

На правах рукописи



Ратнер Елизавета Аркадьевна

**Нанесение рельефа дна на навигационные карты внутренних  
водных путей на основе трехмерного моделирования**

05.22.17 – Водные пути сообщения и гидрография

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова».

Научный руководитель: кандидат технических наук  
**Алексей Иванович Зайцев**

Официальные оппоненты **Нестеров Николай Аркадьевич**  
доктор технических наук, профессор,  
Акционерное общество «Морские  
навигационные системы», руководитель  
проекта отдела навигационных и  
гидроакустических комплексов.

**Шарков Андрей Михайлович**  
кандидат технических наук, доцент,  
Акционерное общество «Государственный  
научно-исследовательский навигационно-  
гидрографический институт», начальник  
научно-исследовательского управления  
гидрографии, геофизики и гидрометеорологии.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Санкт-Петербургский  
государственный университет».

Защита состоится «18» января 2022 года в 14-00 часов на заседании  
диссертационного совета Д 223.009.05 при ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова» по адресу: 198035, г. Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, д. 5/7, ауд. 257.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ГУМРФ  
имени адмирала С. О. Макарова

[https://gumrf.ru/naudejat/gna/dissov\\_22300905/zd22300905/](https://gumrf.ru/naudejat/gna/dissov_22300905/zd22300905/)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Олег Альбертович Изотов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Обеспечение судоходства актуальной информацией о рельефе дна – базовая задача, без решения которой невозможна реализация современных крупных проектов, нацеленных на увеличение грузоперевозок и пассажиропотока на внутреннем водном транспорте (ВВТ), а также внедрение безэкипажных технологий на внутренних водных путях Российской Федерации (ВВП РФ).

В настоящее время на ВВП РФ гидрографическая съёмка выполняется в течение всего навигационного периода. На основе этих данных в межнавигационный осенне-зимний период создаются и обновляются навигационные карты (НК). Это связано с тем, что традиционные способы получения исходной гидрографической информации, ее обработки и нанесения на НК объектов внутренних водных путей (ВВП) требуют длительного времени. Установившийся порядок приводит к тому, что из-за изменчивости рельефа русел незарегулированных рек НК на отдельные участки не актуальны уже на момент их издания. Для решения данной проблемы необходимо разработать новые методы нанесения объектов на НК ВВП, позволяющие снизить временные затраты при создании карт. Что в сочетании с мерами, которые ускорят выполнение гидрографических съёмок и особенно обработку исходных данных, позволит своевременно обеспечивать судоводителей актуальными НК.

Степень научной разработанности темы. Необходимость повышения доли перевозок с помощью ВВТ в России уже давно признана и обсуждается в работах российских учёных: Г. Л. Гладкова, А. В. Галина, Я. Я. Эглита. Теме нанесения объектов ВВП на НК посвящены многие работы В. В. Каретникова, А. А. Прохоренкова, С. В. Рудых, J. Łubczonek, F. Moggert-Kägeler, A. Stateczny, M. Włodarczyk-Sielicka и др. Перечисленные авторы касаются вопросов развития новых типов картографических продуктов (трехмерные НК; электронные навигационные карты (ЭНК), содержащие батиметрические данные высокой точности и др.) и использования нового типа исходных данных (данные лазерного сканирования, аэросъёмка высокого разрешения и пр.). А. Л. Тезиков и А. Б. Афонин в своих трудах затрагивают проблемы пропуска опасных глубин в междугалсовом пространстве, специфики построения изобат в условиях недостаточной гидрографической изученности подводного рельефа и качества промерных данных. Вопросы трёхмерного моделирования рельефа дна подробно рассматриваются в научных работах И. Б. Флоринского.

Однако, несмотря на фундаментальную проработку многих научных проблем, задачам, касающимся сокращения времени нанесения на НК ВВП рельефа дна для своевременного обеспечения судоводителей актуальной

информацией о рельефе дна ВВП, до настоящего времени уделено недостаточное количество внимания.

Цель выполняемых исследований. Целью исследования является сокращение времени нанесения на НК ВВП рельефа дна для своевременного обеспечения судоводителей актуальной картографической информацией в интересах безопасности судоходства на ВВП РФ.

Научная задача исследования формулируется как разработка на основе трехмерного моделирования нового метода нанесения на НК ВВП рельефа дна, позволяющего сохранить точность исходного промера и минимизировать затраты времени при создании НК.

В соответствии с научной задачей исследования в работе были поставлены и решены следующие частные задачи:

- анализ современного состояния стандартов и технологий, применяемых для съемки, нанесения на карту и описания объектов ВВП в Российской Федерации и зарубежных странах;

- разработка способа хранения исходных материалов, полученных по результатам гидрографической съёмки (ИГМ), позволяющего минимизировать затраты времени при обновлении и переиздании ячеек ЭНК;

- разработка способа картографической реконструкции поверхности дна, обеспечивающего дополнительный визуальный контроль качества выполненных промерных работ и позволяющего сократить временные затраты на корректировку автоматически построенных изобат;

- разработка метода нанесения рельефа дна водных путей на НК ВВП на основе трехмерного моделирования;

- сопоставление на предмет непротиворечивости результатов натурных измерений и аналитических расчетов, полученных в соответствии с использованием разработанного метода нанесения рельефа дна водных путей на НК ВВП на основе трехмерного моделирования.

Объекты исследования – глубины и рельеф дна ВВП.

Предмет исследования – нанесение на НК рельефа дна ВВП.

Область исследования – рельеф дна ВВП.

Исследование проводится в границах ВВП.

Научная новизна выполняемых исследований. Новизна данной работы заключается в разработке на основе трехмерного моделирования метода нанесения рельефа дна ВВП на НК ВВП. Предложенный в диссертационном исследовании метод ускорит составление и в особенности обновление НК в целях своевременного обеспечения судоводителей актуальной картографической информацией.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретической значимостью обладает разработанный автором метод нанесения рельефа

дна водных путей на НК ВВП на основе трехмерного моделирования. Данная разработка является новым решением актуальной научной задачи по своевременному обеспечению судоводителей информацией о рельефе дна ВВП и имеет существенное значение для развития эффективности функционирования ВВТ в РФ.

Новый метод нанесения рельефа дна ВВП на НК ВВП на основе трехмерного моделирования перспективен для интегрирования в повседневную работу Администраций бассейнов внутренних водных путей (АБ ВВП) при организации работы картографических отделов. Практическое применение нового картографического метода, разработанного в настоящем исследовании, будет полезно широкому кругу потребителей, в числе которых картографические предприятия и фабрики; операторы систем управления движением судов; лоцманские службы и службы управления речным портом; грузоперевозчики и операторы речных перевозок; судовладельцы (речных судов и судов класса «река-море»); разработчики, собственники и операторы безэкипажных судов.

#### Методология и методы исследования.

Методологическая основа исследования: методы системного анализа и управления технологическими процессами, теория управления базами данных, методы обследования дна, методы составления НК, методы цифровой обработки изображений, методы построения триангуляционных сетей и трехмерных моделей, методы интерполяции. При выполнении диссертационного исследования автор опирался на научные разработки отечественных и зарубежных ученых по вопросам создания НК ВВП; на принятые Правительством РФ нормативно-правовые акты и целевые программы (в числе которых Федеральная целевая программа «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012 – 2020 годы», утвержденная постановлением Правительства РФ от 03.03.2012 № 189, «Стратегия развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года» и директивные материалы Министерства транспорта РФ); на статистические данные о деятельности АБ ВВП РФ и ВВТ в зарубежных странах. Результаты работы теоретически обоснованы и имеют экспериментальное подтверждение.

#### Положения, выносимые на защиту:

- способ хранения исходных материалов, полученных по результатам гидрографической съёмки, с использованием создаваемых баз и банка геопространственных данных;
- способ картографической реконструкции поверхности дна с помощью триангуляции Делоне и метода биквадратной сплайн-интерполяции;
- метод нанесения рельефа дна на НК ВВП на основе трехмерного моделирования.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность сформулированных научных положений обусловлена корректной постановкой задач, выбором объективных исходных данных, применением математически обоснованных принципов исследования, классических методов математического анализа и моделирования, а также корректностью результатов сопоставления теоретических исследований с данными, полученными в ходе экспериментального исследования.

По результатам исследования автором получены 8 свидетельств о государственной регистрации баз данных, опубликованы 12 научных работ, общий вклад автора в написание которых составил 5,05 п.л., в том числе 5 работ в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК РФ, и 2 статьи в изданиях, включенных в международную реферативную базу данных Scopus (общий вклад автора в написание работ – 3,1 п.л.). Основные положения и результаты диссертационного исследования были представлены широкой научной общественности на Всемирной конференции IEEE AFRICON (ЮАР, Кейптаун, 2017), Национальной научно-практической конференции «Перспективы безэкипажных технологий на водном транспорте» (Санкт-Петербург, 2018), Национальной ежегодной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» (Санкт-Петербург, 2019), Международной научной конференции «Наука. Исследования. Практика» (Санкт-Петербург, 2020), Международной научной конференции «Естественные и технические науки» (Санкт-Петербург, 2020), Международном симпозиуме «Earth sciences: history, contemporary issues and prospects» (Москва, 2021).

Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования успешно внедрены и применяются при выполнении гидрографических, картографических, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в ведущих предприятиях отрасли: ФБУ «Администрация «Печораводпуть», ООО «НПП «Маринерус», ООО «Консэнк», АО «ЦКТ». Это подтверждено соответствующими актами внедрения. Элементы диссертационной работы реализованы при выполнении государственных контрактов по теме «Проведение комплекса работ по созданию и обновлению баз данных навигационной информации для картографического обеспечения внутренних водных путей с использованием сигналов навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС, перспективных глобальных навигационных спутниковых систем и их функциональных дополнений».

Объем и структура работы. Диссертационная работа включает в себя 174 страницы, 66 рисунков, 8 таблиц, 6 блок-схем; состоит из введения, трех глав, заключения, перечня сокращений и условных обозначений, списка литературы, содержавшего 98 отечественных и 34 зарубежных единицы, а также 2-х приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулирована его цель, основные задачи, объект и предмет исследования, определена научная новизна диссертации и практическая значимость выводов и результатов работы.

В первой главе «Стандарты и технологии, применяемые для съемки, нанесения на карту и описания объектов ВВП. Особенности обеспечения судоходства на ВВП информацией о рельефе дна» доказано, что НК, выпускаемые в РФ, зачастую не актуальны. Выявлено, что только пять из пятнадцати АБ ВВП имеют в своей структуре картографический отдел, составляющий ЭНК в формате .000, хотя создание коллекции НК ВВП и поддержание ее на уровне современности – одна из важнейших задач обеспечения безопасности судоходства. Обоснован вывод, что в связи с существенным изменением технологий выполнения гидрографических работ, получения и передачи данных, а также значительно изменившимися с конца прошлого века возможностями обработки информации, необходимо разрабатывать новые методы нанесения объектов ВВП на НК.

Также исследованы особенности обеспечения судоходства на ВВП гидрографическими данными, включая обзор программного обеспечения (ПО) и действующих и перспективных стандартов, применяемых для нанесения на НК объектов ВВП; анализ существующей обеспеченности ВВП РФ и иностранных государств гидрографическими данными; обзор технологий, используемых на ВВП РФ для съемки, нанесения на карту, описания объектов ВВП и передачи карт на суда.

В рамках первой главы проанализирована степень разработанности темы. В результате выполненного исследования сформулированы цель и научная задача диссертационной работы.

Во второй главе «Метод нанесения рельефа дна на навигационные карты внутренних водных путей на основе трехмерного моделирования. Математическое обеспечение» получены следующие научные результаты.

*Разработан способ хранения ИГМ с использованием создаваемых баз и банка геопространственных данных.*

Способ хранения ИГМ в адаптированном для ВВП банке геопространственных данных (БГД) заключается в хранении в БГД информации о каждом объекте реального мира в единственном экземпляре с присвоенным уникальным идентификатором. Данный способ обеспечивает возможность автоматического согласованного формирования ЭНК разных масштабов с последующим формированием бумажной навигационной карты (БНК),

В настоящее время работа АБ ВВП организована следующим образом:

- выполнение топографо-геодезических и гидрографических работ;
- обработка материалов, составление / обновление НК;

- верификация НК (при необходимости – исправление замечаний);
- хранение / передача готовых НК пользователям;
- повторение всего цикла работ (если необходимо составить НК большего масштаба с переводом внемасштабных элементов в линейные и площадные; обновить НК в связи со значительным изменением рельефа дна; составить врезку; выпустить новую «нарезку» всей ленты карт).

В соответствии со способом хранения ИГМ в адаптированном для ВВП БГД необходимо сформировать единый банк геопространственных объектно-ориентированных данных (ЕБГООД). Использование ЕБГООД приведет к оптимизации затрат на обновление, новую «нарезку», издание карт другой области использования или на создание врезок в НК. Опытный образец подобной системы для работы в области морской картографии был разработан в 2014 году. Для создания НК ВВП подобные системы никогда не разрабатывались. В качестве адаптации БГД для ВВП предлагается внести следующие дополнения и изменения:

- промерные работы выполняются беспилотными промерными судами на регулярной основе;
- новые гидрографические данные загружаются в ЕБГООД с проведением автоматического расчета изменения глубин;
- при загрузке новых данных в ЕБГООД проводится анализ необходимости немедленного траления или дноуглубления участка ВВП, выполняется обновление существующих ЭНК.

На основании данных, хранящихся в ЕБГООД, специалист-картограф, задав координаты рамок карты, получает прототип, который после проведения генерализации, добавления необходимых метаобъектов и упорядочивания надписей, преобразуется в готовую ЭНК в формате .000 (по международным стандартам S-57 или S-100). Помимо этого, обеспечивается создание и обновление корректурных наборов ЭНК, БНК, извещений судоводителям.

В будущем при переходе к безэкипажному судоходству рекомендовано хранение на серверах исключительно батиметрических данных. Судовые хода (СХ), виртуальные буи, границы опасных зон планируется рассчитывать специально для каждого судна в зависимости от его характеристик. Соответственно отпадет необходимость в оформлении планшета: отобранные батиметрические данные единой лентой будут поступать непосредственно с автоматизированного промерного комплекса (АПК) на серверы картографических служб. Контроль качества предлагается выполнять в автоматическом режиме с последующей экспертной верификацией.

Последовательность действий при реализации способа хранения обработанных батиметрических данных.

- Предварительные работы, выполняемые одновременно:



1) обработка существующих ИГМ и ранее созданных НК ВВП (извлечение отметок глубин из существующих ЭНК и БНК различных масштабов с осуществлением контроля качества батиметрических данных в интерактивной графической среде; извлечение геодезических и гидрографических данных из существующих НК и ортофотопланов);

2) автоматизированная привязка исходной информации к классификатору участков ВВП;

3) формирование баз батиметрических, геодезических и гидрографических данных; внесение данных в ЕБГООД;

4) выполнение в автоматическом режиме генерализации отметок глубин (отбор глубин дна с учетом и показом всех опасных глубин) и построение в автоматическом режиме береговой линии и изобат.

– Работы, выполняемые при создании или обновлении ЭНК ВВП:

1) обработка ИГМ;

2) внесение полученных данных в ЕБГООД;

3) систематизация имеющихся архивных материалов космических съемок и выполненной новой космической съемки акваторий рек и прилегающих территорий с удалением от береговой линии не менее 500 м; оцифровка береговых объектов по ортофотопланам с последующим занесением полученных координат в ЕБГООД;

4) выполнение в автоматическом режиме генерализации отметок глубин (отбор глубин дна с учетом и показом всех опасных глубин);

5) анализ необходимости выполнения дополнительного траления или дноуглубления участка ВВП или обновления существующих ЭНК;

6) построение в автоматизированном режиме цифровых батиметрических моделей (ЦМР);

7) создание рамок ЭНК в формате .000;

8) загрузка из ЕБГООД точек береговой линии, а также средств навигационного оборудования (СНО), навигационных опасностей, объектов управления движением, объектов-ориентиров на берегу, поименованных участков местности с географическими наименованиями (в границах создаваемой/обновляемой ЭНК);

9) построение изобат и береговой линии в автоматизированном режиме.

*Разработан способ картографической реконструкции поверхности дна с помощью триангуляции Делоне и метода биквадратной сплайн-интерполяции.*

Поскольку предельно допустимое междугалсовое расстояние на водохранилищах может составлять до 500 метров, а в большинстве случаев промерные работы выполняются с помощью однолучевого эхолота (рис. 1), данных для построения трехмерных моделей зачастую недостаточно. В таких ситуациях для построения ЦМР предлагается применение интерполяционных методов.

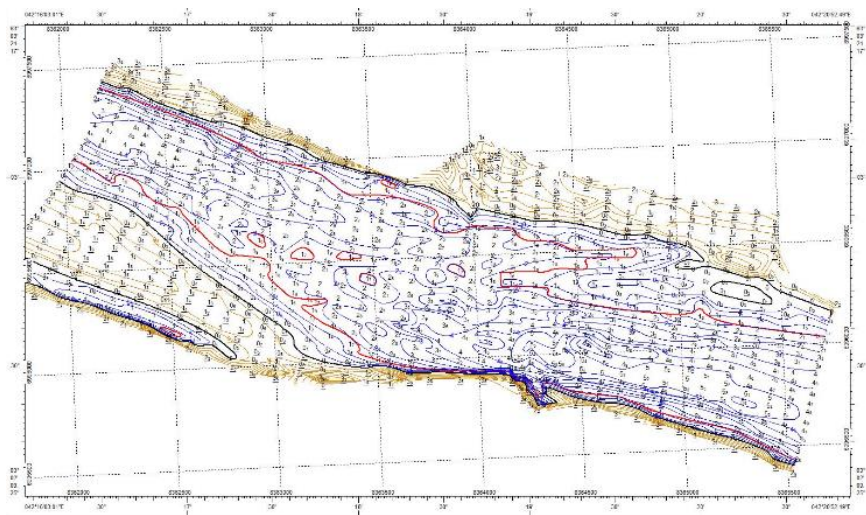


Рисунок 1 – Рабочие материалы АПК. Участок р. Северная Двина

В современном картографическом ПО для создания НК реализована функция построения ЦМР, но применяются только методы интерполяции, основанные на расчетах по регулярной сети, т.к. использование таких сетей упрощает алгоритмы, а следовательно, требует меньших вычислительных мощностей ЭВМ. В результате точность построенной модели снижается. К тому же ЦМР не используются в целях дальнейшего картографирования, только как отдельный продукт. Предлагаемые в диссертационном исследовании расчеты построены на алгоритмах, реализованных на нерегулярной сети. Такой способ является принципиальным новшеством в подходе к картографической реконструкции рельефа дна ВВП.

Способ картографической реконструкции поверхности дна, предлагаемый в диссертационном исследовании, заключается в построении модели рельефа дна с последующим выполнением сгущения сети глубин. Использование методов триангуляции Делоне и биквадратной сплайн-интерполяции позволяет выполнять расчеты на нерегулярной сети без преобразования ее в регулярную сеть. Такой подход позволяет сохранить точность исходного промера.

По заданному распределению глубин на основе распределения точек по нерегулярной сети методом триангуляции Делоне строится триангуляционная модель рельефа дна. Для заполнения межгалсовых областей проводится процедура биквадратной сплайн-интерполяции данных, после которой вновь полученные значения вносятся в общий список глубин, и ранее выполненная триангуляция перестраивается с учетом рассчитанных данных. При необходимости процедура повторяется,

что позволяет на основе разряженных выборок получить достаточно полную картину, дающую возможность строить ЦМР. Интерполированные глубины на карту не наносятся, а используются только для дальнейших расчетов. Если промер был выполнен многолучевым эхолотом, то интерполяция не требуется, поскольку данных для построения ЦМР и так достаточно. Построенная батиметрическая модель приводится к проектному уровню и передается в ЕБГООД.

В случае выявления подозрительных опасных участков необходимо запрашивать выполнение повторной съемки с меньшим междугалсовым расстоянием. Следует учитывать, что при интерполяции возможно появление артефактов – объектов, не существующих в реальности. К тому же интерполяция не может предсказать препятствия (огромные булыжники и др.) или резкие обрывы.

Триангуляция по методу Делоне выбрана, т.к. она легко реализуема на ЭВМ. Интерполяция выполняется с помощью биквадратных сплайнов, поскольку результаты оценки точности моделирования показали, что таким образом ЦМР создаются с наименьшими отклонениями.

Биквадратная интерполяция – метод многомерной интерполяции в трехмерном евклидовом пространстве, при которой значения функций интерполируется в искомых четырех точках в соответствии с известными значениями в окружающих девяти точках. Обобщение основано на том, что искомые точки лежат не на линии, а внутри четырех, граничащих друг с другом двумя ребрами, сформированных девятью известными точками четырехугольников. После того как во всех возможных комбинациях из четырех граничащих друг с другом двумя ребрами четырёхугольниках, образующих явно выпуклое множество (эмпирическим путем найдено значение угла: наружный угол, образованный в месте примыкания четырехугольников, больше  $12,5^\circ$ ), выполнена биквадратная интерполяция в оставшихся четырехугольниках, которые невозможно скомбинировать в соответствии с вышеизложенным требованием, выполняется билинейная интерполяция. Далее в оставшихся треугольниках выполняется треугольная интерполяция.

Треугольная интерполяция – метод многомерной интерполяции в трехмерном евклидовом пространстве. Данная интерполяция является расширением трилинейной интерполяции, при которой в соответствии с известными значениями в окружающих трех точках интерполируются значения функции в искомой точке. Обобщение основано на том, что искомая точка лежит не на линии, а внутри сформированного тремя известными точками треугольника. Искомая точка находится на пересечении медиан взятого за основу треугольника. Принципы такой интерполяции иногда применяются при нанесении изолиний вручную.

Билинейная интерполяция – это обобщение линейной интерполяции функций одной переменной для функции двух переменных. Обобщение

основано на том, что искомая точка лежит внутри сформированного известными точками четырехугольника, а не на линии. Интерполируемое значение функции  $f(x, y)$  вычисляется по формуле (1). При нанесении изолиний вручную часто используются принципы такой интерполяции.

$$f(x, y) = \frac{f(x_1, y_1)}{\Delta} k_1 + \frac{f(x_1, y_2)}{\Delta} k_2 + \frac{f(x_2, y_1)}{\Delta} k_3 + \frac{f(x_2, y_2)}{\Delta} k_4, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta &= (x_1 - x_0)(y_1 - y_0); \\ k_1 &= (x_1 - x)(y_1 - y); \\ k_2 &= (x - x_0)(y_1 - y); \\ k_3 &= (x_1 - x)(y - y_0); \\ k_4 &= (x - x_0)(y - y_0), \end{aligned}$$

где  $\Delta$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  – рассчитываемые коэффициенты;

$f(x_1, y_1)$ ,  $f(x_1, y_2)$ ,  $f(x_2, y_1)$ ,  $f(x_2, y_2)$  – значения функции в известных точках;

$x_0, y_0, x_1, y_1$  – координаты известных точек;

$x, y$  – координаты интерполируемой точки.

Функция биквадратной сплайн-интерполяции имеет вид (2):

$$f_{nm}(x_{nm}, y_{nm}) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 a_{ij} x_{nm}^i y_{nm}^j = z_{nm}, \quad (2)$$

где  $a_{ij}$  – искомые коэффициенты, рассчитываемые по формулам (3);

$n, m$  – номера интерполируемых точек по строке /столбцу

$i, j$  – номера искомых точек по строке /столбцу;

$x_{nm}^i, y_{nm}^j$  – координаты интерполируемой точки в степени  $i$ ;

$z_{nm}$  – интерполируемое значение.

$$\begin{cases} f_{11}(x_{11}, y_{11}) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 a_{ij} x_{11}^i y_{11}^j = z_{11} \\ f_{12}(x_{12}, y_{12}) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 a_{ij} x_{12}^i y_{12}^j = z_{12} \\ f_{13}(x_{13}, y_{13}) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 a_{ij} x_{13}^i y_{13}^j = z_{13} \\ f_{21}(x_{21}, y_{21}) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 a_{ij} x_{21}^i y_{21}^j = z_{21} \\ f_{22}(x_{22}, y_{22}) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 a_{ij} x_{22}^i y_{22}^j = z_{22}, \\ f_{23}(x_{23}, y_{23}) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 a_{ij} x_{23}^i y_{23}^j = z_{23} \\ f_{31}(x_{31}, y_{31}) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 a_{ij} x_{31}^i y_{31}^j = z_{31} \\ f_{32}(x_{32}, y_{32}) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 a_{ij} x_{32}^i y_{32}^j = z_{32} \\ f_{33}(x_{33}, y_{33}) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 a_{ij} x_{33}^i y_{33}^j = z_{33} \end{cases} \quad (3)$$

где  $A_{nm}$  – известные точки;

$x_{nm}, y_{nm}, z_{nm} - x_{11}^i, y_{11}^j, z_{11}, x_{12}^i, y_{12}^j, z_{12}, x_{13}^i, y_{13}^j, z_{13}, x_{21}^i, y_{21}^j, z_{21}, x_{22}^i, y_{22}^j, z_{22}, x_{23}^i, y_{23}^j, z_{23}, x_{31}^i, y_{31}^j, z_{31}, x_{32}^i, y_{32}^j, z_{32}, x_{33}^i, y_{33}^j, z_{33}$  – координаты известных точек;

$z_{11}, z_{12}, z_{13}, z_{21}, z_{22}, z_{23}, z_{31}, z_{32}, z_{33}$  – значение функций в известных

точках.

Последовательность действий при реализации метода картографической реконструкции поверхности дна с помощью триангуляции Делоне и метода биквадратной сплайн-интерполяции:

1) отбор полигона для построения ЦМР и построение в каждой прямоугольной ячейке триангуляции Делоне;

2) автоматизированное выполнение интерполяции методом биквадратной сплайн-интерполяции во всех возможных комбинациях из четырех граничащих друг с другом двумя ребрами четырёхугольников, образующих явно выпуклое множество;

3) выполнение билинейной интерполяции в оставшихся четырёхугольниках;

4) выполнение треугольной интерполяции в оставшихся треугольниках;

5) построение ЦМР в автоматизированном режиме (на основе полученной сгущенной сети глубин);

6) выведение построенной ЦМР на дисплей и анализ необходимости дальнейшего сгущения сети (при недостаточной частоте глубин – повторение всего цикла с начала);

7) анализ необходимости выполнения более детального промера на участке ВВП (в случае выявления подозрительных опасных участков);

8) приведение построенной ЦМР к проектному уровню;

9) выведение построенной трехмерной модели рельефа дна на дисплей (интерполированные глубины не отображаются);

10) загрузка построенной батиметрической модели в ЕБГООД.

*Разработан метод нанесения рельефа дна ЭНК ВВП на основе трехмерного моделирования.* Данный метод – это последовательная реализация перечисленных выше способов под контролем оператора-картографа, при которой дополнительно выполняется ряд стандартных операций, а СХ наносится по градиентной заливке.

В настоящее время при составлении НК ВВП часть работ, в том числе нанесение СХ, выполняется вручную. Данная задача не требует дополнительного времени и навыков, если СХ зарегулирован. Однако в ситуации, когда отсутствуют береговые створные знаки или ограждающие фарватер СНО, качество нанесения подобной навигационной информации напрямую зависит от квалификации специалиста-картографа и от метода представления исходных данных. На криволинейных участках СХ необходимо точнее определять положение судна, поскольку его положение зависит от наличия свальных, затяжных течений, скорости течения реки и ветрового дрейфа. Соответственно, судно занимает большую полосу движения, чем на прямолинейном участке.

Реализация способа нанесения на карту СХ по градиентной заливке представляет собой окрашивание построенной ЦМР градиентной заливкой.

С помощью градиента видны значения не только в ключевых вершинах (измеренные или интерполированные глубины), но и между ними.

Градиентная заливка предоставляет оператору возможность быстро оценивать рельеф дна, не концентрируя внимания на анализе текстовой информации. Подобное оформление ЦМР позволяет в кратчайшие сроки нанести на эту модель изобаты (если эта функция не реализована автоматически) и провести СХ на участках, не зарегулированных СНО. СХ на таких участках наносится по наиболее темной области. На рис. 2 изображена ЦМР с построенными по градиентной заливке изобатами.

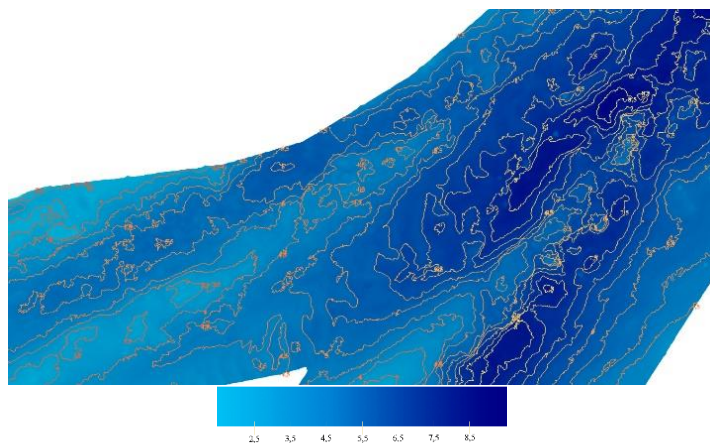


Рисунок 2 – Фрагмент трехмерной модели р. Невы

Последовательность действий при реализации способа нанесения на карту СХ по градиентной заливке:

- 1) окраска участков воды на построенной ЦМР градиентной заливкой от светло-синего до темно-синего цвета;
- 2) нанесение на ЦМР СХ по наиболее темной области (на участках, не зарегулированных СНО);
- 3) нанесение по границам областей одного тона (если автоматически не реализовано) / контроль автоматически построенных изобат.

На рисунке 3 приведена последовательность выполнения работ по нанесению рельефа дна на НК ВВП с применением разработанного метода.

При внедрении этого метода в картографических отделах АБ ВВП отпадет необходимость в кодировании вручную большинства площадных, линейных и точечных объектов. Кодирование вручную СХ и корректировка построенных в автоматизированном режиме областей глубин и изобат требуют значительно меньше ресурсов. На основании проведенного эксперимента удалось сократить время создания ЭНК ВВП почти вдвое, а обновления – почти втрое.

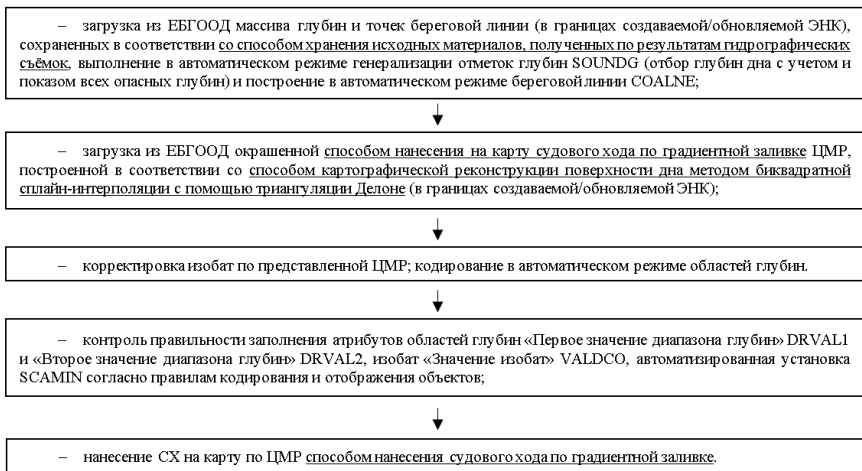


Рисунок 3 – Последовательность действий при реализации метода нанесения рельефа дна на НК ВВП на основе трехмерного моделирования

Для нанесения рельефа дна на НК необходимо последовательно выполнить следующие виды работ:

1) Выполнение гидрографических работ на реках и водохранилищах, а также необходимых сопутствующих топографо-геодезических работ, с последующей обработкой полученных данных и занесением материалов в ЕБГООД (в соответствии со способом хранения ИГМ с использованием создаваемых баз и банка геопространственных данных).

2) Анализ необходимости дополнительного траления или дноуглубления участков ВВП или обновления существующих ЭНК.

3) Систематизация имеющихся архивных материалов космических съемок и выполнение новой космической съемки акваторий рек и прилегающих территорий с последующей фотограмметрической обработкой полученных снимков и оцифровкой береговых объектов по ортофотопланам (выполняется параллельно с гидрографическими работами). Занесение полученных координат и характеристик береговых объектов в ЕБГООД (в соответствии со способом хранения ИГМ с использованием создаваемых баз и банка геопространственных данных).

4) Выбор «нарезки» ячеек ЭНК путем задания координат углов рамок, заполнение паспорта НК, кодирование обязательных объектов первой группы.

5) Построение ЦМР способом картографической реконструкции поверхности дна с помощью триангуляции Делоне и метода биквадратной сплайн-интерполяции. Построенная батиметрическая модель исправляется

на величину срезки, т.е. приводится к проектному уровню, окрашивается при помощи градиентной заливки и передается в ЕБГООД.

6) Загрузка из ЕБГООД массива глубин и точек береговой линии (в границах создаваемой/обновляемой ЭНК), выполнение в автоматическом режиме генерализации отметок глубин (отбор глубин дна с учетом и показом всех опасных глубин) и построение в автоматическом режиме береговой линии, кодирование в автоматическом режиме областей глубин и изобат. Загрузка из ЕБГООД окрашенной градиентной заливкой ЦМР.

7) Корректировка положения изобат по представленной ЦМР.

8) Контроль правильности заполнения атрибутов областей глубин «Первое значение диапазона глубин» и «Второе значение диапазона глубин» и изобат «Значение изобат».

9) Автоматизированная установка атрибута SCAMIN (scale minimum) – масштаба отображения, при котором каждый конкретный объект перестает отображаться на ЭНК - согласно правилам кодирования и отображения объектов.

10) Нанесение СХ на участках, не зарегулированных СНО, по градиентной заливке.

Во второй главе подробно описаны программно-аппаратные средства нанесения на НК ВВП рельефа дна на основе трехмерного моделирования.

В третьей главе «Экспериментальное обеспечение метода нанесения рельефа дна на навигационные карты внутренних водных путей на основе трехмерного моделирования» выполнены математические расчеты и построения моделей, поддерживающие метод нанесения рельефа дна на НК ВВП на основе трехмерного моделирования:

- построение триангуляции Делоне;
- расчет значений глубин при использовании классических методов интерполяции – методом ближайшего соседа, трилинейной, треугольной и билинейной интерполяции; построение ЦМР;
- расчет значений глубин при использовании биквадратной сплайн-интерполяции на нерегулярной сети.

На примере материалов промера р. Тавда (участок между 230 и 231 км), проведенного в 2018 году «Тобольским районом водных путей и судоходства» – филиалом ФБУ «Администрация «Обь-Иртышводпуть», выполнены экспериментальные расчеты и математическое моделирование для метода нанесения на НК ВВП рельефа дна на основе трехмерного моделирования:

- выполнена триангуляция Делоне и по ней построена ЦМР;
- методом биквадратной сплайн-интерполяции получены значения недостающих глубин (рис. 4), сплайн-интерполяция выполнена в две итерации;
- построена ЦМР; нанесены изобаты (рис. 5);



— составлена ЭНК (интерполированные глубины не нанесены); по градиентной заливке нанесен СХ (рис. 6).

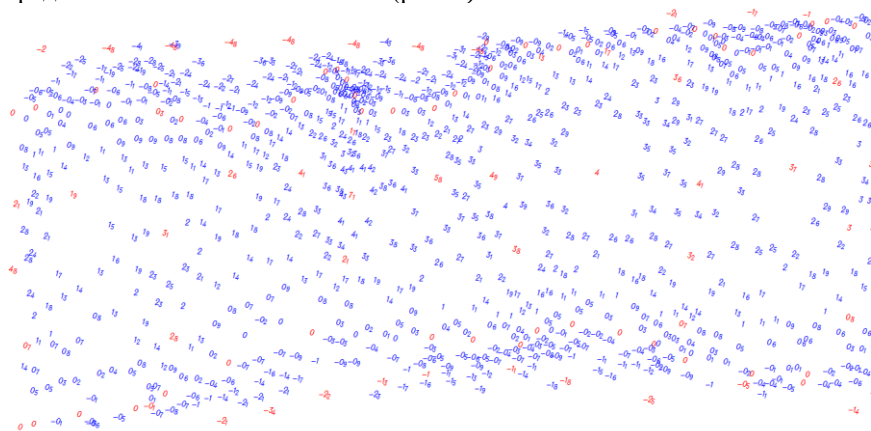


Рисунок 4 – Массивы батиметрических данных промера (красным цветом) и батиметрических данных, полученных по результатам биквадратной сплайн-интерполяции (синим цветом)

На основе выполненной интерполяции в автоматическом режиме построены изобаты с шагом 50 см от 0.5 м до 5.5 м. В дальнейшем при составлении ЭНК будет дополнительно построена гарантированная изобата 1.2 м, которая и отображается на карте вместе со значениями измеренных глубин. Интерполированные глубины на карту не наносятся.

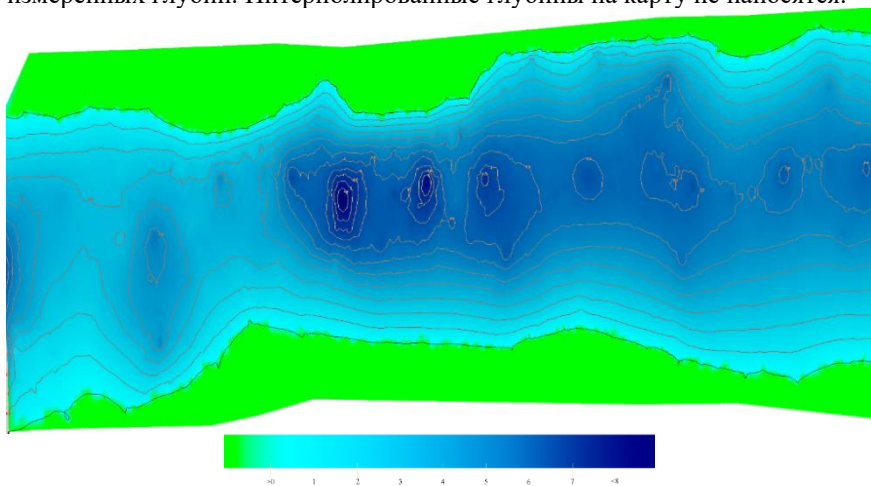


Рисунок 5 – ЦМР участка р. Тавда, построенная на основе сгущенной промерной сети

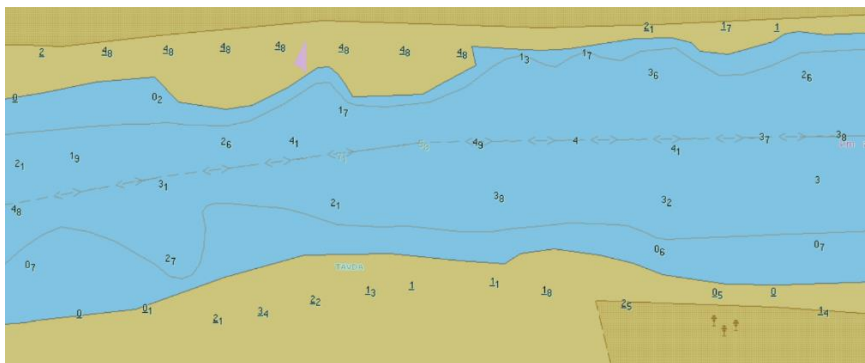


Рисунок 6— Фрагмент ЭНК р. Тавда. Безопасная изобата 1,2 м нанесена автоматически. СХ построен по градиентной заливке ЦМР

В рамках третьей главы на примере промерных материалов р. Северная Двина выполнен анализ точности сгущения сетей используемыми методами интерполяции. Для проверки выполнения интерполяции использован способ вычисления значений глубин, расположенных на продольных галсах, с помощью интерполяции глубин, расположенных на поперечных (рис. 7). Расхождения измеренных и расчетных глубин составили: при выполнении интерполяции методом ближайшего соседа до 50 см, билинейной интерполяции – до 30 см, треугольной интерполяции – до 20 см, а биквадратной сплайн-интерполяции – менее 10 см (рис. 8).

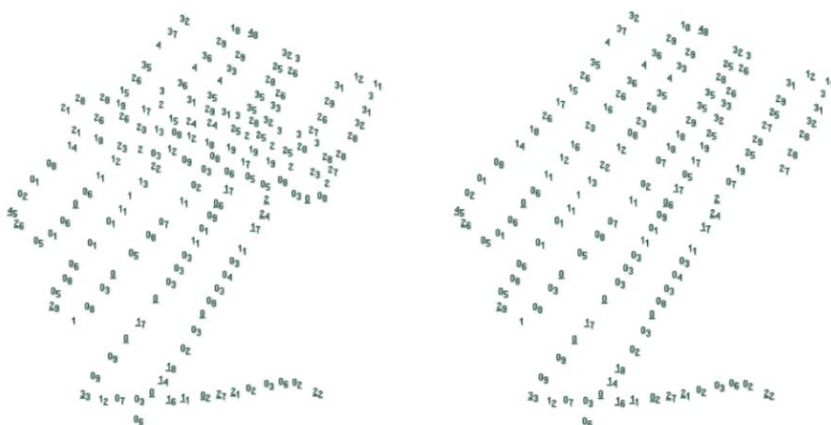


Рисунок 7 – Схема галсов и значения глубин на участке р. Северная Двина, используемые для контроля точности выполнения интерполяции даны слева; используемые для интерполирования – справа

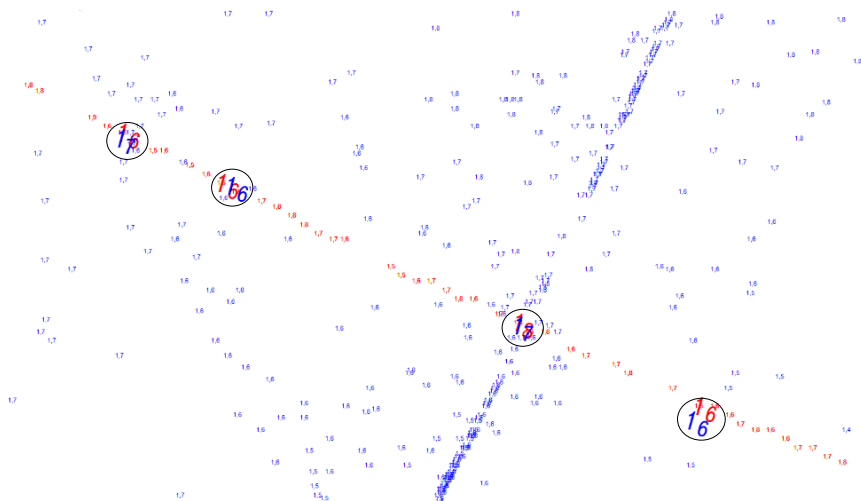


Рисунок 8 – Контроль точности выполнения биквадратной сплайн-интерполяции. Синим цветом показаны исходные глубины. Красным цветом – полученные при сгущении сети. Области, где расчетные глубины накладываются на измеренные выделены кружками<sup>1</sup>

Для анализа корректности нанесения СХ и изобат использовались модели и результаты выполненных в работе расчётов в сравнении с ЭНК р. Тавда, составленной специалистом-картографом без использования ЦМР (рис. 9). При наложении этих материалов видны значительные отличия в положении изобат и СХ (рис. 10).

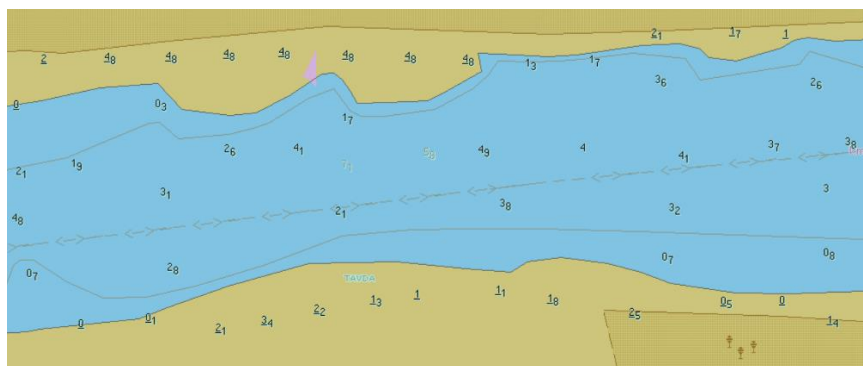


Рисунок 9 – Фрагмент ЭНК р. Тавда составленной без использования ЦМР. Безопасная изобата 1,2 м и СХ нанесены «на глаз»

<sup>1</sup> Местоположение промерного судна при выполнении гидрографических работ определено с пятиметровой точностью.

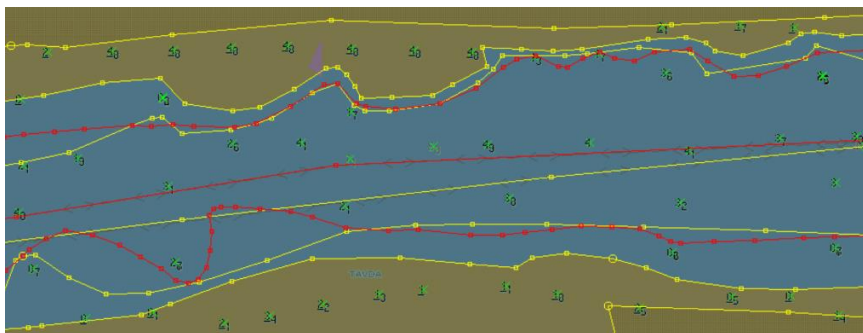


Рисунок 10 – Расхождение в нанесении изобат и СХ на ЭНК, составленной классическим методом без использования ЦМР (желтым цветом), и на ЭНК, составленной на основе математически построенной ЦМР (красным цветом)

В результате проведенного исследования были получены следующие выводы:

- Отклонение рассчитанных значений от исходных при выполнении биквадратной сплайн-интерполяции в пять раз меньше, чем при выполнении интерполяции «методом ближайшего соседа» и в общем минимально из всех исследуемых методов (треугольная, билинейная, «метод ближайшего соседа»). При применении метода биквадратной сплайн-интерполяции на участке р. Северная Двина не было обнаружено артефактов.

- Способ картографической реконструкции поверхности дна с помощью триангуляции Делоне и метода биквадратной сплайн-интерполяции можно рекомендовать для нанесения изобат и СХ.

- В некоторых случаях математически верный расчет положения СХ необходим для обеспечения безопасности судоходства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании выявлена проблема избыточного временного фактора при нанесении на НК ВВП рельефа дна. Разработанный в рамках диссертационного исследования метод позволяет решить актуальную научную задачу по сокращению времени создания НК с сохранением точности исходного промера. Для нанесения рельефа дна на НК впервые предложено создавать и использовать базы и банк геопространственных данных, а также ЦМР, построенные на основе нерегулярных сетей.

Разработанный метод нанесения рельефа дна на НК ВВП на основе трехмерного моделирования призван обеспечить судоводителей актуальной картографической информацией в интересах безопасности судоходства на ВВП.

Внедрение метода, предложенного в выполненном исследовании, обеспечит:

1) безопасность судоходства на ВВП РФ за счет использования на судах актуальной картографической информации;

2) повышение пропускной способности ВВП РФ за счет эффективного планирования маршрутов движения судов и осуществления навигации в условиях ограниченной видимости;

3) снижение затрат судовладельцев (в связи с сокращением потребления топлива) и АБ ВВП (в связи с сокращением персонала картографических отделов);

4) возможность внедрения безэкипажного судоходства (при соблюдении ряда других условий);

5) повышение привлекательности, конкурентоспособности, а в конечном счете – и доли ВВП в общем объеме перевозок.

В связи со стремительным развитием технологий (возможностей ПО, используемого для создания карт, оборудования, применяемого для хранения и обработки информации и для выполнения гидрографических съёмок, а также внедрения безэкипажных технологий) ожидается дальнейшая разработка методов описания водных объектов и автоматизация деятельности по созданию навигационных пособий на ВВП для обеспечения судоходства.

### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**

Работы по теме диссертационного исследования, опубликованные автором в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

1 Ратнер, Е. А. Анализ точности методов интерполяции при нанесении рельефа дна на навигационные карты внутренних водных путей / Е. А. Ратнер // Вестник государственного университета водных морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2021. – Т. 13. – № 5. – С. 685 – 693.

2 Ратнер, Е. А. Сплайн-интерполяция для построения трехмерных батиметрических моделей при картографировании внутренних водных путей / Е. А. Ратнер, А. И. Зайцев, М. А. Квасной // Вестник государственного университета водных морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2020. – Т. 12. – №5. – С. 894 – 905.

3 Ратнер, Е. А. Атрибут «Категория зоны доверия» для морских и речных бумажных и электронных карт / А. И. Зайцев, Е. А. Ратнер, А. Н. Пивоваров, В. И. Дорошенко // Речной транспорт (XXI век). – 2017. – №4(84) – С. 31 – 34.

4 Ратнер, Е. А. Внедрение автоматизированных тральных комплексов для обеспечения безопасности навигации / В. В. Каретников, Е. А. Ратнер, А. И. Зайцев // Вестник Государственного университетам

морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2017. – Т. 9. – № 4. – С. 744 – 751.

5 Ратнер, Е. А. «Транзас» в Федеральной целевой программе «Глобальная навигационная система» / М. И. Исмагилов, Н. В. Осадчук, Е. А. Ратнер // Морской вестник. – 2012. – № 2 (42). – С. 57 – 62.

В изданиях, индексируемых Scopus:

6 Ratner, E. A. Gradient fill fairway plotting method for charting inland waterways / V. V. Karetnikov, A. A. Butsanets, A. I. Zaitsev, E. A. Ratner, // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – №867. – DOI:10.1088/1755-1315/867/1/012011

7 Ratner, E. Introduction of the automated hydrographic survey systems for creation of electronic nautical charts of internal waterways in Southern Africa / V. Karetnikov, E. Ratner, A. Ageeva // 2017 IEEE AFRICON: Science, Technology and Innovation for Africa. – 2017. – С. 1479 – 1484. DOI:10.1109/AFRCON.2017.8095700.

В других изданиях:

1. Зайцев, А. И. Использование банка геопространственных данных при картографировании внутренних водных путей Российской Федерации / А. И. Зайцев, Е. А. Ратнер // Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ «Нацразвития», Санкт-Петербург: изд-во ГНИИ «Нацразвития». – 2020 – С. 44 – 46.

2. Зайцев, А. И. Краткий анализ состояния электронной картографии на ВВП РФ / А. И. Зайцев, Е. А. Ратнер // Сборник статей по материалам Международной научной конференции «Наука. Исследования. Практика», Санкт-Петербург: изд-во ГНИИ «Нацразвития». – 2020 – С. 51 – 53.

3. Зайцев, А. И. Создание единого информационного пространства в рамках реализации стратегии е-Навигации на внутренних водных путях Российской Федерации / А. И. Зайцев, Е. А. Ратнер // Сборник докладов Национальной ежегодной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», Санкт-Петербург: изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. – 2019 – С. 222 – 231.

4. Зайцев, А. И. Применение безэкипажных судов, оборудованных автоматизированными батиметрическими комплексами, в целях снижения роли «человеческого фактора» при обеспечении навигации на внутренних водных путях / А. И. Зайцев, Е. А. Ратнер // Сборник докладов научно-практической конференции «Перспективы безэкипажных технологий на водном транспорте», Санкт-Петербург: изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. – 2018 – С. 22 – 27.

5. Каретников, В. В. Современные и перспективные инструментальные методы обеспечения навигации на внутренних водных путях Российской Федерации / В. В. Каретников, В. А. Бекряшев, Е. А. Ратнер // Морская радиоэлектроника. – 2017. – № 2 (60). – С. 34 – 37.