

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (РГГМУ)

На правах рукописи



Сидоренко Артем Юсупович

**МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ НАВИГАЦИЕЙ В
АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ РОССИИ**

Специальность 25.00.35 – Геоинформатика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной

степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург, 2021

Работа выполнена на кафедре прикладной информатики ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ)

Научный руководитель: **Истомин Евгений Петрович,**
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной информатики ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»

Научный консультант: **Новиков Владимир Витальевич,**
доктор технических наук, профессор кафедры ракетного вооружения надводных кораблей ФГБВО УВО «Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П.С.Нахимова»

Официальные оппоненты: **Кляхин Валерий Николаевич,**
доктор военных (кандидат технических) наук, профессор, старший научный сотрудник НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»

Орлова Наталья Вячеславовна,
кандидат технических наук, доцент, администратор УНЦ «ГИС технологии» ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Ведущая организация: **Закрытое акционерное общество (ЗАО) «Институт телекоммуникаций»**

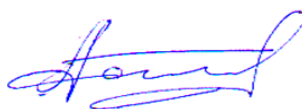
Защита диссертации состоится «18» мая 2021 года в _____ на заседании диссертационного совета Д 212.197.03 по адресу: г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, дом 98, ауд. _____.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.rshu.ru/university/dissertations/> ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу 192007, Россия, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, дом 79, Российский государственный гидрометеорологический университет, Диссертационный совет Д 212.197.03, Ученому секретарю.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.197.03
к. воен.н., доцент



Соколов А.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Анализ современного состояния проблем цифровизации управления мореплаванием в Арктической морской зоне России показал недостаточность автоматизации процессов навигационного и гидрометеорологического обеспечения (ГМО) морской деятельности, сезонность прогнозов, отсутствие единого центра хранения и управления распределенной гетерогенной информацией. Современные методы прогнозирования имеют недостаточную точность при обосновании долгосрочных прогнозов и требуют регулярного пополнения данными от различных источников информации.

Разработка и использование модели геоинформационной системы управления навигацией (МГИСУН), построенной на базе рекурсивной фильтрации данных, поможет устранить недостатки в существующих моделях, тем самым обеспечит морскую навигацию в арктических регионах более точными пространственно-координированными геоданными, что в свою очередь повысит безопасность мореплавания во льдах и сложных климатических условиях, минимизирует время прохода судна по маршруту, предоставит возможности продлить период навигаций, при этом МГИСУН будет являться гибким инструментом, совмещающая в себе узкоспециализированную методику обработки разнородных и распределенных баз данных (БД).

Таким образом, **актуальной является научная задача совершенствования моделей и методик геоинформационного управления навигацией в Арктическом регионе России.**

Объект исследования – навигационная обстановка в морской зоне Арктического региона России.

Предмет исследования – технологии и модели геоинформационного управления навигацией в Арктическом регионе.

Цель диссертационной работы – разработка моделей и методики геоинформационного управления навигацией в Арктическом регионе России.

Достижение поставленных целей в работе обеспечены решением следующих основных задач:

1. Анализ обстановки и разработка требований к геоинформационному управлению навигацией в Арктическом регионе России.
2. Составление методики представления геоданных для моделей прогнозирования будущего состояния навигационной обстановки Арктического региона
3. Разработка новых моделей и методики прогнозирования на основе модифицированных алгоритмов рекурсивной фильтрации.
4. Формирование модели геоинформационной системы управления навигацией в Арктическом регионе Российской Федерации.

Положения и результаты, выносимые на защиту:

1. **Требования к геоинформационной системе управления навигацией в Арктическом регионе России**, основанные на анализе характеристики существующих ГИС в сопоставлении с актуальными функциями геоинформационного управления навигацией в Арктическом регионе РФ.

2. **Методика представления геоданных для моделей прогнозирования будущего состояния обстановки Арктического региона, основанная на модифицированных алгоритмах рекурсивной фильтрации**, которая использует новые модели и методики оценки навигационной обстановки на маршрутах в Арктическом регионе, цифровую рекурсивную фильтрацию статистических данных для прогнозирования и оценки качества исходной информации, а также является независимым интегрируемым модулем ГИС. Это позволит повысить информативность решений и снизить геориски ошибочных решений, по предварительным оценкам на 30%.

3. **Модель прогнозирования состояния навигационной обстановки Арктического региона, основанная на модифицированных алгоритмах рекурсивной фильтрации**, отличающаяся тем, что она синтезирована путем совмещения рекурсивных фильтров и использует методику представления геоданных, что дает возможность повысить точность прогнозов до 90 %.

4. **Модель геоинформационной системы управления навигацией в Арктическом регионе Российской Федерации**, которая отличается тем, что использует прогностические рекурсивные

алгоритмы цифровой фильтрации, методику представления геоданных для поддержки принятия управленческих решений навигацией в Арктическом регионе РФ. Это позволяет реализовать геопространственное представление региона на основе многопараметрического анализа в кооперативном модуле геоинформационной системы управления и использовать данные дистанционного зондирования в реальном масштабе времени.

Научная новизна:

1. Обоснованы требования к геопространственному представлению Арктического региона на основе многопараметрического анализа характеристик геоинформационных систем и выявлены приоритетные направления развития Арктики;

2. Разработана методика представления геоданных для моделей прогнозирования будущего состояния навигационной обстановки Арктического региона;

3. Впервые, в рассматриваемой предметной области, применены универсальные модели прогнозирования данных дистанционного зондирования (ДДЗ) Арктического региона на основе модифицированных алгоритмов рекурсивной фильтрации, позволяющие проводить как краткосрочные, так и долгосрочные прогнозы системы с наибольшим процентом точности;

4. Впервые реализована и представлена модель универсального фильтра прогнозирования будущего состояния навигационной обстановки Арктического региона, основанная на совмещении линейных фильтров, что значительно сокращает ошибки внешних воздействий, при этом достигая максимального процента точности получаемых данных;

5. Сформирована модель комплексного пакета ГИС управления навигацией в Арктическом регионе России, включающая в себя компоненты картографии, как модели поддержки принятия управленческих решений в области навигации, цифровые линейные фильтры прогнозирования статистических данных, оценочный модуль анализа исходной информации и дальнейшей результативной модели.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Полученные научные результаты соответствуют пунктам 3, 4, 7 паспорта специальности 25.00.35 – «Геоинформатика».

Практическая и научная значимость работы заключается в том, что решена научно-техническая задача, имеющая существенное значение управления навигацией, за счет применения разработанных моделей и методик геоинформационного управления.

Практическая ценность полученных результатов заключается в том, что предложенные модели и методика, повышают эффективность навигации в Арктическом регионе России, снижая риски принятия решений при перемещениях по труднодоступным территориально распределенным районам, повышая безопасность, что приводит к уменьшению затрат и сокращает время перемещения объекта по выбранному маршруту.

Апробация работы:

1. Международная научно-практическая конференция «Инфогео 2013», секция «Геоинформатика» (26-28 ноября 2013г.), доклад по теме: «Защита распределенных баз данных в ГИС».

2. Международная научно-практическая конференция «Инфогео 2014», секция «Геоинформатика» (3-6 октября 2014г.), доклад с публикацией по теме: «Прогнозирование гидрометеорологической обстановки западного сектора Северного морского пути с применением линейного фильтра Калмана-Бьюси».

3. XI Санкт-Петербургская межрегиональная конференция «Информационная безопасность регионов России (ИБРР–2019)» Санкт-Петербург, 23-25 октября 2019 г., секция «Информационная безопасность геоинформационных систем», доклад на тему: «Методы обеспечения информационной безопасности пространственных данных, распределенных ГИС».

4. III Международная молодёжная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы лесного хозяйства» 06-08 ноября 2019 г., Санкт-Петербург, Россия, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова, доклад с публикацией на тему: «Классификация подстилающей поверхности по данным спутниковых снимков».

5. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: IV scientific-technical conference "Forests of Russia: policy, industry, science and education" (22–24 May 2019, St. Petersburg, Russia),

доклад с публикацией на тему: « Model of optimum integration of diverse geodata for the benefit of management of forestry»

6. Региональная информатика (РИ-2020): XVII Санкт-Петербургская международная конференция, секция 19 «Геоинформационные системы», (Санкт-Петербург, 28-30 октября 2020г.), доклад с публикацией на тему: «О некоторых аспектах защиты пространственных данных в ГИС»

7. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: All-Russian scientific-practical conference with international participation "Actual issues of transport in the forest sector" (28-29 November 2019, St. Petersburg, Russia), доклад с публикацией на тему: «Study of intra-day dynamics of currents in the area of the navigable strait of Baltiysk to adjust the movement of water transport», «Application of Kalman-Bucy filter for vessel traffic control systems in the northern sea route».

8. Цифровые технологии в лесном секторе: материалы всероссийской научно-технической конференции. Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, 26–27 марта 2020 г.), доклад с публикацией на тему: «About the methodology of geo-risk management in forestry».

9. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: All-Russian scientific-technical conference "Digital technologies in forest sector" (26 – 27 March 2020, Saint Petersburg, Russian Federation), доклад с публикацией на тему: «Monitoring forest fires and their consequences using MODIS spectroradiometer data».

10. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 5th International Conference "Arctic: History and Modernity" (18-19 March 2020, Saint-Petersburg, Russia), доклад с публикацией на тему: « Spatial-temporal variability of ice cover of the Bering sea», «Application of a remote sensing data processing method for assessment ice cohesion in the Arctic navigation».

11. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: V pan-Russian scientific - technical conference – webinar "Forests of Russia: policy, industry, science and education" (16-18 of June 2020, Saint Petersburg, Russian Federation), доклад с публикацией на тему: «Development of a conceptual GIS model to support management decision making».

12. GraphiCon 2020: Proceedings of the 30th International Conference on Computer Graphics and Machine Vision (22-25 September 2020, Saint-Petersburg, Russia). – 2020. – vol. 2744., доклад с публикацией по теме: «Determination of Internal Waves Off the Coast of Morocco According to Earth Remote Sensing Data (short paper)».

Личный вклад автора. Соискатель непосредственно занимался подготовкой и обработкой исходных материалов, разработкой требований, методики и моделей, в том числе геоинформационной системы, анализе и формировании полученных результатов.

Публикации. Научные результаты исследования опубликованы в 22 статьях научно-технических изданиях, в том числе 8 из рекомендованного перечня ВАК РФ и 14 публикаций в изданиях, индексируемые в международных базах данных (Scopus).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из списка используемых сокращений, введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы составляет 147 страниц, 63 рисунка, 6 таблицы, 47 формул. Список использованной литературы составляет 125 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обозначена актуальность научной работы, определены объект, предмет, цели и задачи исследования, представлена теоретическая и практическая ценность работы, приведено краткое содержание диссертации по разделам, перечислены основные научные результаты, выносимые на защиту.

В **первой главе** «Анализ обстановки и разработка требований к геоинформационному управлению навигацией в Арктическом регионе России» рассматриваются результаты анализа геополитической и навигационной обстановки Арктического региона. Исследованы и обозначены стратегически приоритетные направления развития Арктического сектора РФ, в таких областях как добыча минеральных ресурсов, энергетические запасы, биологические и водные ресурсы.

Представлен план стратегического развития главной артерии Арктики – Северного морского пути (СМП). Рассмотрена транспортно-логистическая система СМП, а также приведено разностороннее сравнение с существующими альтернативными морскими магистралями.

Определен перечень критериев, влияющих на инфраструктуру морской навигации и отмечены основные организации управления переправами по СМП.

На основе изучения существующих информационных систем (ИС), в частности ГИС разработана типовая структурная схема функционирования главных компонентов ГИС, рассмотрена возможность взаимодействия с пространственно-координированными геоданными дистанционного зондирования.

Обоснованы требования к геопространственному представлению Арктического региона на основе многопараметрического анализа характеристик геоинформационных систем и выявлены приоритетные направления развития Арктики. В качестве основных требований и функциональных возможностей, предъявляемые к существующим ГИС, исходя из поставленных задач и цели диссертационного исследования, определены следующие положения:

1. Прогностическая оценка навигационной обстановки арктической морской зоны.
2. Геомоделирование (в том числе слои мировых океанов), включая составление прогностических карт маршрута, с целью принятия управленческих решений в навигации.
3. Оценка поведения модели ГИС, анализ и обработка с помощью фильтров ЦОС импортируемых ёмких геоданных (многолетние архивные данные).
4. Синхронизация ГИС с распределенными базами и банками геоданных, ведущих мировых научных институтов и организаций.
5. Высокая производительность при использовании минимальных ИТ ресурсов.
6. Интегрирование внешних компонентов к ГИС (источники РБД, ПО, плагины и другое).
7. Гибкая многопараметрическая настройка компонентов ГИС.
8. Работа с ГИС в автономном режиме (без подключения к Глобальной сети).
9. Экспорт обработанных геоданных (в частности прогностические оценки) навигационной обстановки в графическом и табличном виде.
10. Степень удобства использования (usability), понятный графический интерфейс.
11. Взаимодействие с информационными системами безопасности (ИСБ).

С целью выявления ГИС отвечающей поставленным требованиям, синтезирована матрица данных сравнительных функций и типов современных ГИС (см. ПРИЛОЖЕНИЕ Б полного текста работы). На стыке синтезированной матрицы сравнительных характеристик, типов и функций современных ГИС и обозначенных требований, был проведен анализ, с целью выявления опциональных возможностей применимых для поставленных задач диссертационного исследования. Результат анализа представлен в таблице 1.

Таблица 1. Многопараметрический анализ характеристик геоинформационных систем

№	Степень удовлетворенности предъявляемым требованиям к функциональным возможностям ГИС	Grass	QGIS	GeoDa	ERDAS	uDig	gvSIG	Idrisi	Geomatic	OSSIM	SAGA	JUMP	ILWIS	KOSMO	ESRI ArcGIS	GDAL	Панорама	ГИСИнГео
1.	Прогностическая оценка навигационной обстановки арктической морской зоны	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	±	-	±	-
2.	Геомоделирование (в том числе слои мировых океанов), включая составление прогностических карт маршрута, с целью принятия управленческих решений.	-	±	±	-	±	±	±	-	-	-	±	-	-	±	-	±	-
3.	Оценка поведения модели ГИС, анализ и обработка с помощью фильтров ЦОС импортируемых ёмких геоданных (архивы БД).	-	±	-	-	±	-	-	±	-	-	±	-	-	±	-	±	-

Продолжение таблицы 1 – Многопараметрический анализ характеристик геоинформационных систем

4.	Синхронизация ГИС с распределенными базами и банками геоданных, ведущих мировых научных институтов и организаций	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5.	Высокая производительность при минимальных ИТ ресурсах	-	+	±	±	+	+	-	±	-	±	±	-	-	±	-	±	-
6.	Интегрирование внешних компонентов к ГИС (РБД, ПО и др.)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
7.	Гибкая многопараметрическая настройка компонентов ГИС	±	+	±	±	+	+	±	±	±	±	±	±	+	±	±	±	-
8.	Работа с ГИС в автономном режиме (без подключения к сети Интернет)	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
9.	Экспорт обработанных геоданных навигационной обстановки в графическом и табличном виде	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
10.	Степень удобства использования (usability), графического интерфейса	±	±	-	-	-	-	±	-	-	-	±	-	-	-	-	±	-
11.	Взаимодействие с ИСБ	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±

Стоит отметить выделенную синим цветом область требований с 1 по 9 пункт. Данные требования будут удовлетворены в ходе исследования, в части формирования модели ГИС.

Результаты анализа показывают, что на сегодняшнее время не существует ГИС направленное на узкоспециализированное изучение Арктического региона, использующее навигационный функционал формирования маршрутов следования объектов в полярных льдах, в зависимости от прогностических геоданных. Более того, из представленных ГИС разработчиков, крайне мало ПО, поддерживающее работу, в базовой комплектации, с мировыми океанами и навигацией. Исходя из вышеизложенного, ставится научная задача о необходимости формирования модели ГИС управления навигацией в Арктическом регионе России.

Во **второй главе** «Разработка моделей прогнозирования состояния обстановки Арктического региона на основе модифицированных алгоритмов рекурсивной фильтрации в сочетании с методикой представления геоданных» приведен обзор существующих методов прогнозирования в интересах навигации, с указанием основных характеристик, недостатков и преимуществ. Исходя из полученного анализа, реализована обобщенная структурная схема алгоритма методов прогнозирования (схема представлена в полном тексте диссертации).

Как результат изучения современных методов сбора и обработки гидрометеорологических данных (ГМД), были представлены модели ИС и технологии обработки геоданных, с возможностью импортирования и экспортирования информации в цифровом виде. Среди множества ИС, согласно задачам настоящего исследования, была отобрана одна – IRI/LDEO DL (Международный научно-исследовательский институт климата и общества университета Колумбия). На основе распределенных БД (РБД) IRI DL, разработана методика представления геоданных (рисунок 1). Реализованная методика, в виде программного комплекса, интегрирована в качестве базовой центральной подсистемы модели ГИС управления навигацией в Арктическом регионе России.

Одной из ключевых базовых составляющих любой ГИС являются данные. Прослеживается определенная зависимость разнородных данных, форм и форматов представления информации, методов их получения, хранения и обработки непосредственно в среде ГИС. В целях дальнейшей апробации полученных результатов, благодаря методам фрактального анализа, встроенного в программное обеспечение (ПО) «Statistica», были выявлены первостепенные взаимозависящие критерии воздействия на Арктическую навигацию. В качестве результатов, наибольшую статистическую зависимость имеют следующие критерии, выбранные для дальнейшей апробации в целях исследования: концентрация морского льда; температура поверхности воды; скорость ветра (зональная составляющая); температура воздуха. При этом, многопараметрические данные по исследуемым критериям, собираются из точек, с координатами: точка А – E81.5° в. д., N74.5° с. ш.; точка Б – E88.5° в. д., N76. 5° с. ш.; точка В – E100.5° в. д., N77.5° с. ш.

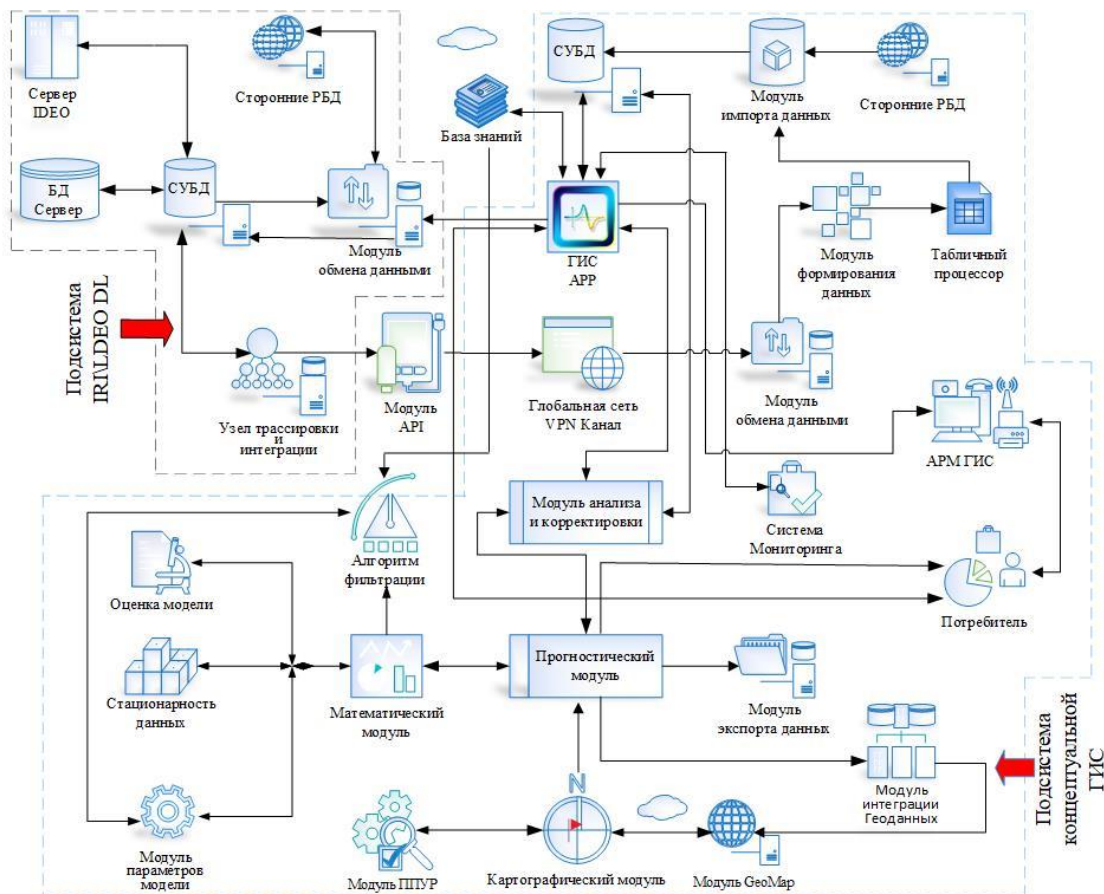


Рисунок 1. Методика представления геоданных для моделей прогнозирования будущего состояния обстановки Арктического региона

Центральной частью исследования, являются разработанные и интегрированные в ГИС модифицированные модели прогнозирования навигационной обстановки Арктической зоны, на основе алгоритмов рекурсивной фильтрации. Согласно указанным требованиям и особенностям, описанным в тексте диссертации, было принято решение использовать алгоритмы, применяемые в оптимальных (линейных) фильтрах. К таким методикам относятся алгоритмы фильтрации Калмана, Левинсона и их усовершенствованные модели.

В целях исследования были модифицированы алгоритмы и реализована ранее не разрабатываемая модель гибридного фильтра. Рассмотрим подробнее:

1. Модель прогнозирования состояния навигационной обстановки Арктического региона на основе модифицированного рекурсивного алгоритма фильтра Калмана-Бьюси.

Данный подход к задаче оптимальной оценки состояния динамической системы отсылает к принципу двойственности, объединяющий стохастическую фильтрацию с детерминированной теорией оптимального управления, что в свою очередь допускает возможность транслирования результатов одной системы на другую.

Именно данный алгоритм оптимальной фильтрации предполагается использовать для оценки краткосрочного прогнозирования, при этом, содержащийся фактор универсальности алгоритма, позволяет фильтр также использовать в долгосрочных прогнозах состояния системы.

Работа линейного фильтра Калмана – Бьюси для реализации предсказаний будущего состояния системы осуществима только, если прогнозируемые процессы в дискретном случае можно описать разностными уравнениями типа:

$$x_t = \Phi(t, t - 1)x_{t-1}, \quad (1)$$

где $\Phi(t, t - 1)$ – переходная матрица, характеризующая структуру x_t , при этом наблюдения должны удовлетворять соотношению:

$$z_t = P_t x_t + \varepsilon_t, \quad (1.1)$$

где P_t – матрица ограничений на наблюдения; ε_t – ошибка наблюдений.

Для того чтобы решить задачу прогнозирования $y(t)$ с помощью фильтра Калмана – Бьюси, необходимо провести зависимость:

$$\tilde{y}_i(t) = \sum_{j=0}^m a_{ij} \phi_j(t), \quad i = \overline{0, n}, \quad (1.2)$$

где a_{ij} - случайные величины; $\{\phi_j(t)\}_{j=0}^m$ – непрерывные детерминированные функции времени в соответствии с выражением (1).

Требуемые преобразования можно осуществить на основе расширения пространства состояний, то есть путем введения новых координат в пространство параметров, определяющих техническое состояние.

Компонентами вектора x_t будут служить коэффициенты a_{ij} (элементы матрицы A выражения (1.2)), отсюда x_t можно сформировать на строк матрицы A , где его размерность будет $l = nm$, где n и m – число строк и столбцов матрицы. При этом $\Phi(t, t-1)$ - единичная матрица размером $l \times l$, а матрица P_t размера $n \times l$ состоит из компонентов вектора $\{\phi_j(t)\}_{j=0}^m$ - детерминированного базиса модели (1.2). Построение P_t можно реализовать последовательным сдвигом по строкам на $i(m+j)$ транспонированного вектора ϕ (i - номер строки матрицы P_t).

Решением уравнений (1) и (1.1) будут известные соотношения, определяющие фильтр Калмана – Бьюси. После преобразования этих соотношений в соответствии с постановкой задачи прогнозирования получим:

$$x_{t+1} = x_t + W_t(z_t - P_t x_t) \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned} W_t &= K_t P_t^T (P_t K_t P_t^T + R_t)^{-1} \\ K_{t+1} &= K_t - W_t P_t K_t, \end{aligned} \quad (1.4)$$

где x_{t+1} - прогнозируемая на момент времени $t+1$ по результатам имеющихся к этому времени наблюдений оценка x (условное математическое ожидание x); x_t - прогнозируемая на момент времени t оценка x ; K_t - ковариационная матрица компонентов вектора x_t ; K_{t+1} - ковариационная матрица компонентов вектора x_{t+1} ; W_t - матрица передачи фильтра; z_t - результаты наблюдений $y(t)$ в момент t ; R_t - ковариационная матрица ошибок измерений ε_t .

Для прогнозирования, то есть для решения выше приведенных уравнений, служат априорные оценки математических ожиданий – коэффициенты a_{ij} , их ковариационная матрица, результаты контроля $y(t)$ и ковариационная матрица ошибок измерений.

Решением поставленной задачи используется модель:

$$y(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2, \quad (1.5)$$

так как выше сказано, что фильтр использует рекуррентную обработку информации, наделяя данный метод адаптивными свойствами, в свою очередь позволяющие применять более простые модели $y(t)$, в частности модель вида:

$$y(t) = A \cdot F(t) \quad (1.6)$$

В первоначальные моменты анализа состояния объекта ГИС нет никакой информации о свойствах изменения его параметров, а входными данными для фильтра Калмана-Бьюси служат априорные оценки математических ожиданий коэффициентов a_{ij} и их ковариационная матрица. При использовании модели (1.5) необходимо получить оценки математических ожиданий коэффициентов a_{ij} и их ковариационную матрицу. Так как в дальнейшем процессе наблюдается изменение параметра по результатам его периодических измерений, то возможно построить зависимость изменения этого параметра по времени и сделать его экстраполяцию.

В соответствии с условиями, необходимыми для работы фильтра Калмана-Бьюси и соотношениями (1.3), ковариационная матрица K_t имеет размерность 3×3 , то есть для ее построения необходимо произвести аппроксимацию зависимости параметра по времени трижды для получения оценок коэффициентов a_{ij} .

Поэтому аппроксимацию зависимости параметра по времени возможно провести следующим способом:

– произвести аппроксимацию в соответствии с моделью (1.5) по первым четырем моментам

контроля, затем по второму, третьему – пятому моменту, и по пяти моментам контроля;

– рассчитать математические ожидания коэффициентов a_{ij} для каждого из отрезков;

– на основании результатов произвести построение ковариационной матрицы K_t .

Таким образом, для реализации прогнозирования по методу оптимальной фильтрации необходимо произвести как минимум пять замеров контролируемых параметров, после чего возможно использовать фильтр Калмана-Бьюси для решения поставленной задачи.

Аппроксимировать зависимость параметра по времени возможно с использованием метода наименьших квадратов или метода экспоненциального сглаживания.

Непосредственно для достижения результатов исходя из целей исследования, так как фильтр Калмана-Бьюси разработан для непрерывных систем, в качестве алгоритма будет использоваться «гибридный» фильтр Калмана, который применяется для экстраполяции состояния системы уравнения прогноза фильтра Калмана-Бьюси с непрерывным временем (формула 1.7), при этом коррекция производится аналогично дискретному фильтру Калмана.

$$P = (F + C)^2 + Q \quad (1.7)$$

В основе фильтра Калмана – Бьюси заложен рекуррентный алгоритм, что дает непосредственную возможность реализовывать его за счет электронно-вычислительной машины (ЭВМ) на высокоуровневом языке программирования и в дальнейшем внедрять в ИС. Разработаем модифицированный алгоритм фильтрации Калмана-Бьюси, в виде структурной блок-схемы (рисунок 2), в целях реализации интегрируемого модуля-библиотеки в МГИСУН управления навигацией в Арктическом регионе России.



Рисунок 2. Структурная блок-схема алгоритма фильтра Калмана – Бьюси

Исходя из задач исследования, матрицы были модифицированы, путем приведения их к разностным коэффициентам: S_0 – первоначальное состояние фильтра, фактически – начальное состояние анализируемой системы; C – коэффициент ошибки предсказания, который в дальнейшем будет перерасчитываться; X – экстраполированное состояние системы; P – оценка дисперсий погрешности вычисленного состояния и ковариации, показывающие выявленные взаимосвязи между параметрами состояния системы; F – коэффициент эволюции системы; Q – коэффициент случайных воздействий на систему; H – коэффициент измерений, связывающий истинный вектор состояния и вектор произведенных измерений; R – коэффициент шума измерений.

Структура алгоритма, была изменена в части присвоения коэффициентов матричным обозначениям, что дает возможность реализовать алгоритм в виде модели цифрового фильтра Калма-Бьюси и провести его апробацию, применив ранее полученные и обработанные геоданные.

В ходе апробации фильтра прогнозирования будущего состояния навигационной обстановки Арктического региона, используются БД по четырем параметрам: концентрация морского льда; температура поверхности воды; скорость ветра (зональная составляющая); температура воздуха.

В качестве визуального результата обработки геоданных (Рисунок 3) модифицированным фильтром, представлен сравнительный анализ исходных и прогностических данных (в виде графика) по двум параметрам (концентрация морского льда и температура поверхности воды). Выборка данных осуществлялась в одной из трех ранее обозначенных точек (точка А – E81.5° в.д., N74.5° с. ш.; акватория Карского моря). С результатами обработки прогностических данных, с помощью модифицированного фильтра Калмана-Бьюси, трех других параметров, в том числе по трём геолокационным точкам, возможно ознакомится в приложении А диссертационной работы.

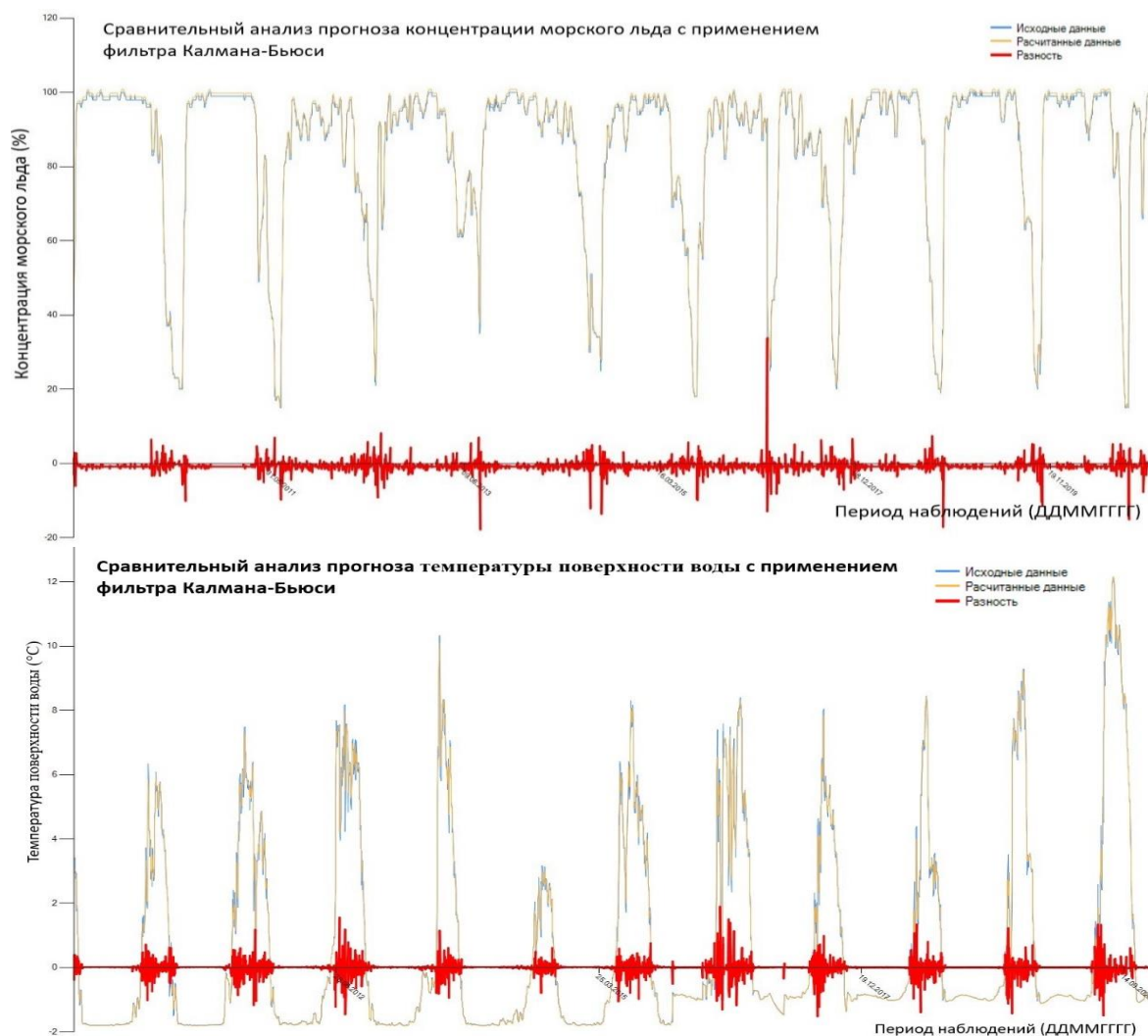


Рисунок 3. Результаты апробации модели модифицированного фильтра Калмана-Бьюси (параметр концентрация морского льда и температура поверхности воды)

Апробация показала, что алгоритм модифицированного фильтра Калмана-Бьюси оправдывает поставленные задачи и условия, при этом не только для решения краткосрочной прогностической оценки, но и в том числе для интерпретации долгосрочного прогноза. Не смотря на общий положительный результат, на графике наблюдается ряд погрешностей, выраженные коэффициентом разности (красная линия). Настройка разности произведена в сторону повышенной чувствительности отклонений, таким образом обрисовываются мельчайшие расхождения. Природа вызванных отклонений зависит от ряда особенностей цифровой фильтрации:

- основополагающим фактором погрешности рассчитанных данных(прогноза) является отсутствие истинного коэффициента внешнего управляющего воздействия. Так как представленные геоданные являются описанием природных процессов, можно утверждать, что такая информация является стохастической. Описать и привести к дискретной форме, природные стохастические данные, для дальнейшей обработки на ЭВМ, задача крайне сложная и требует отдельного исследования, также ряд исследуемых природных процессов взаимосвязан, таким образом, в случае описания одного стохастического параметра, образуется ряд корреляции с другими параметрами. Абсолютным решением данной проблемы предполагается разработка универсально-обобщенного коэффициента ряда взаимосвязанных природных процессов;

- особенность работы сбора ДДЗ Арктического сектора. Полученные данные со спутниковой ГИС имеют пропуски (нулевые значения) в определенный период измерений. Это связано с гидрометеорологической обстановкой ряда параметров, а также объясняется тем, что в указанную дату по координатам исследуемых точек не были произведены измерения спутником ввиду его характеристик пространственного покрытия. В следствие чего, погрешность алгоритма фильтрации Калмана-Бьюси становится маленькой, при этом матрица ковариаций вырождается, после чего не рассчитывается и на графике отображается в виде всплеска.

- линейная несущая фильтра также влияет на коэффициент погрешности. Линейность придает фильтру свойство ограниченности, соответственно для получения наименьшей среднеквадратической ошибки необходимы слишком ограниченные условия (гипотезы). Как пример конвенции – шум является белым и распределен по нормальному закону, математическое ожидание шумов равно нулю, отсутствуют корреляции между шумами и перекрестные связи между фазовыми координатами. Перечисленные выше ограничения можно обойти, но все пути приведут к значимому увеличению вычислительной сложности, так как будет расти размерность задачи и трудностям синтеза фильтра.

Наличие визуализированных результатов, учитывая очевидные положительные аспекты, не являются полноценно завершенной оценкой качества разработанной модели. В целях определения адекватности и качества реализованного алгоритма фильтра, применим общеизвестные фундаментальные математико-статические законы.

Оценка качества модели проводится согласно критериям Стьюдента по следующему математическому алгоритму:

1) Непосредственно критерий рассчитывается по следующему закону:

$$t_a^* = \frac{|a|}{\sigma_a}; t_b^* = \frac{|b|}{\sigma_b}; \sigma_a = \frac{\sigma_y(1-r^2)}{\sigma_x(\sqrt{N-1})}; \sigma_b = \frac{\sigma_y\sqrt{1-r^2}}{\sqrt{N-1}},$$

где σ_a, σ_b – стандартные случайные погрешности расчета коэффициентов a и b ; r – коэффициент корреляции переменных, входящих в уравнение модели; σ_y, σ_x – стандартные отклонения зависимой и независимой переменной, N – длина ряда. После чего необходимо сравнить t^* с $t_{\text{крит}}$.

2) На втором этапе необходимо рассчитать коэффициент детерминации r^2 .

Определение адекватность модели исходным данным рассчитывается по критерию Фишера:

1) Определяются для каждого момента времени рассчитанные по модели значения характеристики (\hat{y}). Соответственно, рассчитываем дисперсию модели:

$$D_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2,$$

где \bar{y} – среднее значение;

2) Далее, для каждого момента времени рассчитываем остатки:

$$E_i = y_i - \hat{y}_i$$

3) Определяем дисперсию остатков E :

$$D_e = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (E_i^2)$$

4) Рассчитываем оценку адекватности модели, по Фишеру (уровень значимости 5%):

$$F^* = \frac{D_{\hat{y}}}{D_E} N$$

Отметить, что стандартной (среднеквадратической) ошибкой модели является условие:

$$\sigma_e = \sqrt{D_e}$$

Реализованная цифровая модель фильтра на основе модифицированного алгоритма Калмана-Бьюси, качественна если: все коэффициенты модели значимы; коэффициент детерминации больше 0,7; модель должна быть адекватна; стандартная ошибка модели σ_e должна быть меньше стандартного отклонения ряда зависимой переменной σ_y .

Для расчета описанной теории, было разработано ПО для ЭВМ на языке С#. Реализованная программа также должна соблюдать условие интегрированности и служить подключаемым компонентом. Результаты оценки качества и адекватности модели приведены на рисунке 4.

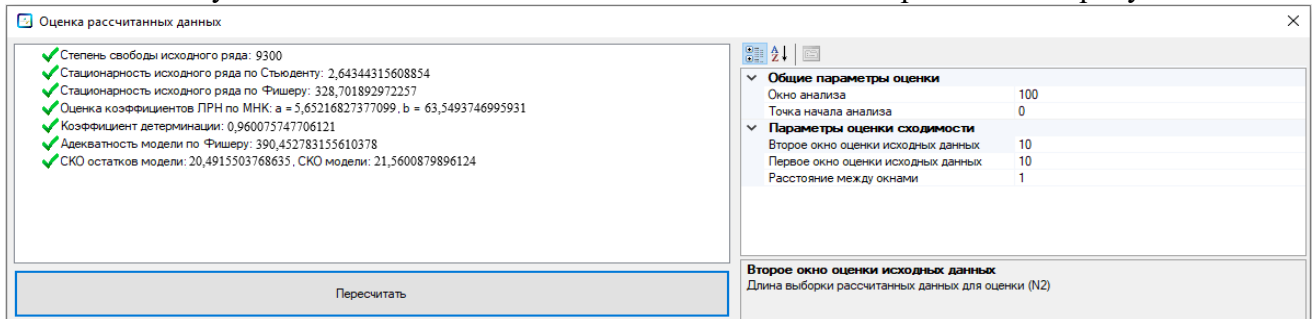


Рисунок 4. Результаты оценки качества и адекватности реализованной модели фильтра Калмана-Бьюси.

2. Модель прогнозирования состояния навигационной обстановки Арктического региона на основе модифицированного рекурсивного алгоритма фильтра Левинсона-Дарбина

Одним из наиболее результативных прогностических методов является решение авторегрессионных моделей, в ходе вычисления которых формируется матрица симметрии. Наилучшим методом решения такой симметрии является применение быстрых алгоритмов, один из которых – алгоритм Левинсона. Отсюда, центральной моделью алгоритма долгосрочного прогнозирования будущего состояния навигационной обстановки Арктического региона, предлагается использовать модифицированную рекурсивную фильтрацию Левинсона-Дарбина.

Алгоритм Левинсона-Дарбина предназначен для расчета матрицы переходных коэффициентов A , используемымся в линейном прогнозе состояния системы. Ведущее назначение матрицы переходных коэффициентов состоит в минимизации среднеквадратической ошибки между прогностической оценкой и актуальным состоянием системы. Модифицируем алгоритм, предельно упрощая и приближая к поставленной практической задаче:

$$E = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\sum_{i=0}^k a_i y_i \right)^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где k – подлежащие дальнейшему вычислению коэффициенты, a_i – i -й коэффициент многополюсной модели (вектор, содержащий коэффициенты кодирования с линейным предсказанием), y – шаг предстоящего расчета.

Переходя к дискретной системе, упростим задачу:

$$\sum_{i=0}^k a_i \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n y_{n+j-i} = 0 \quad (2.1)$$

принимая:

$$R_i = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n y_{n+j-i}, \quad (2.2)$$

как коэффициент автокорреляции между соответствующими состояниями системы переформулируем и модифицируем задачу в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} R_1 & R_0 & \cdots & R_{k-1} \\ R_2 & R_1 & \cdots & R_{k-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{k-1} & R_{k-2} & \cdots & R_1 \\ R_k & R_{k-1} & \cdots & R_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = 0 \quad (2.3)$$

Так как матрица коэффициентов автокорреляции не является квадратной, данная система уравнений не детерминирована. При этом данная матрица коэффициентов автокорреляции сводится к матрице Тёплица, поэтому через ряд преобразований, приходим к аналитическому решению в конечной форме:

$$\begin{bmatrix} R_0 & R_1 & \cdots & R_k \\ R_1 & R_0 & \cdots & R_{k-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_k & R_{k-1} & \cdots & R_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_k \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

где E_k - и есть решение данной задачи.

Полученная матрица, характеризующая состояние системы, представлена в виде симметрии Тёплица. Используем для нахождения матрицы переходных коэффициентов A рекурсивный алгоритм Левинсона-Дарбина.

Суть рекурсивного алгоритма состоит в том, чтобы на первом шаге вычислить параметр a_1 для примитивного случая перехода системы из начального состояния в S_0 наблюдаемое S_1 , и далее, методом последовательного приближения, вычисляются недостающие элементы матрицы A .

Подход Левинсона-Дарбина заключается в использовании свойства взаимной корреляции элементов матрицы переходных коэффициентов, доказательства и преобразования опустим, получаем:

$$\begin{bmatrix} R_0 & R_1 & \cdots & R_k \\ R_1 & R_0 & \cdots & R_{k-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_k & R_{k-1} & \cdots & R_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 + \lambda a_k \\ a_2 + \lambda a_{k-1} \\ \vdots \\ a_k + \lambda a_1 \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_k + \lambda \sum_{j=0}^k a_j R_{k+1-j} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \sum_{j=0}^k a_j R_{k+1-j} + \lambda E_k \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Таким образом, вычислительная задача сводится к нахождению на каждом шаге коэффициента корреляции переходов λ и последовательной корректировке элементов вектора A .

Результатом вычисления первого шага является система:

$$a_1 = -\frac{R_1}{R_0} \quad (2.6)$$

$$E_1 = R_0 + a_1 R_1$$

Используем формулы расчета на каждом последующем шаге k :

– Расчет коэффициента корреляции переходов:

$$\lambda = \frac{-\sum_{j=0}^k a_j R_{k+1-j}}{E_k}, \quad (2.7)$$

– Корректировка матрицы A (дополнительные матрицы U и V введены для экономии места и соблюдения математической корректности выражения):

$$A_{k+1} = U_{k+1} + \lambda V_{k+1}; \quad (2.8)$$

– Корректировка E_k :

$$E_{k+1} = E_k + \lambda \sum_{j=0}^k a_j R_{k+1-j} = (1 - \lambda^2)E_k \quad (2.9)$$

После формирования матрицы A она используется в качестве коэффициентов КИХ – фильтра (фильтр с конечной импульсной характеристикой) для линейного предсказания состояния исследуемой системы.

Определив все коэффициенты и компоненты алгоритма предиктора, произведём апробацию. Аналогично рассмотренному применению модифицированного фильтра Калма-Бьюси, разработаем программу на ЭВМ в среде MS Visual Studio Community 2019 в виде подключаемой библиотеки. Алгоритм реализации фильтра Левинсона-Дарбина представлен блок-схемой (рисунок 5).

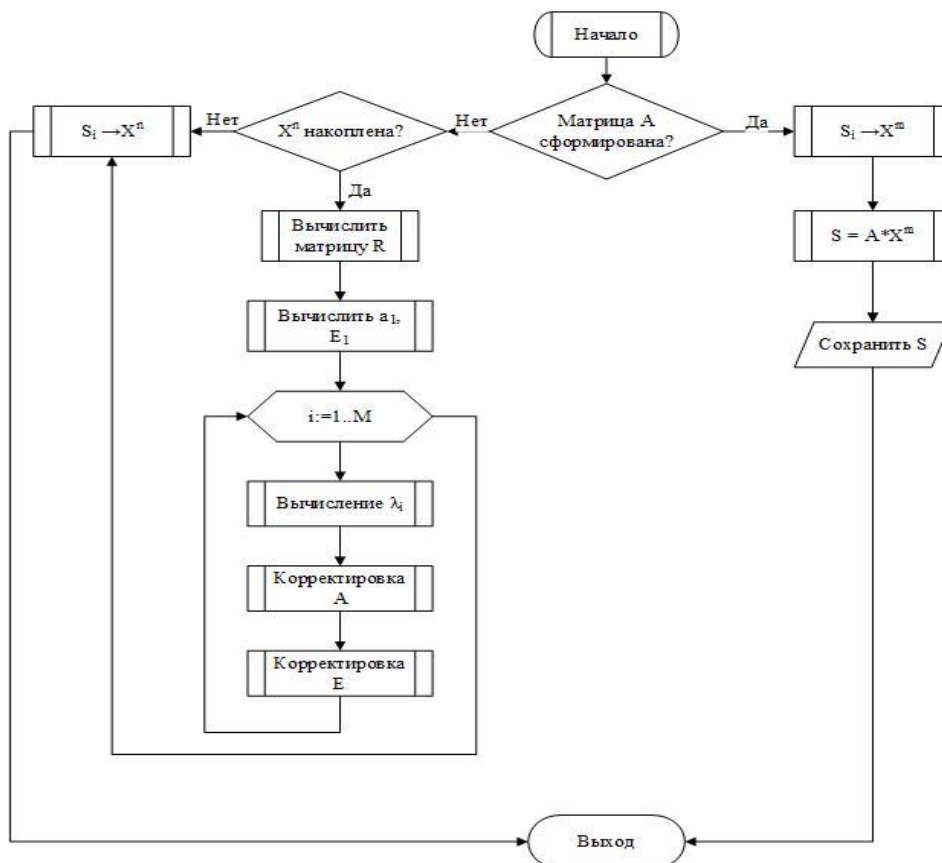


Рисунок 5. Структурная блок-схема алгоритма фильтра Левинсона-Дарбина

Итоговые результаты работы фильтрации Левинсона-Дарбина представлены на рисунке 6. С результатами обработки прогностических данных, трех других параметров, в том числе по трём геолокационным точкам, возможно ознакомится в приложении А диссертационной работы.

Прогностическая составляющая оценки экстремальных гидрометеорологических составляющих, отображенных на графике, а также в экспортируемом файле (в дискретно-табличной форме), показывают минимальное расхождение между априорными и рассчитанными данными.

Анализируя график (рисунок 6), видно, что на первых временных этапах вырождалась разность (красный цвет) исходных и прогнатических показателей, являющаяся уникальной особенностью работы фильтра, источником которой является окно первичной настройкой фильтра. На фильтр подаются данные, которые затем анализируются внутренним математическим аппаратом, в ходе которого определяются будущие оптимальные параметры настройки работы алгоритма. Как только фильтр завершил анализ данных на входе, параметры его системы рекурсивного алгоритма настроились, на выходе можно наблюдать достаточно схожие прогностические данные по отношению к исходным. В дальнейшем, в ходе формирования ГИС, предвидится управления данной уникальностью, путем указания значений окна настройки (чем

больше окно настройки – тем выше точность прогнозируемых результатов). Положительной особенностью алгоритма является глубина фильтра. Если обобщить – это означает, что, подавая на вход исходный ряд длиной 10 лет, на выходе мы получаем прогностическую оценку длиной в 5 лет, что является половиной глубины системы фильтра, в свою очередь, с точки зрения климатологии, данная характеристика является долгосрочным прогнозом.

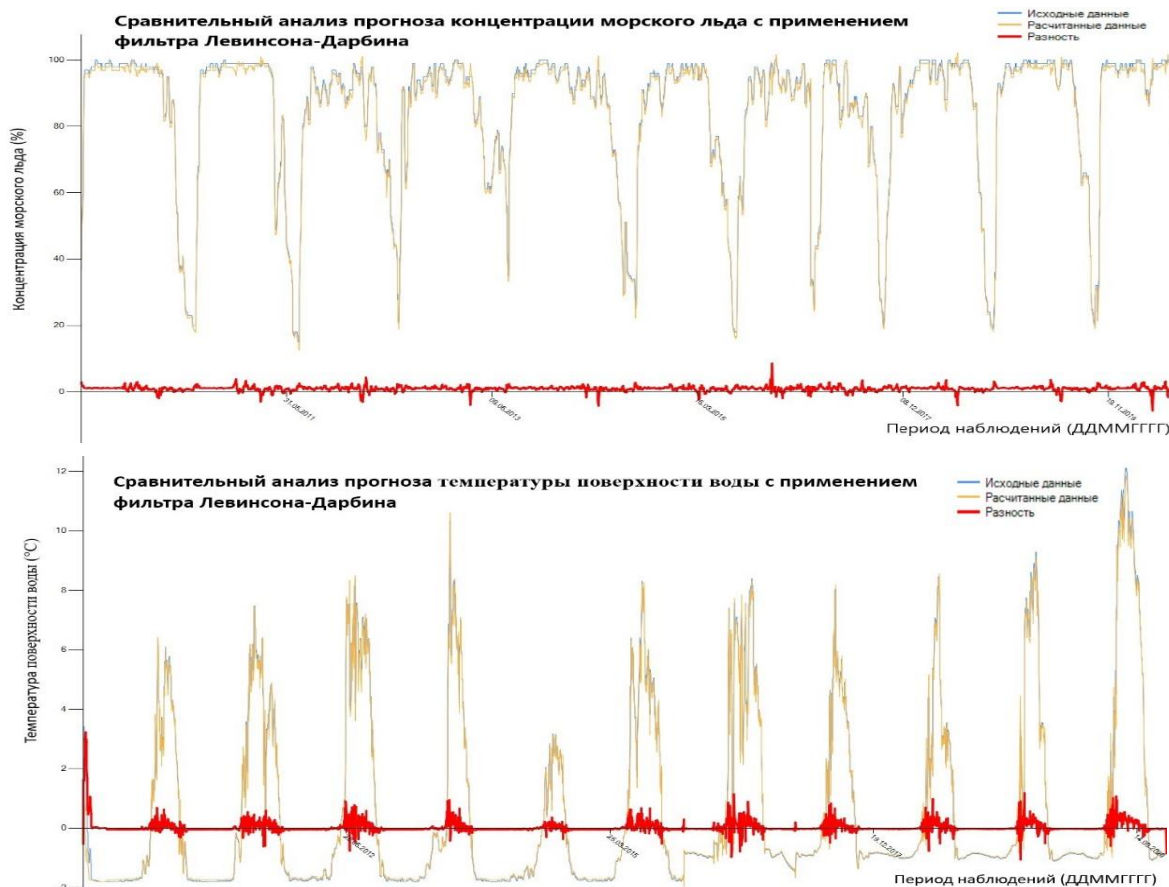


Рисунок 6. Результаты апробации модели модифицированного фильтра Левинсона-Дарбина (параметр температура поверхности воды и концентрация морского льда)

Стоит отметить, что погрешности и разность измерения, обуславливается также сложностью описания всех стохастических природных процессов математической моделью, для будущей прогностики. Более того, отрицательной стороной модели является работа с нулевыми данными именно на входе. При подачи таких данных, даже устанавливая большое значение окна настройки, параметры фильтра не устанавливаются, расчет происходит с ошибкой, при этом существует вероятность, при которой матрица не вырождается, как итог – значения разносятся в системе.

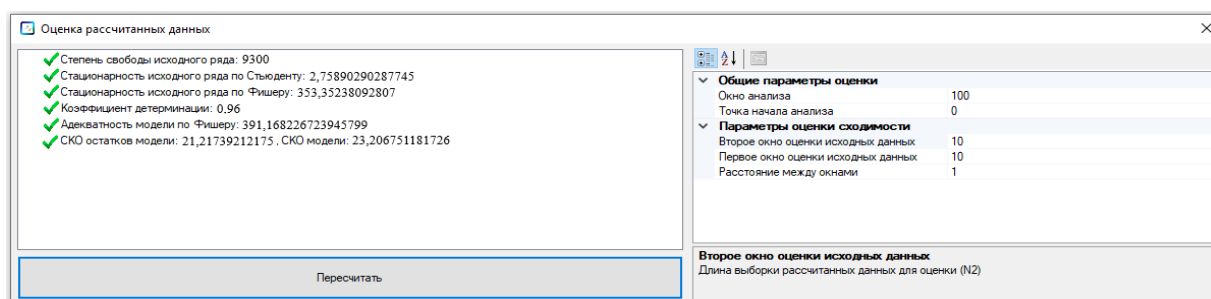


Рисунок 7. Результаты оценки качества и адекватности реализованной модели фильтра Левинсона-Дарбина.

Как в случае с реализованной моделью фильтра Калмана-Бьюси, модель модифицированного фильтра Левинсона-Дарбина подвергается оценке адекватности и качества (рисунок 7).

3. Модель универсального фильтра прогнозирования будущего состояния навигационной обстановки Арктического региона на основе совмещенного алгоритма Калмана-Левинсона

Результаты анализа существующих методов прогнозирования показали, что фильтры цифровой обработки сигнала (ЦОС) практически никогда не применялись в исследуемой сфере. Одним из основополагающих факторов является крайне сложное математическое описание взаимозависимых стохастических природных процессов. Тем не менее, результаты апробации реализованных моделей, исключая воздействия внешних факторов, показали весьма положительный результат. С целью достижения универсальности, а также максимально возможной точности прогностической оценки будущего состояния системы, не зависев от факторов природного происхождения, необходимо разработать модель нового гибридного фильтра. Моделью такого фильтра будет являться математическая составляющая базирующаяся на совмещении алгоритмов Калмана-Бьюси и Левинсона-Дарбина. Для упрощения терминологии, гибридный фильтр будет именоваться как фильтр Калмана-Левинсона.

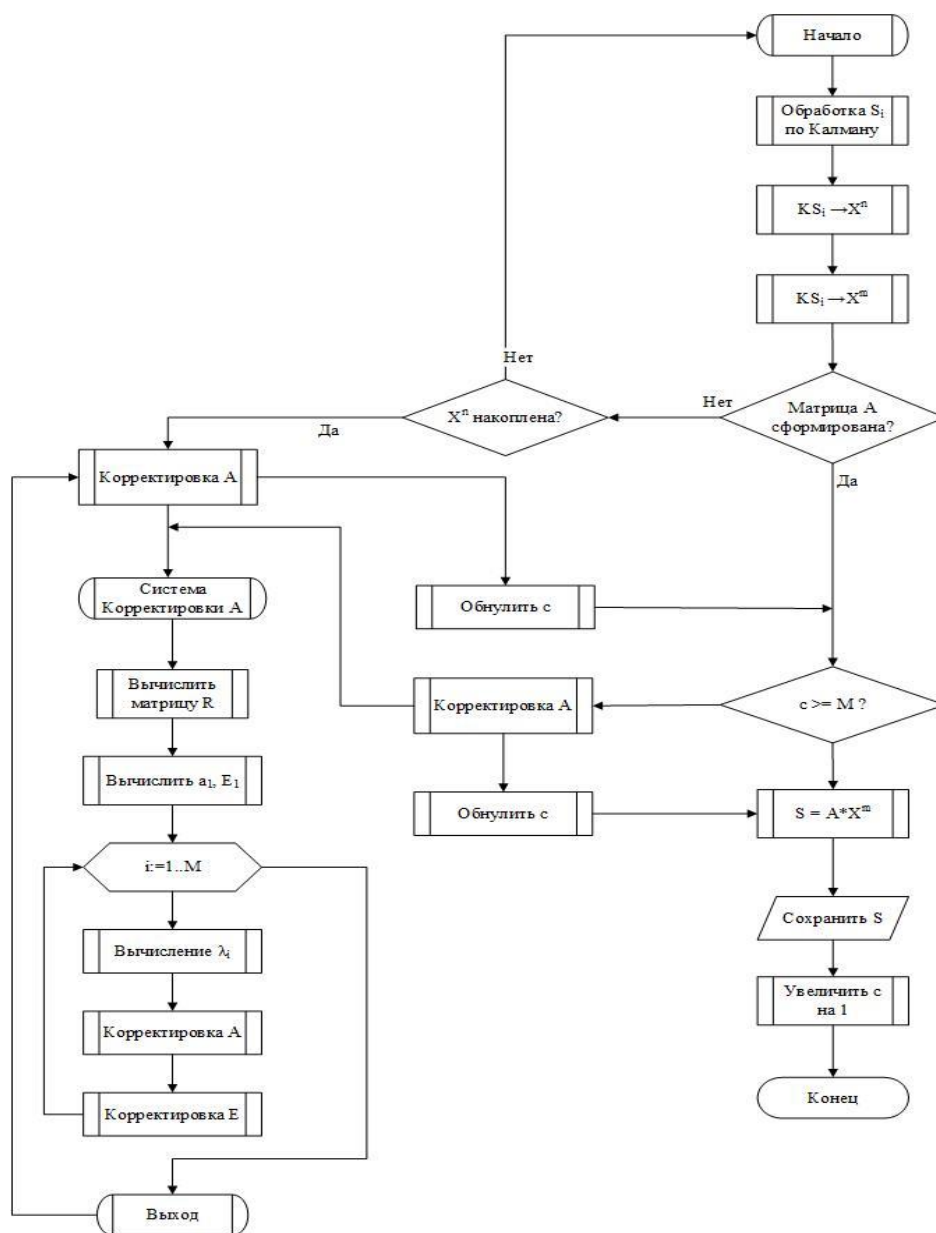


Рисунок 8. Концептуальная блок-схема алгоритма совмещенного фильтра Каламана-Левинсона

Проанализировав все возможные информационные источники, можно утверждать, что по настоящее время гибридный алгоритм не разрабатывался ранее и не существует, что лишний раз подтверждает уникальность исследования. В основу реализации модели гибридного фильтра заложены два независимых алгоритма, при этом новый совмещенный математический алгоритм не разрабатывается. Сравнение двух моделей цифровых фильтров (Калмана и Левинсона) обусловлено исключительно на программном уровне.

Так как основополагающая работа фильтра направлена на его программную реализацию, рассмотрим концептуальный алгоритм в виде блок-схемы (рисунок 8).

В основе совмещенного фильтра заложен алгоритм, при котором процессы реализованных фильтров работают последовательно. Это означает, что при подаче геоданных на вход, программа определяет последовательность подключения того или иного фильтра. Так если на вход подаются нулевые значения, или значения, не поддающиеся настройке фильтра Левинсона-Дарбина, то происходит переключение на фильтр Калмана-Бьюси. После того, как фильтр закончил расчет, получившиеся данные подаются на вход ранее не используемого фильтра, для дальнейшей корректировки. Соблюдая необходимые условия выходных данных и подавая на вход объемное количество информации, подключается фильтр Левинсона-Дарбина, и дальнейшая обработка происходит с точностью наоборот.

На представленной схеме определенно прослеживаются два условно независимых алгоритма, представленных ранее в виде блок-схем. Существует ряд разработанных переменных, необходимых для анализа и обработки импортируемых геоданных.

Перечислим нововведённые коэффициенты переменных: N – длина инициализирующей выборки Левинсона (окно «обучения»), где X^n – выборка; M – длина фильтра Левинсона (окно анализа), где X^m – регистр фильтра; S_i – текущий отсчет; KS_i – выход фильтра Калмана; c – счетчик входных отсчетов для Левинсона; S – выходное значение.

В качестве апробации разработано ПО в виде подключаемой библиотеки, как и ранее используя среду MS Visual Studio Community 2019, на языке программирования C#. Зададим по умолчанию следующие входные параметры: N – длина инициализирующей выборки (окно «обучения»), где X^n – выборка; M – длина фильтра (окно анализа), где X^m – регистр фильтра; S_i – текущий отсчет.

Эксперимент синтезирования разработанной модели совмещенного цифрового фильтра Калмана-Левинсона реализуется на основе полученных ранее геоданных, используемых в двух предыдущих фильтрах (параметры: концентрации льда, температуры поверхности воды). Как и в предыдущем эксперименте, в качестве визуального результата (рисунок 10) работа фильтра представлена по двум параметрам в одной локационной точке. С результатами обработки прогностических данных трех других параметров, в том числе по трём геолокационным точкам, возможно ознакомится в приложении А к полному тексту диссертационной работы.

Результаты апробации весьма впечатляют. Прежде чем проводить анализ полученных данных, оценим реализованную модель на предмет качества и адекватности критериями Стьюдента и Фишера (рисунок 9). Применяв разработанное приложение, получаем вполне ожидаемый результат – модель отвечает по всем критериям качества и адекватности.

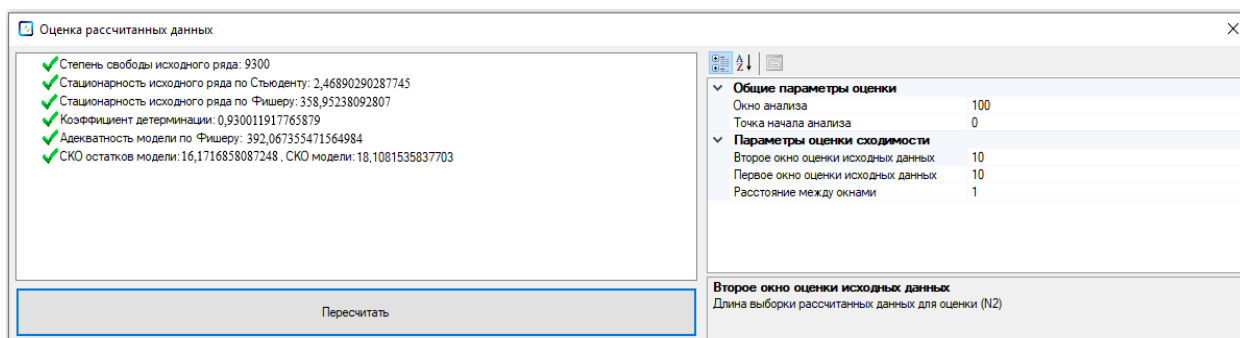


Рисунок 9. Результаты оценки качества и адекватности реализованной модели фильтра Калмана-Левинсона

Разность, отраженная на графике, между априорными значениями и результатом прогноза фильтра Калмана-Левинсона сведена к минимуму, в большинстве случаев отсутствует. Сходимость значений в табличной форме более 80% (в отдельных измерениях показатель достигает 98%) в независимости от временного признака прогноза (начиная от краткосрочных прогнозов и заканчивая сверхдолгосрочными), что подтверждает факт универсальности алгоритма фильтрации.

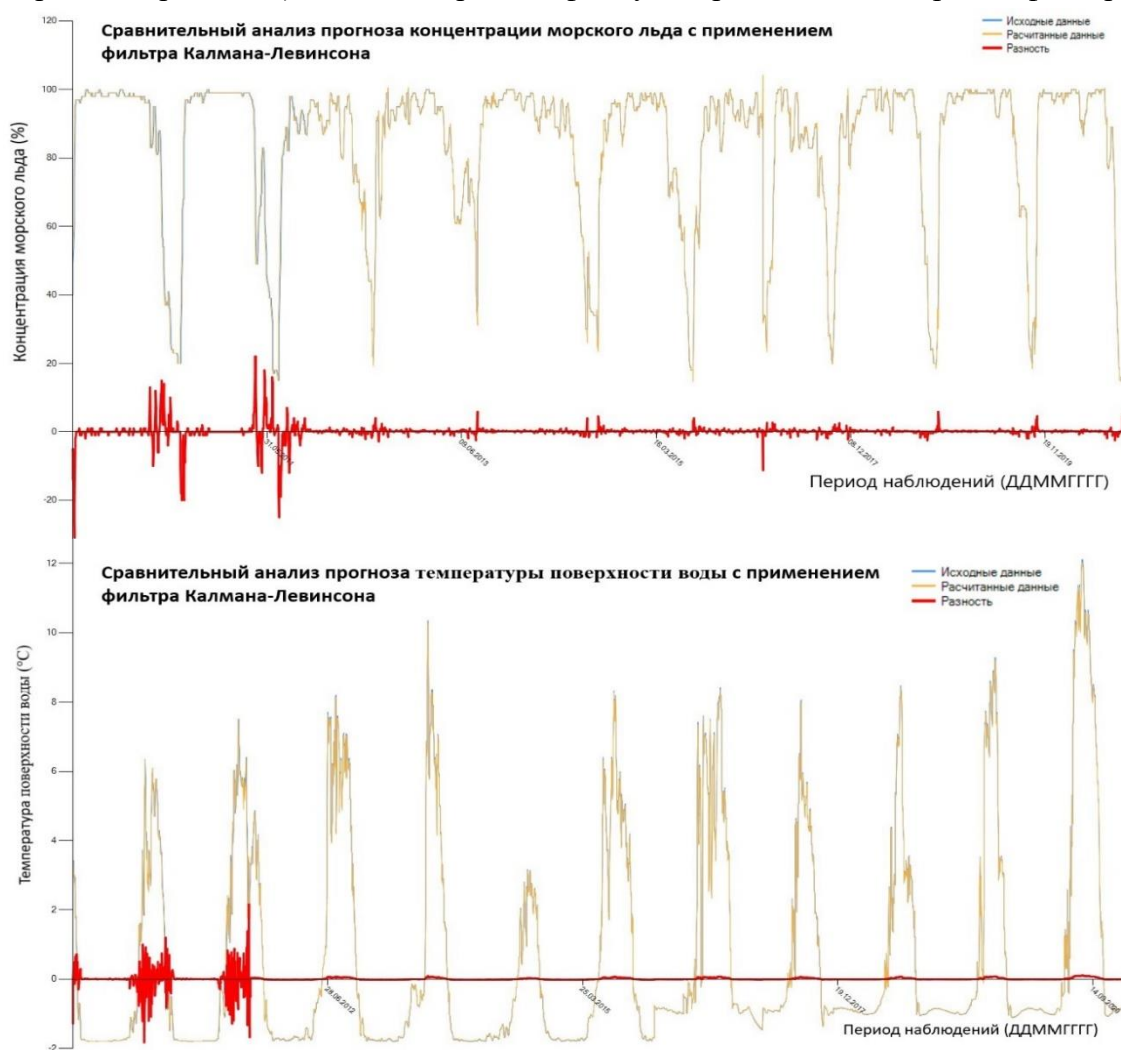


Рисунок 10. Результаты апробации прогностической модели (концентрация морского льда и температура поверхности воды)

Несмотря на то, что данный эксперимент показал весьма высокий процент точности, существуют специально отобранные геоданные (прошедшие отдельную апробацию), применение которых не выявляет такой результат. Также стоит отметить имеющуюся погрешность. Основными факторами погрешности являются: применение цифрового фильтра на программном уровне, в основе которого лежит последовательная обработка геоданных; так как алгоритмы фильтрации не были изменены, оказываются воздействия факторов погрешности, присущие всем фильтрам, описанные ранее. Решением данных «задач» является разработка совмещенного фильтра, основанного на «умном», параллельном подключении взаимосвязанных алгоритмов фильтрации, зависящих непосредственно от загружаемых значений в режиме реального времени. Подход требует создания нового единого математического аппарата и полной переработке алгоритмов.

Стоит отметить, что используемые во всех моделях геоданные имеют стационарный ряд, что отражено в реализованном ПО. Условие стационарности ряда необходимо для моделирования параметрической системы и дальнейшей оценки эффективности. Проверка стационарности осуществляется следующим образом:

1. Данные ряда, относительно математическому ожиданию (среднему), проверяются по критерию Стьюдента (при уровне значимости 5%):

$$t^* = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{N_1 D_1 + N_2 D_2}} \sqrt{\frac{N_1 N_2 (N_1 + N_2 - 2)}{N_1 + N_2}},$$

где D_1, D_2 – дисперсия двух частей выборки, N_1, N_2 – длины соответствующих частей ряда.

2. Относительно дисперсии ряда выполняется проверка по критерию Фишера (при уровне значимости 5%):

$$F^* = \frac{D_1}{D_2},$$

где D_1, D_2 – дисперсия двух частей выборки.

Сравнительная оценка данных производится интегрированными в программный комплекс таблицами: критических значений по Стьюденту на уровне значимости 0,10; 0,05; 0,01 и F-критерии по Фишеру при уровне значимости $\alpha = 0,05$. В случае если ряд нестационарен, в качестве математического аппарата, сведения ряда к стационарности, используются методы регрессионного анализа, скользящих средних и разностных операторов.

В третьей главе «Модель геоинформационной системы управления навигацией в Арктическом регионе Российской Федерации» формируется ГИС на основе разработанных модифицированных алгоритмов прогностических моделей и методики представления геоданных, описанных во второй главе. Проведена апробация МГИСУН, как ИС поддержки принятия управленческих решений в навигации, с последующим визуально-картографическим отображением результатов эксперимента.

В ходе формирования МГИСУН был определен спектр основных задач и поставлены условия функционирования такой системы. Выявлено, что пользователь является центральным субъектом управления ПО. Следовательно, на первом шаге, принято решение разработать модель в виде диаграммы прецедентов (use-case) (рисунок 11), отражающая связь между экторами и прецедентами, где эктор – конечный потребитель системы, а прецеденты – функциональные возможности моделируемой системы (один прецедент описывает один сервис системы). Разработка модели диаграммы синтезирована на унифицированном языке моделирования UML в среде облачного сервиса «diagrams.net».

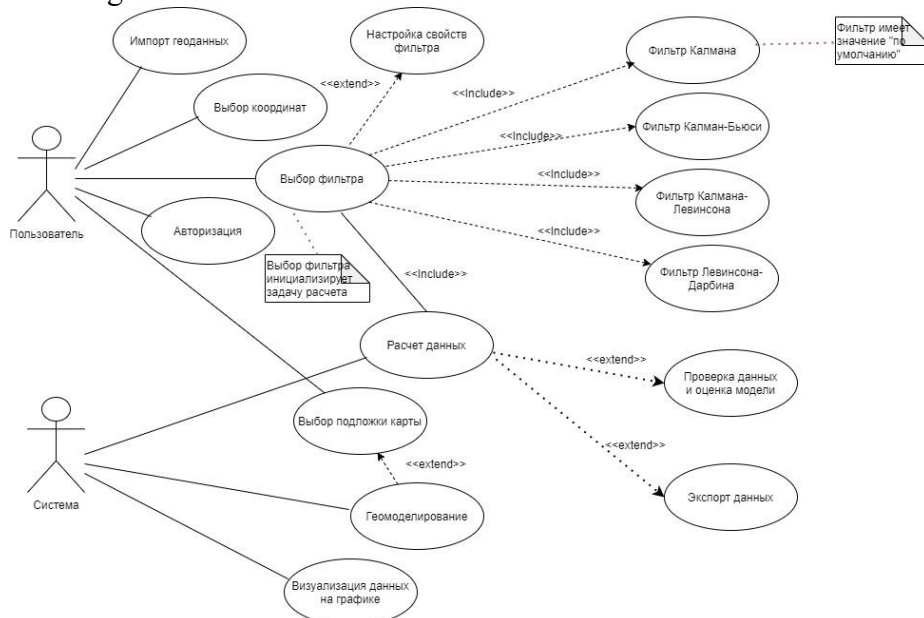


Рисунок 11. Диаграмма прецедентов обобщенной структуры МГИСУН

Благодаря диаграмме прецедентов пользователь может наблюдать обобщенное поведение компонентов ИС, а также, с точки зрения проекта, возможно обозначить будущие функциональные элементы системы.

Следующим шагом, имея обобщенное представление функций МГИСУН, а также спектр задач, которые должна выполнять ИС, необходимо обозначить основные этапы разработки программного интерфейса модели ГИС.

Формирование МГИСУН состоит из следующих уровней: анализ спецификаций, условий и задач, предъявляемых к ГИС; обозначение всех функциональных параметров системы; проектирование системы; вёрстка программного кода; многостороннее тестирование системы; внедрение, эксплуатация и поддержка.

Рассмотрев основные этапы концепции разработки ПО и обозначив исходные задачи ГИС, разработана детальная структура всех компонентов МГИСУН с комплексированием картографических технологий поддержки решения навигации в Арктике (рисунок 12). Для формирования модели используется среда офисного пакета прикладного ПО Microsoft Office 2019 Professional Plus, компонент MS Visio Professional.

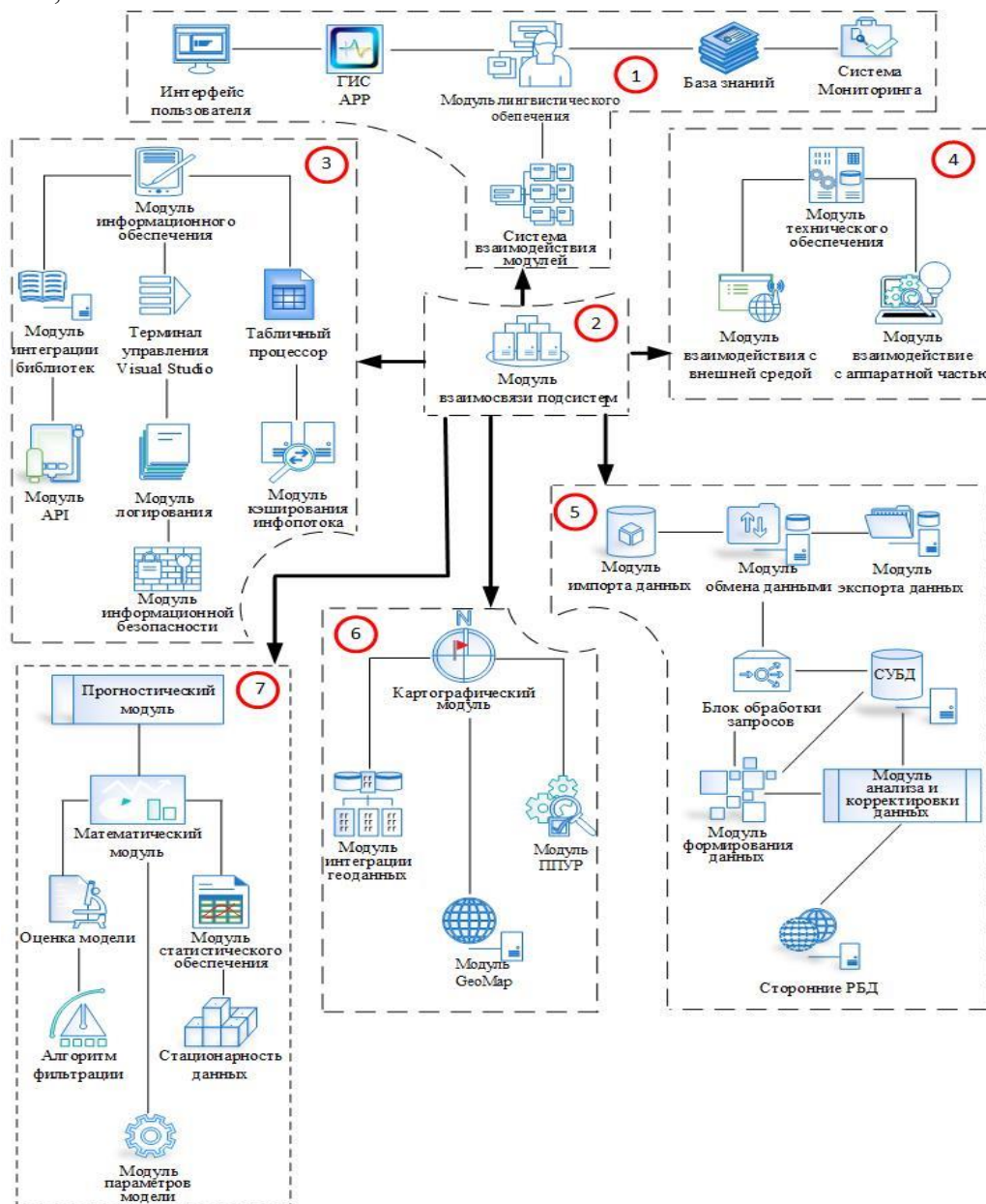


Рисунок 12. Структурные компоненты модели геоинформационной системы управления навигацией в Арктическом регионе Российской Федерации

Структура МГИСУН подразумевает взаимодействие семи функциональных узлов – подсистем (нумерация в красном круге): 1) подсистема программного обеспечения; 2) подсистема структурированного взаимодействия; 3) подсистема информационного обеспечения; 4) подсистема технического обеспечения; 5) подсистема представления геоданных; 6) подсистема геомоделирования; 7) подсистема математико-аналитического обеспечения.

Обозначив детально все структурные и функциональные компоненты МГИСУН, спроектирована UML модель в виде диаграммы детальности (рисунок 15) (activity diagram), с целью интерпретации спецификаций исполняемого поведения системы в виде координированно-последовательного и параллельного выполнения подчинённых элементов – действий, соединённых между собой потоками, идущие от выходов одного узла ко входам другого. Данная диаграмма отражает динамическое поведение системы.

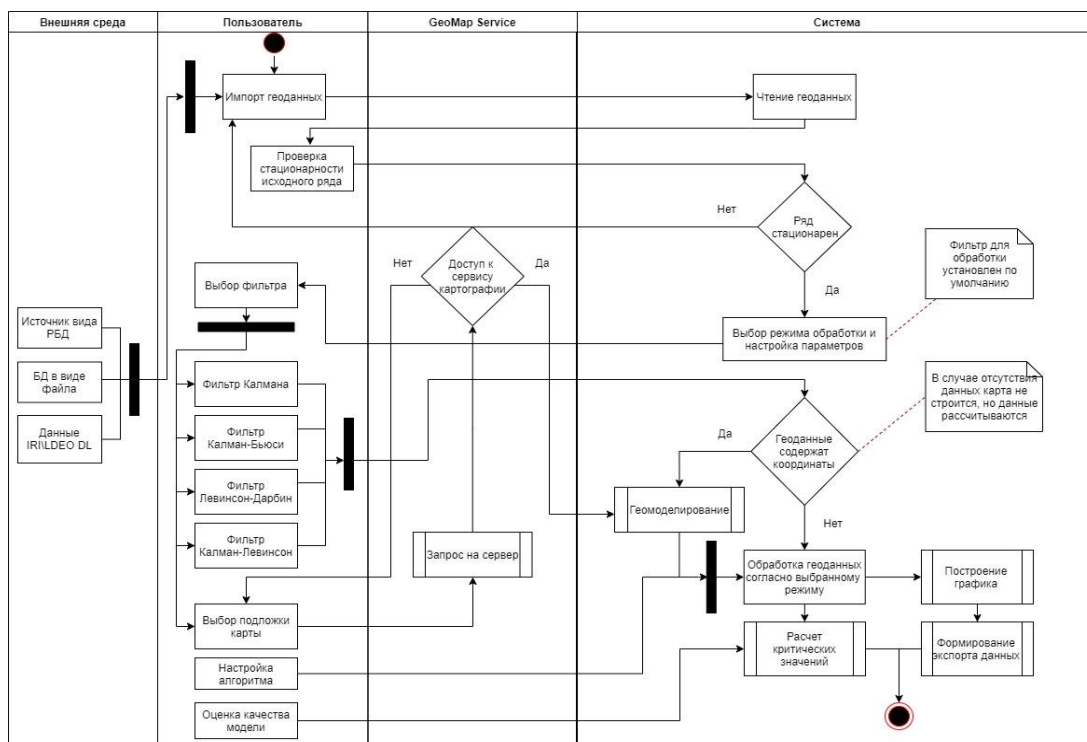


Рисунок 13. Диаграмма деятельности модели геоинформационной системы управления навигацией

На представленной UML модели отражена динамическая зависимость отклика системы на поведение деятельности пользователя. Так при импортирование пользователем данных, система отвечает их чтением, после чего инициируется проверка данных на стационарность. Если ряд данных стационарен, система производит отклик в виде выбора режима обработки и настройки параметров. В тоже время, на стороне пользователя проецируется выбор одного из четырех фильтров, как системы прогнозирования.

После утверждения выбранного фильтра, система отвечает условием на наличие координат в геоданных. Построение карты производится путем взаимодействия с деятельностью пользователя (выбор подложки) через объект GeoMap Service, в свою очередь отправляющий запрос на доступ к сервису картографии и в случае недоступности последнего, объект GeoMap Service направляет пользователя на очередной выбор подложки.

При инициирование пользователем настройки алгоритма фильтрации, система вновь отвечает обновленной обработкой геоданных, далее строит график и обеспечивает экспортирование данных. Если пользователю необходимо оценить качество модели или проверить её адекватность, система произведет расчет критических значений и предоставит таковые на выход.

Стоит отметить, что в деятельность «выбор режима обработки и настройка параметров» установлен один из фильтров по умолчанию, с целью избегания пустых данных, параллельно подаваемых на расчет. Также построение карты не влияет на работу прогностических операций. Отсутствие карты не сказывается на прогнозе.

Более того, на диаграмме, по мимо трех объектов (Пользователь, GeoMap service, Система), присутствует объект «Внешняя среда», содержащий деятельности: «Источник вида РБД», «БД в виде файла» и данные IRI\LDEO DL. Данный объект является внешним источником данных и взаимодействует с пользователем посредством деятельности «Импорт геоданных».

Одним из завершающих этапов формирования МГИСУН является непосредственно разработка ПО на высокоуровневом языке программирования. Определив основные компоненты, взаимодействие и поведение системы с пользователем, а также описав технические и системные требования МГИСУН, разработан алгоритм центральной системы процессов ГИС в виде блок-схемы (рисунок 14).

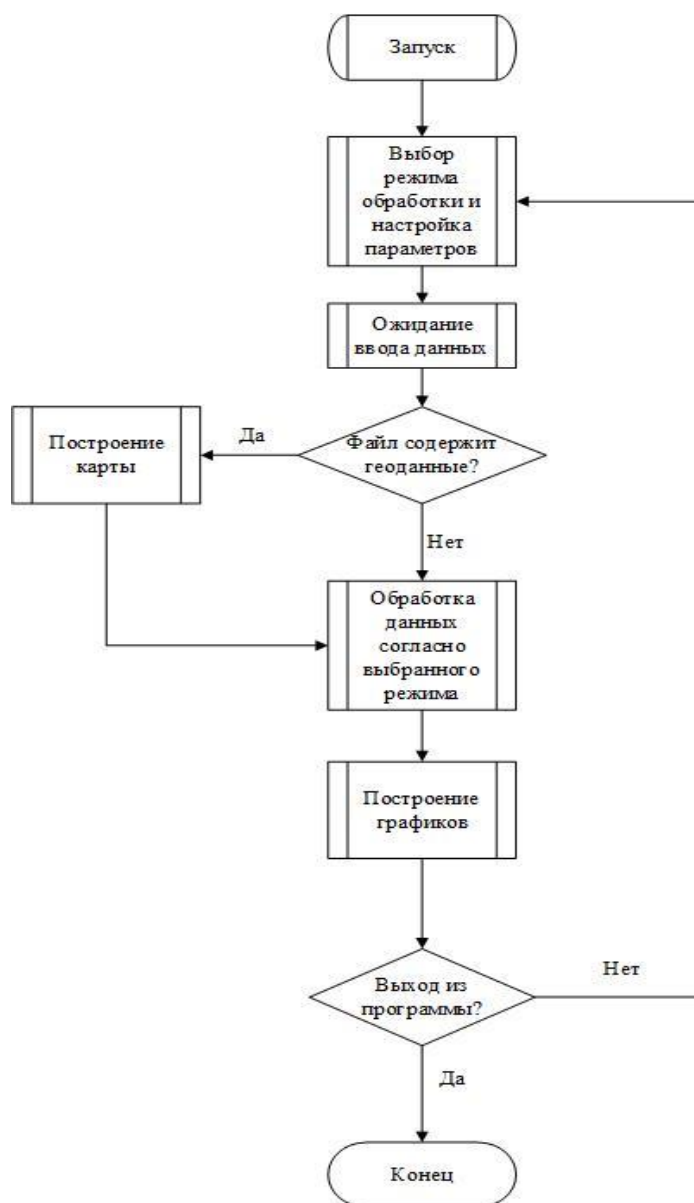


Рисунок 14. Блок-схема алгоритма центральной системы процессов МГИСУН

Все компоненты МГИСУН, разработаны независимыми модулями в виде библиотек и не отображаются в развернутом виде на представленной блок-схеме. Такой подход имеет особое преимущество, заключающаяся в том, что сторонние независимые компоненты в виде библиотек допускаются к интегрированию в существующую модель и проект ПО с уже используемыми компонентами. Центральной системой процессов ГИС, алгоритм работы которой изображен на блок-схеме (рисунок 14), является такой моделью, в которую будут интегрированы ранее разработанные библиотеки.

Особое внимание стоит уделить интеграции методики представления геоданных для моделей прогнозирования. Работа с геоданными несет в себе первостепенный характер, отражающий всю дальнейшую поведенческую модель системы. Ошибки в представлении данных крайне нежелательны. В связи с этим, отдельно разработан алгоритм в виде блок-схемы (рисунок 15),

представленный на программном уровне библиотекой. Приведенные на блок-схеме процессы определяют поведение системы относительно работы с геоданными. На входе импортируемого файла БД, в системе синтезируется его проецирование в таблицу БД OLE, посредством табличного процессора. БД OLE является COM-интерфейсом, в свою очередь обеспечивающий приложениям унифицированную работу с данными разнотипных источников информационного потока. После чего определяется количество столбцов в БД. В случае, если БД использует два столбца, то система передает таковые на процесс обработки в подсистему математического обеспечения. Если используются четыре столбца, то данные проходят ряд этапов. Наиболее значимым этапом является подготовка координированных данных или как отмечено на блок-схеме «сортировка массива данных по долготе», результаты работы которого передаются на сторонний картографический сервис «сборка GeoMap». Сервис анализирует и структурирует пространственно-координированные геоданные для дальнейшей передачи их на прогностическую обработку и проецирования на карту.

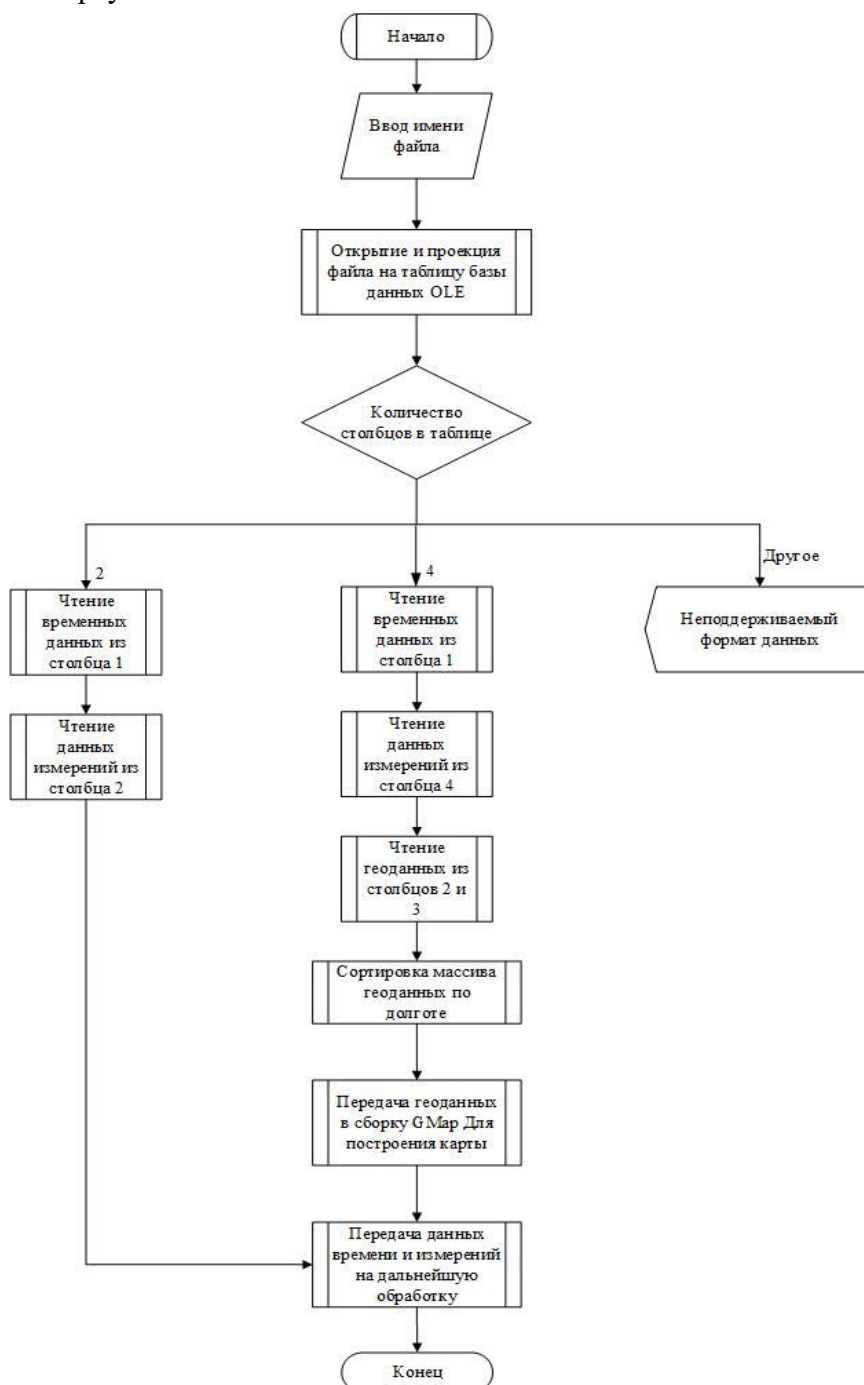


Рисунок 15. Блок-схема алгоритма методики представления геоданных для моделей прогнозирования

Результирующим этапом формирования МГИСУН является верстка программного кода с последующей апробацией графического интерфейса пользователя (ГИП). ГИП МГИСУН делится на две крупные базовые составляющие: окно алгоритмического обеспечения, результаты работы которого представляются в виде графика функции прогнозирования геоданных (рисунок 16); окно геомоделирования, результаты работы которого представлены в картографическом виде системы поддержки принятия управленческих решений (рисунок 17).

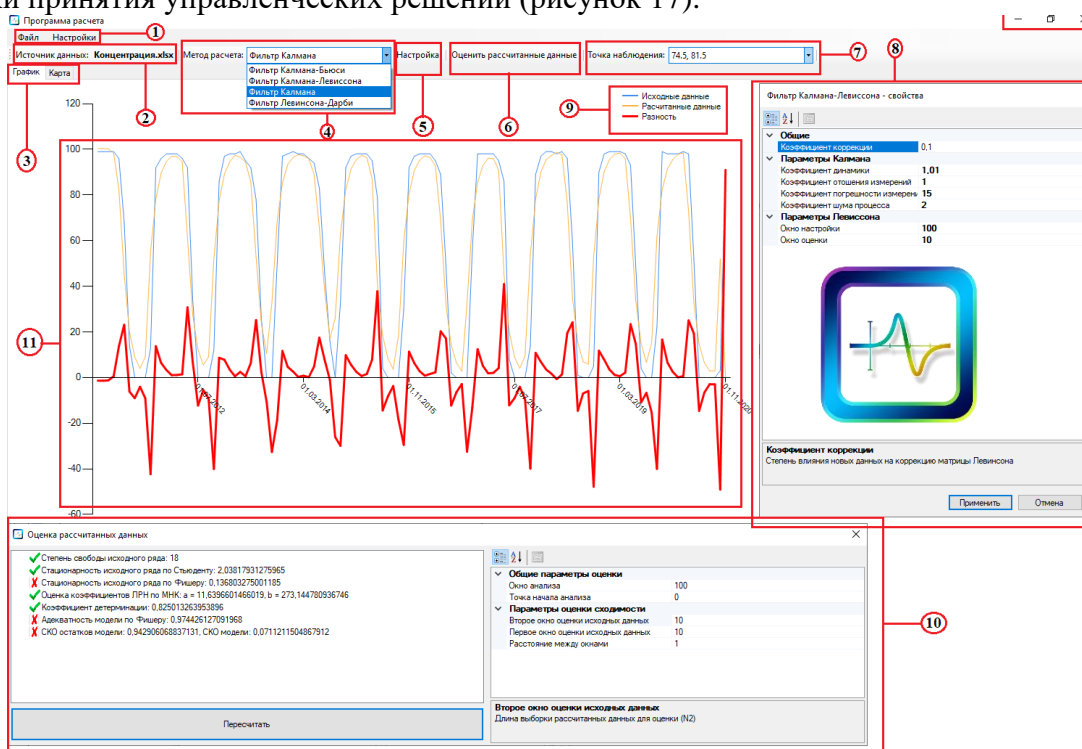


Рисунок 16. Графический интерфейс пользователя модели геоинформационной системы управления навигацией в Арктическом регионе Российской Федерации

Функции интерфейса окна алгоритмического обеспечения представлены в виде 11 компонентов: 1) Меню управления ПО; 2) Команда «Источник данных»; 3) Окно вкладок; 4) Команда «Метод расчета данных»; 5) Кнопка «Настройка»; 6) Команда «Оценить рассчитанные данные»; 7) Меню точка наблюдения; 8) Интерфейс окна параметрических свойств алгоритмов; 9) Легенда; 10) Интерфейс окна оценки данных и модели; 11) График функции прогнозирования.

Широкое применение ГИС нашли в системах прогнозирования поддержки принятия управленческих решений (ПППУР). Системы позволяют давать прогностическую оценку резонансным событиям, полагаясь на обособленные данные, результаты которых представлены в виде многопараметрической картографической модели. В функциональные задачи систем ПППУР входят: прогнозирование будущего состояния системы; планирование, на основании прогноза; контроль поведения системы. Фундаментом систем ПППУР является возможность обеспечивать информацией о прошлом, настоящем и будущем, а также всей связующей составляющей с данными критериями.

Разработанная МГИСУН предполагает использование системы ПППУР, базирующаяся исключительно на программной реализации, сочетающая в себе комплексирование алгоритмов цифровой рекурсивной фильтрации статистических данных для прогнозирования и оценки качества исходной информации. Интерфейс системы ПППУР, являющейся частью ГИС, представленный в картографическом виде, изображен на рисунке 17. Система состоит из четырех составных элементов управления: 1) Подложка карты.; 2) Элемент «Провайдер»; 3) Шкалы, в виде цветных градаций, исследуемых параметров; 4) «Период наблюдения».

Функциональная работа подсистемы геомоделирования, как комплекса ПППУР, заключается в следующем: на вход МГИСУН подаются геоданные, после чего выбирается алгоритм обработки (фильтр прогнозирования). Параллельно выбирается точка наблюдения, при этом, в

случае навигационного обеспечения, есть возможность выбрать ряд точек. Такая возможность реализуется за счет интерфейса ПО, а также, при наличии в исходном файле нескольких геопространственных координат. Если будет выбрана одна точка наблюдения, результатом будут служить, отображенные на карте, цветовой (растровой) градацией, спрогнозированные параметры исследуемых пространственно-координированных геоданных. В случае, если количество точек наблюдения выбрано несколько, то в каждой точке синтезируется вышеописанный алгоритм, после чего, за счет модуля GeoMap, БД IRI\LDEO DL и разработанного алгоритма (на программном уровне), строится возможный маршрут. Результаты апробации также отображены на рисунке 17, 18.

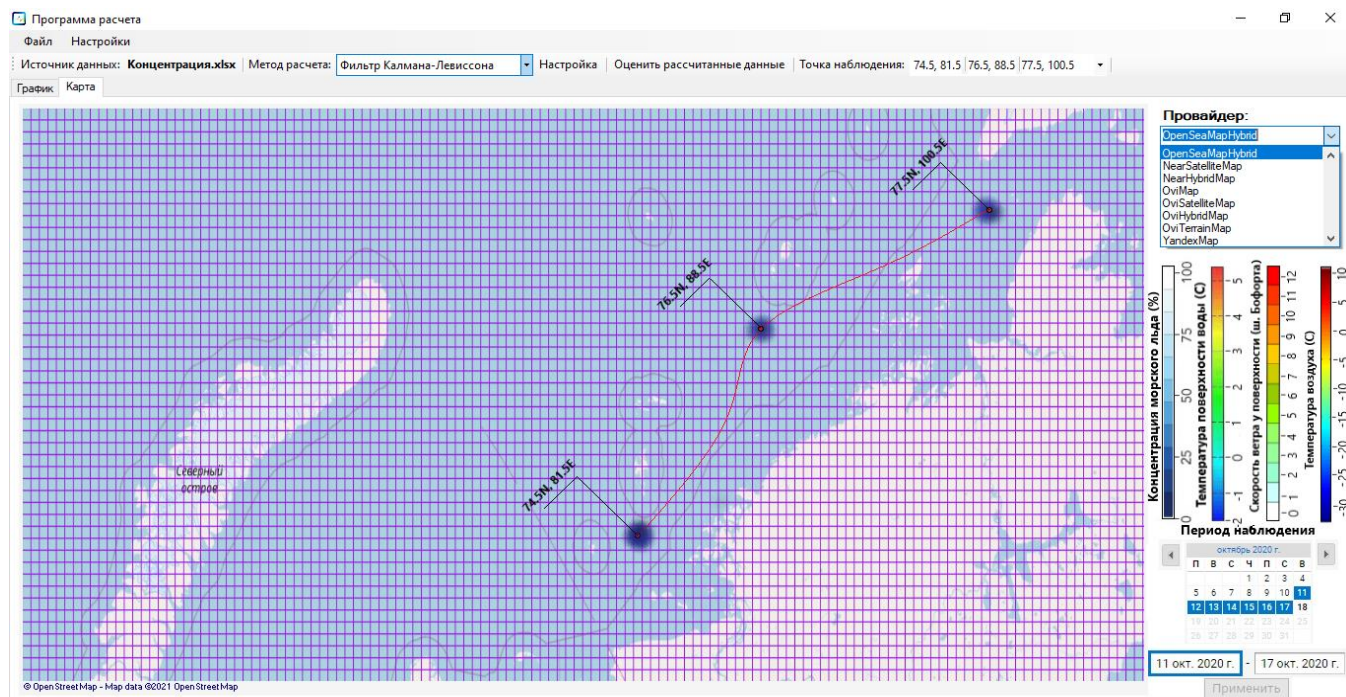


Рисунок 17. Результат апробации модели геоинформационного управления навигацией в Арктическом регионе России

Анализ результатов апробации показал, что входе инициирования разработанного алгоритма на картографическом слое привязываются заданные геопространственные координаты, соединенные навигационным путем, в виде красное линии, при этом вокруг каждой точки имеется закрашенный особым градиентом полигон (рисунок 18). Привязка градиента осуществляется через растровые координаты, отраженные в масштабируемой полигональной сетке. Данный синтез осуществляется благодаря наличию взаимосвязи полигонов в сетке с независимыми переменными, сформированными при выборке данных в библиотеке IRI\LDEO. Далее, имея координированный картографический слой, отраженный в виде множества полигонов, а также имея данные, представленные в виде подобных геопространственных координат, на программном уровне, за счет языка высокоуровневого программирования C#, синтезируется градиент (процесс закрашивания) в точке, согласно равным координатам обеих сеток. Таким образом можно утверждать, что площадь исследуемой точки равна количеству полигонов, из которых состоит такая точка.

Рассматривая систему управления навигацией, то в данном случае необходимо пояснить ряд аспектов. В частности, соединительный маршрут между точками, изображенный красной линией, является программно-сформированным и отображает лишь суть работы алгоритма. Модель предполагает, что маршрут состоит из множества пространственно-географических координат, представленных в виде точек. Каждая точка имеет цветовой градиент того или иного параметра, визуалью отражающий прогностические данные. Соответственно, если взять ряд точек располагающиеся на достаточной, для полигональной заливки близости, то навигационная линия маршрута будет проходить через полигоны, градиент которых являются благоприятным, относительно исследуемого параметра, для прохождения динамического объекта.

На рисунке 17, точки, исследуемого параметра (концентрация морского льда), располагаются

на достаточно большом расстоянии. Тем не менее, линия проходит внутри полигона и не отклоняется, так как согласно градиентной шкале, точка закрашена темно-синими, местами черными оттенками, что в свою очередь говорит об отсутствии льда в данной геолокации. Отрезок между точками является проектным отображением работы модели. По мере увеличения координатных точек, растет точность системы управления навигацией.

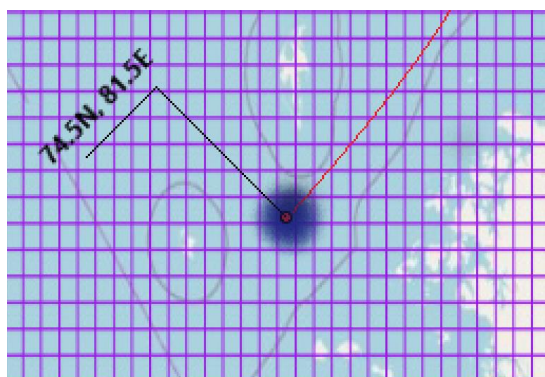


Рисунок 18. Масштабируемое представление градиента на полигоне исследуемого параметра

Имея достаточное количество данных, в частности представленных многочисленными геопространственными координатами, использование модели геоинформационной системы управления навигацией в Арктическом регионе Российской Федерации, является актуальным.

Заключение

В ходе исследования автором были получены следующие результаты:

1. Разработаны требования к геоинформационной системе управления навигацией в Арктическом регионе России, основанные на многопараметрическом анализе характеристик геоинформационных систем, навигационной составляющей и синтезированной матрицы сравнительных характеристик, типов и функций современных ГИС. На этапах разработки, были представлены критерии, влияющие на будущее освоение Арктического региона. Выявлены основные направления зависимых потребностей региона, анализ которых, в свою очередь, говорит о необходимости развития и актуальности использования Северного морского пути. Методом ДЗ обусловлена зависимость суровых климатических условий для навигации и требованиями, предъявляемым к мореплаванию. Проведен анализ более 50 современных ГИС, в ходе которых была разработана масштабная аналитическая матрица сравнения существующих систем. Результатом столь детального анализа, было выявлено отсутствие на сегодняшний день ГИС удовлетворяющих поставленным требованиям исследования.

2. Реализована методика представления геоданных для моделей прогнозирования будущего состояния обстановки Арктического региона, основанная на модифицированных алгоритмах рекурсивной фильтрации, которая отличается комплексированием картографических технологий поддержки решения, цифровой рекурсивной фильтрацией статистических данных для прогнозирования и оценки качества исходной информации, а также является независимым интегрируемым модулем ГИС. Данный результат обусловлен рядом исследований, в ходе которых был проведен анализ современных методов прогнозирования в интересах обеспечения навигации, разработаны модели, на основе модифицированных рекурсивных алгоритмов цифровой фильтрации данных, с целью прогнозирования будущего состояния системы. Каждый из фильтров представлен в виде ПО – независимой интегрируемой библиотекой.

3. Представлена разработанная модель прогнозирования состояния обстановки Арктического региона, основанная на модифицированных алгоритмах рекурсивной фильтрации, отличающаяся тем, что она синтезирована путем совмещения линейных фильтров, что дает возможность повысить точность прогнозов до 90 %. Разработка, ранее не существующей модели, базируется на последовательном подключении процессов реализованных линейных фильтров. Сращивание двух моделей цифровых фильтров (Калмана и Левинсона) обусловлено исключительно на программном уровне.

4. Автором полностью сформирована модель геоинформационной системы управления навигацией в Арктическом регионе Российской Федерации, которая отличается тем, что использует прогностические рекурсивные алгоритмы цифровой фильтрации, методику представления геоданных для поддержки принятия управленческих решений навигацией в Арктическом регионе.

В результате формирования модели ГИС, были обозначены основные функциональные задачи каждого компонента системы, а также проведен анализ этапов формирования. Разработана и детально описана функциональная структура компонентов МГИСУН. Реализованная, посредством высокоуровневого языка программирования C# модель, представлена в виде многофункционального пользовательского интерфейса, сочетающий в себе систему прогнозирования (основанная на модифицированных алгоритмах фильтрации) и систему управления навигацией в Арктическом регионе России.

Список публикация по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Сидоренко А.Ю. Математическая модель обработки пространственно-распределенных разнородных геоданных для принятия управленческих решений по прокладке оптимальных маршрутов следования судов в Арктике / Истомин Е.П., Колбина О.Н. и др. // Естественные и технические науки. 2019. № 4 (130).

2. Сидоренко А.Ю. Сложная информационная система прогнозирования рисков с применением фильтра Калмана-Бьюси / Истомин Е.П., Новиков В.В. и др. // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2014. № 36. С. 183-188.

3. Сидоренко А.Ю. Геоинформационная система управления пространственно-распределенными разнородными гидрометеорологическими данными для принятия управленческих решений по оптимизации регулирования отпуска тепла на ТЭЦ / Истомин Е.П., Степанов С.Ю. и др. // Естественные и технические науки. 2019. № 4 (134).

4. Сидоренко А.Ю. Концептуальная модель анализа состояния территорий по данным дистанционного зондирования земли / Татарникова Т.М., Степанов С.Ю. и др. // Информация и Космос №3, 2020, С. 124-130.

5. Сидоренко А.Ю. Реализация метода для защиты пространственных данных ГИС на основе нейронной сети / Петров Я.А., Степанов С.Ю. и др. // Естественные и технические науки. 2020. № 1 (139). С. 134-136.

6. Сидоренко А.Ю. Разработка метода защиты геоинформационных систем и пространственных данных на основе нейронной сети / Степанов С.Ю. и др. // Международный научно-практический журнал «Программные продукты и системы» DOI:10.15827/0236-235X.130.229-235, журнал №2, 2020, стр. 229-235, УДК: 004.056.5.

7. Сидоренко А.Ю. Методика дешифрирования и инвентаризации лесных насаждений средствами ГИС AutoCad Map / Вагизов М.Р., Петров Я.А. и др. // Геоинформатика.– 2020.–№4. – С. 20-27.

8. Сидоренко А.Ю. Программный модуль для анализа состояния территорий по данным дистанционного зондирования Земли / Вагизов М.Р. и др. // Информация и Космос. – 2020. – №4. – С. 107-114.

В изданиях, индексируемые в международных базах данных:

1. Sidorenko A., Istomin E. et al. Application of Kalman-Bucy filter for vessel traffic control systems in the northern sea route. Conference Series: Materials Science and Engineering 2020 | conference-paper DOI: 10.1088/1757-899X/817/1/012012EID: 2-s2.0-85087694141 Part of ISBN: 1757899X 17578981.

2. Sidorenko A., Istomin E. et al. About the methodology of geo-risk management in forestry. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2020 | conference-paper DOI: 10.1088/1755-1315/507/1/012006EID: 2-s2.0-85087872822Part of ISBN: 17551315 17551307

3. Sidorenko A., Istomin E. et al. Study of intra-day dynamics of currents in the area of the navigable strait of Baltiysk to adjust the movement of water transport. IOP Conference Series: Materials Science and

Engineering 2020 | conference-paper DOI: 10.1088/1757-899X/817/1/012013EID: 2-s2.0-85087690595 Part of ISBN: 1757899X 17578981.

4. Sidorenko A., Istomin E. et al. About technology of risk management in forestry. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2019 | conference-paper DOI: 10.1088/1755-1315/316/1/012011EID: 2-s2.0-85072972443 Part of ISBN: 17551315 17551307

5. Sidorenko A. et al. Monitoring forest fires and their consequences using MODIS spectroradiometer data. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2020 | conference-paper DOI: 10.1088/1755-315/507/1/012019EID: 2-s2.0-85087912679 Part of ISBN: 17551315 17551307

6. Sidorenko A., Istomin E. et al. Model of optimum integration of diverse geodata for the benefit of management of forestry. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2019 conference-paper DOI: 10.1088/1755-1315/316/1/012013EID: 2-s2.0-85072956026 Part of ISBN: 17551315 17551307

7. Sidorenko A., Istomin E. et al. Development of a conceptual GIS model to support management decision making. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020

8. Sidorenko A. et al. Features of the spatial and temporal distribution of chlorophyll an and its relation to the water surface temperature by manifestations in the earth remote sensing data. E3S Web of Conferences, 2020, 222, 5005

9. Sidorenko A. et al. Climatic changes in the abundance of anchovy in the Southeast Pacific Ocean. E3S Web of Conferences, 2020, 222, 5004.

10. Sidorenko A., Martyn I. et al. Application of a remote sensing data processing method for assessment ice cohesion in the Arctic navigation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2020-08-13 | journal-article DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012128 Part of ISSN: 1755-1315.

11. Sidorenko A., Stepanov S. et al. Spatial-temporal variability of ice cover of the Bering sea. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2020-08-13 | journal-article DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012198 Part of ISSN: 1755-1315.

12. Sidorenko A., Tatarnikova T. et al. A conceptual model for geodata processing for sustainable forest management. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2020 | conference-paper DOI: 10.1088/1755-1315/507/1/012029EID: 2-s2.0-85087922845 Part of ISBN: 17551315 17551307P.

13. Sidorenko A., Stepanov S. et al. Development of a software module for the analysis of the forest using remote sensing data of the Earth. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020.

14. Sidorenko A., Martyn I. et al. Determination of Internal Waves Off the Coast of Morocco According to Earth Remote Sensing Data. GraphiCon 2020: Proceedings of the 30th International Conference on Computer Graphics and Machine Vision (22-25 September 2020, Saint-Petersburg, Russia). – 2020. – vol. 2744.