth.Data.GetValue(k));
        area_data = Convert.ToDouble(area.Data.GetValue(k));

        if (((area_data > -1.0e-30) || (area_data < -1.1e-30)) && (area_data > 0)) //if not
NoData and if not Zero data
        {
            if ((W_depth > -1.0e-30) || (W_depth < -1.1e-30)) //if not NoData
            {
                //if (area_data > 1000000)
                area_data = 1000000;

                // Total oil value
                Toil = (Convert.ToDouble(V_mass.Data.GetValue(k)) +
Convert.ToDouble(H_mass.Data.GetValue(k)) +
Convert.ToDouble(W_mass.Data.GetValue(k)) +
Convert.ToDouble(A_mass.Data.GetValue(k))) /
                (area_data * W_depth);

                // Volatile oil value
                Voil = Convert.ToDouble(V_mass.Data.GetValue(k)) / (area_data *
W_depth);

                // Territory risk
                if (Toil > 0)
                    l1[i, k] = 1;

                //Value risk
                if (j == n)
                    if (Toil > Convert.ToDouble(PDU))
                        l2[i, k] = Toil;

                //Volatile Value risk
                if (j == n)
                    if (Voil > Convert.ToDouble(PDU))
                        l3[i, k] = Voil;
            }
        }
    }
}
}
}

```

```

        dfs2.Close();
        count++;

        for (int x = 0; x < nsteps; x++)
            for (int y = 0; y < l1.GetLength(1); y++)
            {
                E1[x, y] += l1[x, y];
                E2[x, y] += l2[x, y];
                E3[x, y] += l3[x, y];
            }
    }

    // divide by files amount
    for (int x = 0; x < nsteps; x++)
    {
        for (int y = 0; y < E1.GetLength(1); y++)
        {
            E1[x, y] = E1[x, y] / count;
            E2[x, y] = E2[x, y] / count;
            E3[x, y] = E3[x, y] / count;
        }
    }

    for (int x = 0; x < nsteps; x++)
    {
        for (int y = 0; y < E1.GetLength(1); y++)
        {
            E2[x, y] = E2[x, y] / Convert.ToDouble(PDU);
            E3[x, y] = E3[x, y] / Convert.ToDouble(PDU);
        }
    }

    File.Copy(file_empty, file_prsa, true);
    Dfs2File dfs2res = DfsFileFactory.Dfs2FileOpenEdit(file_prsa);
    for (int i = 0; i < nsteps; i++)
    {
        IDfsItemData2D itemData1 = (IDfsItemData2D)dfs2res.ReadItemTimeStep(1, i);
        IDfsItemData2D itemData2 = (IDfsItemData2D)dfs2res.ReadItemTimeStep(2, i);
        IDfsItemData2D itemData3 = (IDfsItemData2D)dfs2res.ReadItemTimeStep(3, i);
        for (int j = 0; j < itemData1.Data.GetLength(0); j++)
        {
            itemData1.Data.SetValue(Convert.ToSingle(E1[i, j]), j);
            itemData2.Data.SetValue(Convert.ToSingle(E2[i, j]), j);
            itemData3.Data.SetValue(Convert.ToSingle(E3[i, j]), j);
        }
        dfs2res.WriteItemTimeStep(1, i, itemData1.Time, itemData1.Data);
        dfs2res.WriteItemTimeStep(2, i, itemData2.Time, itemData2.Data);
        dfs2res.WriteItemTimeStep(3, i, itemData3.Time, itemData3.Data);
    }
    dfs2res.Close();
}
catch (Exception e)
{
    using (StreamWriter file_log = new StreamWriter("Output.log", true, Encoding.UTF8))
    {
        file_log.Write("{0} - Error: '{1}'\r\n", DateTime.Now.ToString(), e.Message);
    }
}
}

static private void Debug(string msg)
{

```

```

        using (StreamWriter file_log = new StreamWriter("Debug.log", true, Encoding.UTF8))
        {
            file_log.Write("{0} - : {1}\r\n", DateTime.Now.ToString(), msg);
        }
    }
}
}

```

Листинг программы BothRiskApp:

```

using System;
using System.IO;
using DHI.Generic.MikeZero.DFS;
using DHI.Generic.MikeZero.DFS.dfs123;
using System.Text;

namespace BothRiskApp
{
    class Program
    {
        static void Main(string[] args)
        {
            try
            {
                string url_sa = args[0];
                string url_biota = args[1];
                string url_risk = args[2];
                string Pa = args[3];

                var dir_sa = new DirectoryInfo(url_sa);
                var dir_biota = new DirectoryInfo(url_biota);
                var dir_risk = new DirectoryInfo(url_risk);
                string file_empty = Path.Combine(dir_biota.FullName, @"RiskEmpty.dfs2");
                string file_risk = Path.Combine(dir_risk.FullName, @"Risk.dfs2");
                string file_sa = "";

                Dfs2File dfs2empty = DfsFileFactory.Dfs2FileOpen(file_empty);
                int nsteps = dfs2empty.FileInfo.TimeAxis.NumberOfTimeSteps;
                int datasize = dfs2empty.SpatialAxis.SizeOfData;

                // E - average for all scene
                double[,] E1 = new double[nsteps, datasize];
                double[,] E2 = new double[nsteps, datasize];
                double[,] E3 = new double[nsteps, datasize];

                int count = 0;

                foreach (FileInfo file in dir_sa.GetFiles("*.dfs2"))
                {
                    file_sa = file.FullName;
                    Dfs2File dfs2 = DfsFileFactory.Dfs2FileOpen(file_sa);
                    nsteps = dfs2.FileInfo.TimeAxis.NumberOfTimeSteps;
                    for (int i = 0; i < nsteps; i++)
                    {
                        IDfsItemData2D h1 = (IDfsItemData2D)dfs2.ReadItemTimeStep(1, i);
                        IDfsItemData2D h2 = (IDfsItemData2D)dfs2.ReadItemTimeStep(2, i);
                        IDfsItemData2D h3 = (IDfsItemData2D)dfs2.ReadItemTimeStep(3, i);
                        for (int j = 0; j < h1.Data.GetLength(0); j++)
                        {

```



```

static void Main(string[] args)
{
    try
    {
        string biota_name = args[0];
        string month = args[1];
        string url_sa = args[2];
        string url_hd = args[3];
        string url_biota = args[4];
        string url_prsa = args[5];

        var dir_sa = new DirectoryInfo(url_sa);
        var dir_hd = new DirectoryInfo(url_hd);
        var dir_biota = new DirectoryInfo(url_biota);
        var dir_prsa = new DirectoryInfo(url_prsa);
        string file_empty = Path.Combine(dir_biota.FullName, @"BiotaRiskEmpty.dfs2");
        string file_biota0 = Path.Combine(dir_biota.FullName, biota_name + ".dfs0");
        string file_biota2 = Path.Combine(dir_biota.FullName, biota_name + ".dfs2");
        string file_prsa = Path.Combine(dir_prsa.FullName, @"Risk_" + biota_name + ".dfs2");
        string file_hd = Path.Combine(dir_hd.FullName, @"WaterDepth.dfs2");
        string file_sa = "";

        Dfs2File dfs2empty = DfsFileFactory.Dfs2FileOpen(file_empty);
        Dfs2File hd_dfs2 = DfsFileFactory.Dfs2FileOpen(file_hd);
        IDfsItemData2D water_depth = (IDfsItemData2D)hd_dfs2.ReadItemTimeStep(1, 0);

        int nsteps = dfs2empty.FileInfo.TimeAxis.NumberOfTimeSteps;
        int datasize = dfs2empty.SpatialAxis.SizeOfData;

        // I - for one scene
        double[,] I1 = new double[nsteps, datasize];

        // E - average for all scene
        double[,] E1 = new double[nsteps, datasize];

        IDfsFile dfs0 = DfsFileFactory.DfsGenericOpen(file_biota0);
        IDfsItemData recov_year_data = (IDfsItemData)dfs0.ReadItemTimeStep(1, 0);
        IDfsItemData minMPC_data = (IDfsItemData)dfs0.ReadItemTimeStep(2, 0);
        IDfsItemData deadminMPC_data = (IDfsItemData)dfs0.ReadItemTimeStep(3, 0);
        IDfsItemData maxMPC_data = (IDfsItemData)dfs0.ReadItemTimeStep(4, 0);
        IDfsItemData deadmaxMPC_data = (IDfsItemData)dfs0.ReadItemTimeStep(5, 0);

        double pdu = Convert.ToDouble(minMPC_data.Data.GetValue(0));
        double s1 = Convert.ToDouble(minMPC_data.Data.GetValue(0));
        double y1 = Convert.ToDouble(deadminMPC_data.Data.GetValue(0)) / 100.0;
        double s2 = Convert.ToDouble(maxMPC_data.Data.GetValue(0));
        double y2 = Convert.ToDouble(deadmaxMPC_data.Data.GetValue(0)) / 100.0;
        double a = (y2 - y1) / (s2 - s1);
        double b = (y2 + y1 - a * (s2 + s1)) / 2.0;
        double pdu_max = (1.0 - b) / a;
        double full = 1.0 / 24.0;
        //double full = 1.0;
        int count = 0;

        # region foreach SA
        foreach (FileInfo file in dir_sa.GetFiles("*.dfs2"))
        {
            //Console.WriteLine(file.Name);
            file_sa = file.FullName;
            Dfs2File dfs2 = DfsFileFactory.Dfs2FileOpen(file_sa);

            int nsteps_sa = dfs2.FileInfo.TimeAxis.NumberOfTimeSteps;

```

```

for (int i = 0; i < nsteps; i++)
{
    for (int y = 0; y < l1.GetLength(1); y++)
    {
        l1[i, y] = 1;
    }

    //var watch2 = System.Diagnostics.Stopwatch.StartNew();
    for (int j = 0; j < nsteps_sa; j++)
    {
        IDfsItemData2D V_mass = (IDfsItemData2D)dfs2.ReadItemTimeStep(1, j);
        IDfsItemData2D area = (IDfsItemData2D)dfs2.ReadItemTimeStep(7, j);
        double W_depth = 5;
        double area_data = 0;
        double Voil = 0;
        double f = 0; //Sensitivity function
        for (int k = 0; k < V_mass.Data.GetLength(0); k++)
        {
            W_depth = Convert.ToDouble(water_depth.Data.GetValue(k));
            area_data = Convert.ToDouble(area.Data.GetValue(k));

            if (((area_data > -1.0e-30) || (area_data < -1.1e-30)) && (area_data > 0)) //if not
NoData and if not Zero data
            {
                if ((W_depth > -1.0e-30) || (W_depth < -1.1e-30)) //if not NoData
                {

                    //if (area_data > 1000000)
                    area_data = 1000000;

                    // Volatile oil value
                    Voil = 1000 * Convert.ToDouble(V_mass.Data.GetValue(k)) / (area_data *
W_depth);

                    // Sensitivity function
                    if (Voil <= pdu)
                        f = 0;
                    else if ((Voil > pdu) && (Voil < pdu_max))
                        f = full * (a * Voil + b);
                    //f = (a * Voil + b);
                    else
                        f = full;
                    //f = 1.0;
                    //l1[i, k] *= 1 - f * area_data * 0.000001;
                    l1[i, k] *= 1 - f;
                }
            }
        }
        for (int y = 0; y < l1.GetLength(1); y++)
            E1[i, y] += l1[i, y];
    }
    dfs2.Close();
    count++;
}
# endregion

Dfs2File dfs2biota = DfsFileFactory.Dfs2FileOpen(file_biota2);

```

```

        IDfsItemData2D biota_sens = (IDfsItemData2D)dfs2biota.ReadItemTimeStep(1,
Convert.ToInt16(month) - 1);
        double recov_year = 0;
        for (int x = 0; x < nsteps; x++)
        {
            for (int y = 0; y < E1.GetLength(1); y++)
            {
                // divide by files amount
                E1[x, y] = E1[x, y] / count;

                //recovery period
                recov_year = 0;
                double biota_sen = Convert.ToDouble(biota_sens.Data.GetValue(y));
                if ((biota_sen > -1.0e-30) || (biota_sen < -1.1e-30)) //if not NoData
                {
                    recov_year = Convert.ToDouble(recov_year_data.Data.GetValue(0)) * biota_sen;
                }
                E1[x, y] = recov_year * (1.0 - E1[x, y]);
            }
        }

        File.Copy(file_empty, file_prsa, true);
        Dfs2File dfs2res = DfsFileFactory.Dfs2FileOpenEdit(file_prsa);
        for (int i = 0; i < nsteps; i++)
        {
            IDfsItemData2D itemData1 = (IDfsItemData2D)dfs2res.ReadItemTimeStep(1, i);
            for (int j = 0; j < itemData1.Data.GetLength(0); j++)
            {
                itemData1.Data.SetValue(Convert.ToSingle(E1[i, j]), j);
            }
            dfs2res.WriteItemTimeStep(1, i, itemData1.Time, itemData1.Data);
        }
        dfs2res.Close();
    }
    catch (Exception e)
    {
        using (StreamWriter file_log = new StreamWriter("Output.log", true, Encoding.UTF8))
        {
            file_log.Write("{0} - Error: '{1}'\r\n", DateTime.Now.ToString(), e.Message);
        }
    }
}

static private void Debug(string msg)
{
    using (StreamWriter file_log = new StreamWriter("Debug.log", true, Encoding.UTF8))
    {
        file_log.Write("{0} - : '{1}'\r\n", DateTime.Now.ToString(), msg);
    }
}
}
}
}

```

Листинг BiotaRiskApp:

```

using System;
using System.IO;
using DHI.Generic.MikeZero.DFS;
using DHI.Generic.MikeZero.DFS.dfs123;
using System.Text;

```

```

namespace BiotaRiskApp
{
    class Program
    {
        static void Main(string[] args)
        {
            try
            {
                string url_prerisk = args[0];
                string url_biota = args[1];
                string url_risk = args[2];

                var dir_prerisk = new DirectoryInfo(url_prerisk);
                var dir_biota = new DirectoryInfo(url_biota);
                var dir_risk = new DirectoryInfo(url_risk);
                string file_empty = Path.Combine(dir_biota.FullName, @"BiotaRiskEmpty.dfs2");
                string file_risk = "";
                string file_prerisk = "";
                Dfs2File dfs2empty = DfsFileFactory.Dfs2FileOpen(file_empty);
                int nsteps = dfs2empty.FileInfo.TimeAxis.NumberOfTimeSteps;
                int datasize = dfs2empty.SpatialAxis.SizeOfData;

                // T - Total for all recovery period
                double[,] T1 = new double[nsteps, datasize];

                foreach (FileInfo file in dir_prerisk.GetFiles("*.dfs2"))
                {
                    file_prerisk = file.FullName;
                    Dfs2File dfs2 = DfsFileFactory.Dfs2FileOpen(file_prerisk);
                    nsteps = dfs2.FileInfo.TimeAxis.NumberOfTimeSteps;
                    for (int i = 0; i < nsteps; i++)
                    {
                        IDfsItemData2D h1 = (IDfsItemData2D)dfs2.ReadItemTimeStep(1, i);

                        for (int j = 0; j < h1.Data.GetLength(0); j++)
                        {
                            T1[i, j] += Convert.ToDouble(h1.Data.GetValue(j));
                        }
                    }
                    dfs2.Close();
                }

                //Risk
                file_risk = Path.Combine(dir_risk.FullName, @"BiotaRisk.dfs2");
                File.Copy(file_empty, file_risk, true);
                Dfs2File dfs2res = DfsFileFactory.Dfs2FileOpenEdit(file_risk);
                nsteps = dfs2res.FileInfo.TimeAxis.NumberOfTimeSteps;
                for (int i = 0; i < nsteps; i++)
                {
                    IDfsItemData2D itemData1 = (IDfsItemData2D)dfs2res.ReadItemTimeStep(1, i);

                    for (int j = 0; j < itemData1.Data.GetLength(0); j++)
                    {
                        itemData1.Data.SetValue(Convert.ToSingle(T1[i, j]), j);
                    }
                    dfs2res.WriteItemTimeStep(1, i, itemData1.Time, itemData1.Data);
                }
                dfs2res.Close();
            }
            catch (Exception e)
            {

```

```
        using (StreamWriter file_log = new StreamWriter("Output.log", true, Encoding.UTF8))
        {
            file_log.Write("{0} - Error: '{1}'\r\n", DateTime.Now.ToString(), e.Message);
        }
    }
}
}
```