

GENERALIZATION OF THE UNDERWATER RELIEF IMAGE USING THE SPLINE APPROXIMATION METHOD ON A VECTOR ELECTRONIC CHART

I. V. Yuyukin

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

Special attention is paid to the need for reasonable generalization aimed at adequately displaying the characteristic features of the seabed relief profile in accordance with the principle of navigational isosurface in electronic visualization of underwater relief. It is assumed that as a result of generalization of the bottom relief, safety contours can be extracted directly, since they represent traces of a cross-section of the profile of the underwater relief with horizontal planes. A hypothesis has been put forward on the applicability of the B-spline approximation for modeling a safety contour in order to effectively implement a practical guarantee against grounding a ship. A modification of the safety contour based on the control of the smoothness of the constructed curve in the form of bending of a serpentine B-spline structure has been tested. An analysis of the optimality of configuring B-splines on a variable type of supports is carried out with the determination of preference for the cubic case. The straightening of the safety contour focuses on local deformation while maintaining strategic descriptive characteristics. The use of the smoothing procedure on the deep side of the safety contour is justified, provided that the basis points of the synthesized curve are artificially preserved. The data of the author's computational experiment on the accuracy of calculation by cubic B-splines with a result two orders of magnitude higher than theoretically predicted are presented. It is noted that the technologies of automated processing of bathymetric survey results do not replace the human factor, but provide the potential to unlock new cognitive capabilities of an expert in the transition from lithographic publications to digital cartographic products. The arsenal of basic piecewise approximation is interpreted as the variability of the model of an additive B-spline neural network to provide an incentive for the use of artificial intelligence to generalize contour lines of marine subjects. It is emphasized that the spline technology, by its mathematical architecture, is basically devoid of the computational problem of dimensionality, which serves as an additional factor for the use of piecewise approximation in solving complex navigation tasks.

Key words: navigational isosurface, generalization of the underwater relief, snake B-spline structure, straightening of a safety contour, smoothing procedure, B-spline neural network, the problem of dimension.

For citation:

Yuyukin, Igor V. "Generalization of the underwater relief image using the spline approximation method on a vector electronic chart." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 16.6 (2024): 910–934. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-910-934.

УДК 656.61.052

ГЕНЕРАЛИЗАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО РЕЛЬЕФА МЕТОДОМ СПЛАЙНОВОЙ АППРОКСИМАЦИИ НА ВЕКТОРНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КАРТЕ

И. В. Ююкин

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Особое внимание в работе уделено необходимости обоснованной генерализации, направленной на адекватное отображение характерных особенностей профиля рельефа морского дна в соответствии с принципом навигационной изоповерхности при электронной визуализации подводного рельефа. Предполагается, что как результат генерализации рельефа дна непосредственно могут быть использованы изобаты, поскольку они представляют собой следы сечения профиля подводного рельефа горизонтальными плоскостями. Выдвинута гипотеза о применимости B-сплайновой аппроксимации для моделирования без-

опасной изобаты с целью эффективной реализации практической гарантии от посадки судна на мель. Апробирована модификация изобаты на основе управления плавностью сконструированной кривой в виде изгиба змеевидной В-сплайновой структуры. Выполнен анализ оптимальности конфигурирования В-сплайнов на различном типе носителей с определением предпочтения кубическому случаю. Спрявление безопасной изобаты акцентируется на локальной деформации при сохранении стратегических описательных характеристик эмпирической кривой. Обосновано использование процедуры сглаживания на глубокой стороне безопасной изобаты при условии искусственного сохранения базисных точек синтезированной кривой. Приведены данные авторского вычислительного эксперимента точности расчета кубическими В-сплайнами с результатом на два порядка выше теоретически прогнозируемой. Отмечается, что технологии автоматизированной обработки результатов батиметрической съемки не заменяют человеческий фактор, но дают потенциал раскрыть новые когнитивные возможности эксперта при переходе от литографских изданий к цифровым картографическим продуктам. Арсенал базисной кусочной аппроксимации интерпретируется как вариативность модели аддитивной В-сплайновой нейронной сети для обеспечения стимула к применению искусственного интеллекта для обобщения контурных линий морской тематики. Подчеркивается, что сплайновая технология по своей математической архитектуре в принципе лишена вычислительной проблемы размерности, что служит дополнительным фактором для применения кусочной аппроксимации при решении сложных навигационных задач.

Ключевые слова: навигационная изоповерхность, генерализация подводного рельефа, змеевидная В-сплайновая структура, спрявление безопасной изобаты, процедура сглаживания, В-сплайновая нейронная сеть, проблема размерности.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Генерализация изображения подводного рельефа методом сплайновой аппроксимации на векторной электронной карте / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 910–934. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-910-934.

Введение (Introduction)

Одним из основных компонентов, характеризующих навигационно-гидрографические условия морских районов, является рельеф дна, поскольку он оказывает существенное влияние на безопасность маршрутизации морских подвижных объектов [1]. При изображении подводного рельефа большое значение имеет обоснованная генерализация, направленная на отображение характерных особенностей профиля рельефа морского дна. Под картографической генерализацией понимается отбор и обобщение изображаемых на карте объектов соответственно их назначению, масштабу, содержанию и особенностям подводного рельефа. Генерализация с элементами абстракций проявляется в обобщении качественных и количественных характеристик объектов, замене индивидуальных понятий собирательными, отвлечении от частных и деталей в целях отчетливой визуализации главных черт пространственного размещения. При этом генерализацию удобнее рассматривать не как отдельные операции отбора и обобщения, а как единый процесс, который находит выражение в спрявлении изобат на месте исключенных извилин, в «утрировании» форм рельефа, в целенаправленном смещении или сдвиге изобат для достижения достоверного изображения¹.

Процесс генерализации осуществляется путем допустимого упрощения подводного рельефа и выделения его характерных форм, полученных с помощью цифровой модели. В процессе генерализации всегда приходится находить баланс между эффективными визуальными приемами для описания форм концептуальной модели подводного ландшафта и методами, позволяющими получить точные данные о рельефе [2]. В конечном итоге цифровая модель рельефа визуализируется для его отображения на векторной электронной карте. Поскольку карты создаются в широком диапазоне масштабов, необходима соответствующая генерализация цифровой модели рельефа, в противном случае его представление будет неполным. Отсутствие генерализации рельефа снижает удобочитаемость карты и ухудшает ее визуальное восприятие.

Каждый метод генерализации выполняется в соответствии с масштабом карты и уровнем детализации, необходимым для четкого отображения и требует определенного сочетания между

¹ Смирнова Е. Б. Основы изображения подводного рельефа на морских картах. Л.: ЦКФ ВМФ, 1973. 162 с.

визуальным качеством и точностью представления данных. В вопросе детализации сложно найти точные рекомендации по типичному размеру рельефа. Обычно считается, что этот размер должен отражать особенности поверхности, характерные для картографического масштаба. Генерализация геометрической формы рельефа морского дна состоит в продуманном стилизованном упрощении очертаний географических объектов, при котором сохраняются их типичные формы и особенности кривизны, но при этом допускается целенаправленный сдвиг линий, их спрямление, увеличение деталей топографии, объединение контуров и намеренное изменение исходной формы изобаты в целях наибольшей наглядности и выразительности при достижении реалистичности отражения генезиса и морфологии. Как результат генерализации из модели рельефа дна непосредственно могут быть извлечены изобаты, области глубин и отдельные глубины [3].

Существующая классическая технология отображения рельефа дна основана на принципе отбора наименьших глубин на этапе построения модели рельефа дна, разрешающая способность которой определяется масштабом электронной карты, а не стремлением подробного отображения рельефа дна. Методика представления данных съемки в виде навигационной изоповерхности рассматривается как альтернатива традиционному методу представления информации о рельефе дна для создания детальных баз батиметрических данных [4]. По своей сути данный подход может оцениваться как новый принцип картографирования рельефа дна судоходных акваторий [3]. С позиции требований, предъявляемых к навигационной изоповерхности, данные съемки архивируются как полная цифровая модель морского дна, а не как отдельный набор сертифицированных зондирований.

Разработанный процесс обработки батиметрической информации в парадигме навигационной изоповерхности предлагает новый перспективный подход к управлению, архивированию и созданию картографических продуктов на основе данных гидрографической съемки. Подход к проблеме генерации гидрографических глубинных контуров из необработанных входных данных с позиций понятия навигационной изоповерхности основан на непрерывной интерполяции плоскометрических точек батиметрических данных для обоснованного картографического обобщения. При игнорировании привязки к сетке или растеризации сохраняются позиции всех входных точек в их контурных координатах в процессе математической обработки, что с точки зрения геометрической реализации формирует кусочно-линейную поверхность как систему линий контуров глубины и создает удобную возможность аппроксимации непосредственно навигационной изоповерхности методами сплайн-функций.

Применимость методологии навигационной изоповерхности для автоматизированной организации обработки высокоскоростных измерительных данных многолучевого эхолота на основе их представления в виде цифровой модели проверялась практически проведением натурных экспериментов на специализированных судах [5]. Эксперименты показали, что сплайновый алгоритм может использоваться в режиме реального времени в отличие от традиционного подхода, но для получения максимальной выгоды от предлагаемого метода необходима тесная интеграция инструментов визуализации и математической корректуры результатов измерений, в данном случае ожидаемый прогресс будет варьироваться в зависимости от качества исходных данных. В целом гидрографические исследования доказали, что концепция навигационной изоповерхности может обеспечить точное статистическое представление морского дна. Считается возможным формировать представление гидрографических данных в виде навигационной изоповерхности на основе оптимизированной сплайнового алгоритма с обеспечением сохранения в виде цифровой модели полученных при съемке геопространственных данных большой разрешающей возможности [6]. Целостный сплайновый подход исключает субъективность предлагаемого метода отбора глубин для нанесения их на электронную карту при создании цифровой модели рельефа дна, интерпретируемой в математическом смысле как навигационная изоповерхность.

Геометрически изобаты представляют собой следы сечения форм подводного рельефа горизонтальными плоскостями, находящимися одна над другой на заданных расстояниях. Значение приобретают подходы создания цифровой модели рельефа по изолиниям с восстановлени-

ем методами сплайн-функций информации, заложенной непосредственно в структуре изолиний как геометрических объектов [7]. Изобаты, сформированные на основе математического обобщения отметок глубин, несут гораздо больше информации, чем набор отдельных значений глубины, по которым их проводят. С появлением акустических средств измерения глубин изобата проявила другую графическую возможность — передавать в изолиниях морфологические особенности рельефа: очертания форм, крутизну и расчлененность подводных склонов. На основе результатов анализа коллекции изобат можно представить общий характер подводного рельефа.

В последние десять лет начали издавать специальные морские карты, на которых для большей наглядности используют цветовую и светотеневую пластику в виде послойной окраски с приемами «освещения» и «затенения» изобат [8]. В приеме *освещенных изобат* вся поверхность морского дна закрашивается определенным тоном, а изобаты вычерчиваются белым цветом на освещенных поверхностях подводного рельефа и темно-синей на противоположных. Такое изображение способствует усилению объемного восприятия очертаний форм рельефа. К сожалению, этот прием затрудняет использование навигационных морских карт по своему прямому назначению: становятся малозаметными другие элементы гидрографической нагрузки, снижается контрастность линий, обозначений и надписей при подъеме карты и ведении навигационной прокладки. Прием *затененных изобат* по принципу создания объемной картины рельефа не отличается от способа «освещения». Однако здесь вся площадь дна остается белой. На освещенных склонах изобаты проводят более тонкими голубыми линиями, а на теневых — утолщенными линиями темно-синего цвета. Для большего усиления наглядности помимо «освещения» или «затенения» изобат дополнительно используют послойную окраску. Для морских акваторий традиционны оттенки серого, зеленого, синего и фиолетового цветов со шкалами возрастающей яркости от черного к белому цвету [9].

Изобаты отображают геоморфологическую особенность морского дна, показательно указывают на мелководье и обеспечивают наглядность навигационной информации для мореплавателей. Скоординированная модификация изобат выполняется либо при переходе от одного масштаба к меньшему, либо в пределах заданного масштаба для улучшения качества представления. Вследствие данных фактов сплайновое моделирование изобат представляет самостоятельный научный интерес для отдельного исследования.

В ходе практической реализации исследования сформулированы следующие задачи:

1. Исследование вопроса важности аппроксимации изобат в фокусе четкой визуализации на ЭКНИС как следствие генерализации подводного рельефа.
2. Проведение анализа оптимальности конфигурирования *B*-сплайнов на вариативном типе носителей.
3. Создание алгоритма приближения изобаты базисными финитными сплайнами с обеспечением конструктивного сжатия массивов данных навигационных параметров.
4. Программная реализация для бортового компьютера *B*-сплайнового алгоритма в целях обеспечения автоматизированного моделирования изобаты.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Изобата в полной мере предоставляет важную графическую возможность передавать в изолиниях морфологические особенности рельефа при составлении батиметрических карт по результатам гидрографических исследований. Поэтому при формировании изображения подводного рельефа на морских в первую очередь выбирается обработка отдельных *безопасных изобат* с акцентированием большого внимания меньшим глубинам. В решении задачи картографического обобщения представляется целесообразным акцентировать внимание на моделировании *безопасной изобаты*, которая как ограждающая изолиния является виртуальной границей между потенциальной опасностью для морского подвижного объекта и безопасностью судоходства в качестве гаранта от посадки судна на мель в морской акватории, находящейся за критическим контуром контрольной глубины. Фактическая глубина безопасной изобаты может быть оперативно

изменена вахтенным помощником с учетом конкретных обстоятельств плавания. Под вводимой судоводителем параметром «безопасная изобата» понимается глубина, пересечение которой заблаговременно автоматически предупреждается аварийной сигнализацией ЭКНИС как о риске посадки на мель.

Смысл параметра «безопасная изобата» заключается в однозначном обозначении границы опасности мореплавателям при представлении на экране ЭКНИС окрашиванием мелководья в сине-голубой цвет и безопасного в навигационном отношении открытого моря в виде белого фона, как показано на рис. 1. Ограничивающая мелководье модель линии равных глубин как границы навигационной опасности выделяется насыщенным цветом с допустимым варьированием на мониторе ЭКНИС ее местоположения от береговой черты в зависимости от заданного фактического значения параметра «безопасной изобаты».

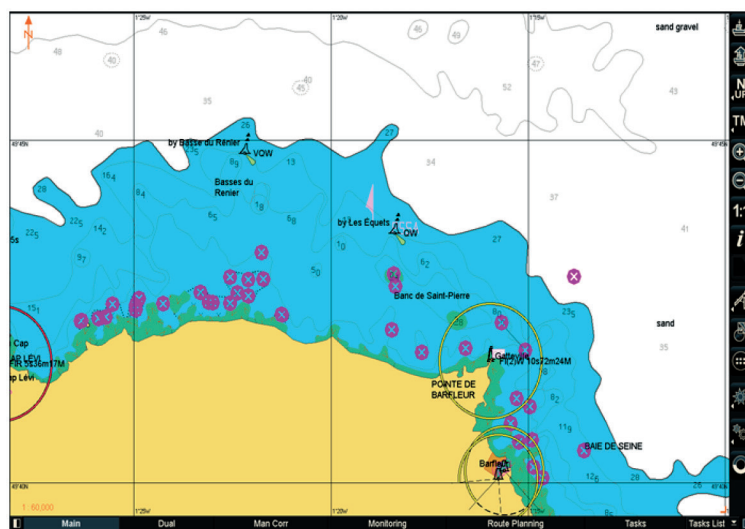


Рис. 1. Скриншот фрагмента векторной электронной карты с фиксированием «безопасной изобаты»

Приоритетную важность приобретает установка в режиме мониторинга ЭКНИС предметной реализации вариационной опции «безопасная изобата». Фактически при помощи данной функции судоводитель самостоятельно задает для собственного судна безопасную границу области электронных глубин. В общем случае изобату 20 м следует считать *предостерегательной* для судов с осадкой более 6 м, а изобату 10 м — для судов с малой осадкой². В настройках современных ЭКНИС значение *опасной изобаты* по умолчанию задается равным 30 м³.

Цифровой характер линии, хоть и представляет собой исследовательский потенциал, но одновременно демонстрирует масштаб проблем, связанных с апостериорной оценкой точности формы контурной линии. Неопределенность в наличии навигационных опасностей приводит к неопределенности в построении изобат в условиях недостаточной гидрографической изученности подводного рельефа [10]. Вследствие этого применяется *картографическое обобщение*, которое начинается с обработки контуров малой глубины и продолжается на изолиниях больших глубин. С целью релевантного составления электронных карт применяется надежное редактирование батиметрической информации, отображаемой на морской карте как обеспечение процесса, называемого *картографическим обобщением*. Следует отметить, что судоводители в своей практической деятельности должны учитывать неопределенность отображения подводного рельефа на морских навигационных картах и понимать, что морская навигационная карта не гарантирует отображение всех подводных навигационных опасностей [10]. В этом смысле картографическое

² Дмитриев В. И. Навигация и лоция: учебник. М.: ФГБУ «Морречцентр», 2015. — 360 с.

³ Дерябин В. В. Использование электронных картографических навигационных информационных систем: тренажерная подготовка: учеб. пособие. СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2024. — 140 с.

решение, как правило, не является уникальным, но удовлетворяет различным требованиям в большей или меньшей степени.

Картографическое обобщение соответствует общему принципу безопасного судоходства для обеспечения тенденции смещения обобщенного контура глубины в глубоководные районы [11]. Каждая критическая линия контура глубины должна быть обобщена индивидуально. Картографическое обобщение может быть успешно реализовано, если оно основано на понимании формы изобаты. До тех пор, пока визуальный признак четкости изолинии не будет определен аналитически, он будет оставаться основной гидрографической проблемой для полной автоматизации задачи обобщения. По мере совершенствования технологии сбора батиметрических данных с более высоким разрешением повышается потребность в устойчивых автоматизированных алгоритмах обобщения, учитывающих ограничения морской картографии, поскольку ошибки на этом этапе переносятся на конечный электронный продукт.

Формальное описание формы изобаты без учета геометрических различий является необходимым условием для изучения ошибок, возникающих при обобщении данных для предотвращения любых рельефных несоответствий. Таким образом, погрешность становится функцией формы репрезентативной линии на электронной карте, которая является необратимым детализированным фактором. Процедура обобщения соответствует картографическому принципу: изображенное на карте меньшего масштаба аналогично должно быть изображено на картах большего масштаба с целью обеспечения надежного уровня детализации. В целом метод обобщения глубинных контуров обеспечивает целостный подход к проблеме адекватного представления батиметрических данных на современных электронных картах. Электронное представление навигационной нагрузки должно создаваться как удобочитаемая карта, максимально приближенная к реальности.

Помимо требования безопасности, в процессе обобщения необходимо учитывать обязательность условия удобочитаемости электронной карты. Ни при каких обстоятельствах безопасная изобата не должна допускать любых геометрических «конфликтов», таких, например, как изобатная петля или пересечение изобат. Эти противоречия необходимо устранить во время операции картографического обобщения. Каскадные конфликты визуализации изобат необходимо расценивать как мнимые пересечения, поскольку картографическое представление не соответствует масштабу или имеет проявление неожиданных графических эффектов из-за возможных математических ошибок. Реалистичное восприятие визуализированной информации на мониторе ЭКНИС ориентировано на эффективную обработку результатов гидрографической съемки посредством агрегирования батиметрических данных, реализующегося в геометрическом контексте в *обобщении изобат* [12]. Целевое назначение обобщения заключается в четком графическом представлении любых линий на векторной электронной карте оптимальным образом. Процесс обобщения реализует комбинацию различных геометрических моделирований с целью достижения картографического компромисса для безопасности судовождения [13]. С математической точки зрения в процессе обобщения гарантированно обнаруживается серия конфликтующих сеточных сегментов интерполирующей функции. Перегруппировав проблемные сегменты, можно получить удовлетворительную сплайн-аппроксимацию батиметрических данных.

Обобщенное представление изобаты — это процесс выбора того, какое содержание должно быть убедительно показано и как оно будет представлено на электронной навигационной карте в процессе обработки пространственных данных с целью достижения четкой картографической визуализации контура глубины для обеспечения безопасности плавания судов. Унифицированным вариантом приближения изобат представляется применение методов базисных сплайн-функций. *В*-сплайновые изолинии не требуют явного задания производных и локальное изменение узлов не приводит к необходимости повторного вычисления всей алгебраической кривой. *В*-сплайн в геометрическом представлении является составной линией, позволяющей при аппроксимации набора сеточных точек избежать нежелательных осцилляций, характерных для интерполяционных многочленов высокой степени.

Численные расчеты при тестировании известного феномена Рунге показали, что гарантированно обеспечивается высокая точность аппроксимации в ситуации применения базисных сплайнов третьей степени [14]. Увеличение степени полинома для улучшения заданного соответствия может привести к неожиданным флуктуациям в соответствии с онтологией примера Рунге как классического доказательства ухудшения восстановления формы алгебраической кривой при необоснованном выборе сплайна высокой степени в качестве аппроксиматора. Вычислительная оптимальность аппроксимации любой изобаты основана на практическом применении B -сплайнов, которые при конструктивной гладкости имеют минимальный носитель с локальным интерполяционным базисом. Это обеспечивает при введении новых узлов локальное изменение сплайна. В локальных схемах аппроксимаций при достижении максимального порядка точности коэффициенты при базисных функциях определяются как значения функционалов, представляющих в математическом формате комбинации значений приближаемой функции и ее производных в определенных маркерных точках.

Стратегическое преимущество изолинии, построенной при помощи кубических B -сплайнов, заключается в том, что намеренное изменение одной из характеристических точек изолинии вызовет изменение только четырех последовательных соседних сегментов восстановленной кривой. Как следует из анализа рис. 2, тактическое варьирование одним геометрическим фрагментом обуславливает в кубическом случае сплайна модификацию только четырех сеточных отрезков и позиций пяти характеристических точек при алгоритмической возможности местной корректировки дефектного фрагмента сплайновой линии без фатальной перестройки всей аппроксимированной изолинии.

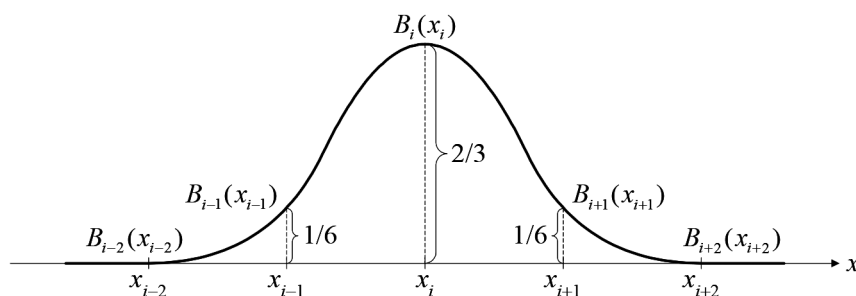


Рис. 2. Четыре сеточных сегмента
и пять узловых точек единичного кубического B -сплайна

В соответствии с рис. 2 набор локальных базисных функций в сумме образует неотрицательное разбиение единицы. Для того чтобы локально изменить кривизну общей геометрии изолинии, первоначально необходимо определить смежные контрольные точки, влияющие на кривизну, а затем изменять их позиции одну за другой (см. рис. 2). При кусочном синтезировании базисная финитная функция является вторичным фактором по отношению к оригинальной формализации, а сам B -сплайн — математическим инструментарием для приближения навигационной изолинии. Оптимальный способ устранения геометрических особенностей оригинальной изобаты реализуется в построении сплайнового многозвенника, в котором составные полиномы низкой степени последовательно применяются для первоначальной интерполяции навигационной функции на базисе групп точек. Полученная в результате «склеенная» кусочно-полиномиальная конструкция будет непрерывной, но в общем случае может иметь разрывы производных в точках соединения последовательных отрезков алгебраической кривой.

Представляется целесообразным выполнить анализ оптимальности конфигурирования B -сплайнов на вариативном типе носителей. Существует возможность построить систему базисных функций различными путями. Можно, например, умножить $B_i(x_i)$ на скалярные множители и получить альтернативную систему. В прогнозируемой ситуации «шапочные» функции утратят свойство нормализованности, т. е. алгоритмической возможности разбиения численной единицы на составляющие для базисного сплайна (см. рис. 2). Можно построить финитные функции и с другим носителем,

содержащим не четыре интервала, а, например, пять или более, но уменьшить носитель не удастся. В этом можно убедиться, если выполнить подсчет коэффициентов и условий, налагаемых на элементы $B_i(x_i)$.

В случае носителя, состоящего из трех интервалов, число коэффициентов равно числу условий, и решением служит сплайн, тождественно равный нулю. При двух сеточных интервалах задача переопределена, т. е. коэффициентов меньше, чем условий, и также имеет место лишь нулевое решение. Таким образом, задача искусственного моделирования изобат решится наилучшим образом, если применяемая кубическая базисная функция образуется на четырех сеточных носителях. Благодаря конструктивной особенности построения базисной структуры B -сплайна третьей степени на четырех сеточных отрезках объем хранимой информации аппроксимации, соответственно, сокращается в 4 раза по сравнению с алгоритмом классической полиномиальной сплайн-интерполяции [15]. При существующей вариативности применения базисных сплайнов выдвигается теоретический аргумент в пользу оптимальности кубической B -сплайновой конструкции с управляемой кривизной для моделирования любых контурных линий морской тематики [16]. Предлагается применять математическую формализацию безопасной изобаты на основе методов сплайн-функций для автоматизации процесса изолинейного плавания.

Традиционные навигационные параметры в общепринятом смысле полностью характеризуют внутреннюю геометрию изолинии плавания судна⁴. В ситуации применения сплайн-функций добавляется дополнительный параметр внутренней геометрии аппроксимированной изолинии — математическая «гладкость». Параметрическое представление навигационной изолинии может составить фундаментальную основу для конструирования инновационного технического устройства с целью организации изолинейного плавания при условии восстановления геометрии характерной изолинии методом сплайн-аппроксимации. Важное практическое свойство вытекает из кусочной архитектуры сплайна, который восстанавливает навигационную функцию группой сегментных полиномов в соответствии с условием «гладкости» на каждом сеточном участке.

Для автоматизации процесса выбора программной траектории и управления движением судна необходимо иметь математическое описание опасной изобаты в географической системе координат. Сплайн, описывающий опасную изобату с точки зрения навигационной безопасности, должен восстанавливать ее с заданной точностью, а с точки зрения удобств хранения информации использовать как можно меньше узлов для сокращения объема данных [17]. Предлагаемый метод может быть применен для уменьшения объема хранимой информации об опасной изобате при создании электронных карт.

Методы на основе базисных сплайнов являются перспективным инструментом для создания оптимальной схемы моделирования программируемой линии движения судна [18]. В перспективном аспекте универсальность сплайн-функций предусматривается вследствие гипотетической возможности прогнозирования организации программируемого плавания не только по изученным классическим изолиниям, но и по новейшим линиям равных значений навигационных параметров, которые могут появиться в будущем при технологических инновациях судовождения. Сплайновую апробацию аппроксимации безопасной изобаты финитными сплайнами можно трактовать как усиление позиций обобщенного метода навигационных изолиний с применением достижений перспективной математики.

Результаты (Results)

Несмотря на то, что в процессе литографской печати получался, бесспорно, красивый внешний вид бумажной карты, тщательная типографская подготовка гарантирует, что навигационная информация морально устареет к тому времени, когда мореплавателю доставят карту на судно. В условиях современности автоматическая корректура ЭКНИС играет важнейшую роль для первоочередного

⁴ Вульфович Б. А. Основы общей теории навигационных изолиний: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Б. А. Вульфович. Л., 1975. — 43 с.

информирования судоводителя о безопасности судоходства по электронной карте при четкой наглядности визуализации безопасных изобат.

Большинство навигационных карт представляют собой совокупность геопространственной информации различного качества, аккумулированной с использованием различных методов в разное время. Данные, полученные с помощью многолучевых эхолотов высокого разрешения, могут соседствовать на карте с гидрографической информацией, собранной еще в XVIII в. [19]. Гидрографические работы относятся к дорогостоящим видам морской деятельности, поэтому при их проведении приходится преодолевать противоречие между необходимостью увеличения подробности съемки и планированием обследования максимальной по площади акватории [10].

Несколько десятилетий назад требования к высококачественным картам были иными, чем в условиях современности. Чтобы удовлетворить постоянно растущие потребности современного торгового судоходства в более точном знании рельефа морского дна, мировое гидрографическое сообщество внедрило новые системы и методы сбора, обработки и распространения информации. Значительным достижением в морской навигации за последние три десятилетия, безусловно, является ЭКНИС. Помимо отображения информации, содержащейся в электронной карте, реализована интеграция навигационных систем ГНСС, АИС и САРП. Максимальное интегрирование разнородных систем позволяют современным судоводителям оперативно выполнять задачи, которые в прошлом мореплавателям было сложно решать [20]. Примером является электронная маршрутизация судна с активацией функции аварийно-предупредительной сигнализации в ситуации, когда судно пересекает безопасную изобату. Кроме того, метеорологическая и океанографическая информация может быть инкорпорирована в ЭКНИС, помогая вахтенному помощнику эффективно выполнять рейсовое задание.

Гидрографические данные содержат набор зондирований со значительным количеством нарушений картографических ограничений, что создает прецедент необходимости последующего картографического обобщения. Полная автоматизация процесса составления электронных морских карт усложняется из-за строгих каскадных картографических ограничений, связанных с безопасностью и подводной топологией, в то время как остается сомнение, может ли автоматизация абсолютно заменить человеческий элемент [21]. Креативные технологии автоматизированной обработки результатов батиметрической съемки не столько заменяют человеческий фактор, сколько дают ему потенциал раскрыть новые возможности при переходе от литографских картографических изданий к цифровым моделям. Подтверждением служит тот факт, что на период 2015 г. более 4000 лоцманов как участников балльной системы поощрения ассоциации лоцманской службы США в соответствии с передовым опытом политики краудсорсинга внесли более 28000 значимых исправлений в национальные электронные карты [22].

В связи с растущим развитием технологии ЭГИС необходимость совершенствования эффективных методов визуализации географических данных является актуальной задачей [23]. Формально автоматизированная обработка гидрографической информации доступна к практической реализации, но проверка батиметрических данных в определенных обстоятельствах остается ручным процессом в условиях недостаточной гидрографической изученности подводного рельефа. Поэтому Правила гидрографической службы № 4 (Съемка рельефа дна суходонных морских и речных акваторий. — СПб.: УНиО МО РФ, 2014. — 314 с.) определяют необходимость интерактивного исправления данных при атрибутировании результатов съемки рельефа дна с обеспечением 95%-й доверительной вероятности: «...После автоматической обработки выполняется просмотр результатов. Их проверка и / или разрешение любых оставшихся неопределенностей должны осуществляться опытным и ответственным гидрографом». Обработка гидрографических данных сокращается в результате акцентирования внимания только на тех областях, в которых определена значительная неопределенность промеров для выявления аномальных морфологических особенностей морского дна. Для этого этапа рекомендуется использовать средства трехмерного отображения. Достоверность данных съемки является основным критерием качества выполненных работ.

Поскольку визуализация электронной карты автоматизирована, специалист может сосредоточиться исключительно на проверке сомнительного результата [12]. В этом случае увеличивается скорость изготовления векторных электронных карт и значительно снижаются производственные затраты. Идеальной ситуацией была бы реализация полного автоматизированного обобщения для бесперебойного создания морских карт из обширной базы данных. Однако, несмотря на исследовательские усилия с использованием искусственного интеллекта, задачи обобщения морских карт остаются полностью нерешенными в автоматизированном аспекте, в отдельных ситуациях выполняются вручную или полуавтоматически при ожидаемом допущении влияния человеческого фактора [11].

Аппроксимация изобат на основе применения финитных сплайнов позволяет использовать алгоритмические преимущества в морском контексте. Оптимальным образом изобаты моделируются с помощью *B*-сплайнов, сохраняющих плавность сконструированных кривых. Интуитивное понимание принципа построения аппроксимирующей изобаты сводится к реализации приближения к фиксированным контрольным вершинам, которые находятся на стороне безопасной глубины. Допускается возможность приложить искусственные усилия в определенных местах области определения навигационной функции, чтобы частично деформировать изолинию в сторону безопасности. Основанное на особенностях обобщения изобат в соответствии со значимостью подчеркивает характерные подводные объекты в соответствии с их значением. Например, изобата, моделирующая риф, сохраняется и может быть увеличена, в то время как изобата, обозначающая впадину, может быть просто опущена [24].

Для практического выполнения задачи выполняются специальные математические операции частичного деформирования изолинии, обеспечивающие локальную коррекцию изобаты с целью изменения протяженности объекта в целях обеспечения *спрямления изобаты* [2]. С позиций сплайн-функций применяется аллегория змеиной модели с объяснением сути подхода в физических терминах сохранения внутренней энергии. Последующее сглаживание изолинии выполняется путем сохранения базисных точек кривой всегда на глубокой стороне безопасной изобаты, как представлено на рис. 3 [25], где показаны ограничения безопасности с помощью оригинальной линии безопасной изобаты (original isobath) и двух примеров ее обобщения. Применение точечной пунктирной линии недопустимо (non valid generalisation), поскольку она не проходит полностью по глубине исходной линии. Участки этой линии на мелководной стороне не соответствуют требованиям безопасности судоходства. Точечная пунктирная линия небезопасна, так как в этом случае судоводитель может подумать, что море фактически глубже, чем оно представлено на карте, в местах, отмеченных светло-серым цветовым оттенком. Пунктирная линия с длинными штрихами полностью проходит по глубокой стороне морской акватории (area of greater depth) и соответствует требованиям безопасности (valid generalisation). На рис. 3 рассмотрена ситуация, поясняющая необходимость реализации тенденции смещения контура безопасной изобаты в сторону более глубокой воды. При любых обстоятельствах навигационная карта должна соответствовать правилу смещения безопасной изобаты в сторону увеличения глубины для реализации гарантии того, что судно никогда не сядет на мель из-за искаженного предоставления гидрографической информации [25].

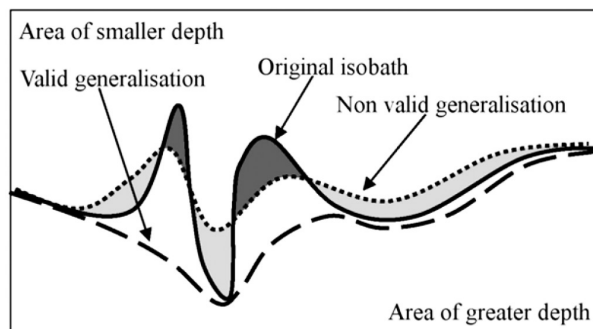


Рис. 3. Обобщение безопасной изобаты в сторону глубоководной акватории

При изменении масштаба карты на меньший необходимо сгладить изобату, чтобы удалить ненужные детали и получить разборчивую четкость плоской кривой. Из анализа рис. 3 следует констатация факта ограниченности положения финальной безопасной изобаты, сглаживание которой необходимо выполнять, изогнув линию на более глубоководную сторону. Сглаживание используется для улучшения эстетических характеристик алгебраической кривой путем устранения острых углов и ослабления ее осциллирующих колебаний. Процесс сглаживания включает в себя упрощение формы безопасной изобаты за счет устранения неконструктивных деталей с целью сохранения основной информации о форме и ориентации кривой линии, удаляя при этом несущественную информацию. Сглаживание выполняется путем сохранения базисных точек сплайновой кривой всегда на глубокой стороне исходной линии, чтобы финальный результат соответствовал безопасности представления гидрографической информации [26].

Интерпретируемая по морской карте оцифровка изобаты не должна превышать реальной глубины [27], так как в противном случае судоводитель может посчитать, что глубина акватории превышает официальный подводный рельеф. Суть проблемы ограничения безопасности при реализации картографического обобщения отображает рис. 4 [2].

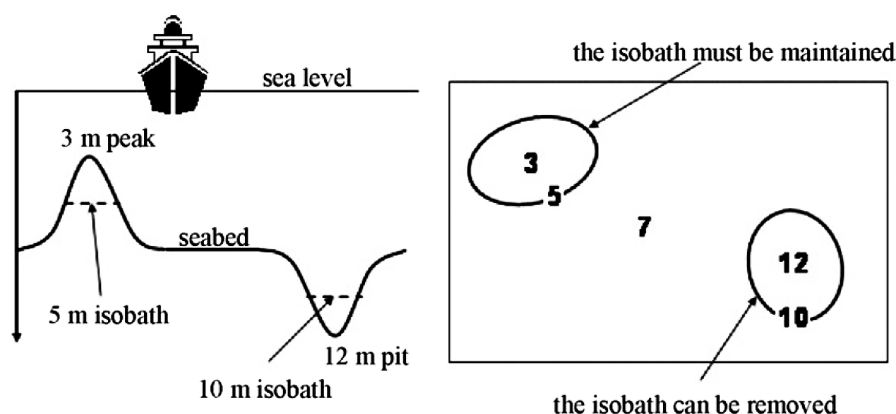


Рис. 4. Демонстрация ограничений безопасности с оцифрованными изобатами и точечными глубинами

Слева показан вертикальный разрез моря от морского дна (seabed) до водной границы уровня моря (sea level) с трехметровым выступом (peak) и 12-метровым углублением (pit), справа — фрагмент морской карты с изобатами и точечными глубинами, соответствующей демонстрируемой в левой части рис. 4 гидрографической ситуации. Изобату, обозначающую глубину в 10 м, можно убрать с графического представления данного географического участка (the isobath can be removed), но обязательно необходимо визуализировать пятиметровую изобату (the isobath must be maintained), обозначающую подводную вершину. На электронной карте необходимо сохранить рельеф морского дна и подчеркнуть наиболее характерные геоморфологические структурные элементы. Модификация изобатиметрического контура может производиться путем перемещения точек изолинии в более глубокие области морской акватории при абсолютной недопустимости обратной ситуации. Разборчивый результат гибридного подхода, при котором в ручном режиме проверяются и исправляются результаты работы автоматических алгоритмов обобщения, является актуальным и прагматичным решением. При картографическом обобщении изобат автоматизированная система не всегда может определить, какая сторона изобаты глубже. Например, возможна ситуация, когда окружающие изобаты находятся на одинаковой глубине. Необходима идентификация гидрографической информации, чтобы экспертная система могла правильно автоматически осуществить операцию обобщения изобаты.

В последнее десятилетие в картографическом обобщении на векторных электронных картах начал активно использоваться принцип смещения выпуклости безопасной изобаты в сторону глубоководной акватории с целью максимального обеспечения безопасности судоходства [28].

B-сплайновый метод, основанный на серпантинной аллегории змеиной модели, точно учитывает ограничения, связанные с удобочитаемостью и безопасностью морской карты, которые определяют тенденцию деформации синтезированной изобаты. Плоские кривые, моделируемые с помощью *B*-сплайнов, оптимально подходят для моделирования изобатиметрических контуров, поскольку они сохраняют плавность линий и позволяют оперативно формировать изменения сложных геометрических форм.

В процессе гидрографической обработки для оценки гладкости кривой используются две основные характеристики: натяжение и изгиб. Натяжение определяется первой производной по оси абсцисс криволинейной линии. Если производная глобально мала вдоль кривой, это означает, что кривая растянута. Напряжение также связано с длиной аппроксимируемого контура, поскольку кривая укорачивается при растяжении. Изгиб определяется геометрической кривизной. Обобщенные изобаты адекватно отображают геоморфологическую форму морского дна с изменчивой топологией, указывают на мелководье и обеспечивают безопасность навигационной информации для мореплавателей. Искусственная трассировка изобат выполняется таким образом, чтобы навигационная информация по своей сути была абсолютно безопасной для судовождения при выполнении условия сохранения эстетического качества векторной карты.

Аппроксимированная сплайнами изобата рассматривается как деформируемая модель с собственной энергией, определяемой ее производными, и учетом внешних ограничений, связанных с обеспечением безопасности при обязательном выполнении условия удобочитаемости карты. Безопасность судовождения соблюдается, если сглаженная кривая полностью расположена на более глубокой стороне акватории по сравнению с ее исходным положением. В физическом понимании для предотвращения неправильных графических смещений нормализованная энергия, пропорциональная расстоянию от начальной кривой, прикладывается к точкам, расположенным на меньшей стороне, что с математической точки зрения обеспечивает успешное манипулирование производными навигационной функции в фиксированных сеточных узлах.

При модификации топологии безопасной изобаты гарантированно может быть найдено положение интерпретируемого энергетического равновесия, которое удовлетворяет требованиям безопасности судовождения. Чтобы предотвратить незапланированную деформацию аппроксимированной изобаты, характерные контрольные точки фиксируются для сохранения основных характеристик изолинии. После сглаживания или уменьшения масштаба искусственная изолиния может быть представлена с меньшим количеством маркерных точек по причине удаления лишних метаданных карты. Количество реперных точек определяется для достижения наилучшего сжатия изобаты с допуском, заданным толщиной карандашной отметки на бумажной карте, чтобы человеческим взглядом не воспринималась разница между ломаной линией и сглаженной *B*-сплайновой кривой. Таким образом, форма плоской кривой определяется алгоритмически для того, чтобы в физической интерпретации обобщения сбалансировать влияние внутренней и внешней энергий таким образом, чтобы результирующая линия была как можно более гладкой, но при этом удовлетворяла внешним ограничениям безопасности.

В ходе процесса автоматизированного обобщения проверяется согласованность картографического решения путем выявления любых рельефных конфликтов. Геометрические противоречия устраняются путем удаления соответствующих сеточных сегментов *B*-сплайновой кривой и изменения ее формы за счет плавного изгиба на характерном интервале. Главное преимущество кусочных конструкций заключается в том, что они всегда обеспечивают плавное представление, которое улучшает операции сжатия и визуализации при масштабировании, проявляющемся в традиционном обобщении зигзагообразных эффектов ломаной дуги за счет использования многоугольных линий [25].

Ограничение гидрографической разборчивости означает отсутствие визуальных конфликтов, таких как пересечение изобат, их наложение друг на друга или условные эффекты графических пересечений, когда батиметрические контуры расположены слишком близко, чтобы их можно было различить. При уменьшении масштаба расстояния между сегментами

B-сплайнов, уменьшаются, соответственно, и геометрические конфликты. Если обобщение выполняется при изменении масштаба, то никаких конфликтов не происходит. Возможно, что в исходных данных уже имеются перегибы или петли изобат. Очевидно, они возникают из-за ошибок измерений или числовых погрешностей, допущенных на этапе сбора батиметрических данных. Конфликты, возникающие в процессе сглаживания, связаны с применением ограничений на смещение. Цель процесса генерализации фактически заключается в проверке согласованности геометрического решения путем выявления любых пространственных конфликтов в виде самопересечения изобат. Фактические пересечения изобат обычно возникают из-за ошибок сплайн-аппроксимации в областях с большим количеством изолиний.

Вероятность визуальных пересечений зависит от предельной точности масштаба морской карты. С целью предотвращения деформации синтезированной изобаты сохраняются основные характеристики линии за счет фиксации характерных контрольных точек. Деформации могут быть устранены путем локального смещения линии в сторону более глубокой воды за счет реализации математической операции сглаживания. Процедура сглаживания выполняется путем устранения небольших колебаний синтезированной изолинии при сохранении информации о форме и ориентации алгебраической кривой. Если внешние ограничения не накладываются, изобата сглаживается за счет уменьшения ее внутренней энергии в физическом смысле. В процессе сглаживания геометрическая форма изолинии становится более плавной, так что количество фиксированных точек уменьшается до тех пор, пока не будут зафиксированы минимально необходимые контрольные сеточные узлы, соответствующие основным характеристическим признакам.

Фиксация критических контрольных точек имеет две основные цели в этом процессе. Во-первых, сохраняются характерные особенности и форма кривой. Во-вторых, сглаживание осуществляется путем фактического нивелирования графических осцилляций. Поскольку эти точки не могут перемещаться, сглаживание вблизи них может быть выполнено только путем незначительного сдвига контрольных точек на большую глубину, чтобы обеспечить навигационную безопасность. В конце процесса сглаживания сложность синтезированной кривой может быть значительно снижена. Как следствие, моделируемая изолиния может быть представлена с меньшим количеством контрольных маркеров, позволяющим уменьшить объем метаданных. Топологические противоречия устраняются путем удаления соответствующих сеточных сегментов и изменения локальной формы изолинии.

B-сплайновая изобата рассматривается в виде змеи, а фактор сглаживания условно реализуется за счет уменьшения физической энергии серпантинной линии, определяемой манипулированием производными. Под изображением в виде змеи понимается параметрическая сплайн-функция, концентрирующая собственную энергию, связанную с ее пространственным положением. Когда физическая змея находится в стабильной ситуации, ее энергия минимальна. В перспективе змея будет деформироваться при максимальной экономии общей энергии для достижения минимизированного конфигурационного равновесия. Изобатой формально считается змея, полная энергия которой складывается из внутренней энергии, связанной с формализацией серпантинной линии и внешнего энергетического эффекта, определяемого потенциальными картографическими конфликтами, которые в виде каскадных ограничений применяются к обобщенной изолинии [13].

Энергии могут быть объединены для выполнения как сглаживания, так и смещения. Если картографическое обобщение нарушено, то внешняя энергия высока, и линия искусственно локально деформируется, чтобы свести внешнюю энергию к нулю и минимизировать общую энергию геометрической системы, обеспечивая физическое равновесие. Поскольку серпантинная плавность движения змеи как физического субъекта зависит от кривизны траектории, следует уделять большое внимание математической алгоритмизации энергии изгиба и плавности синтезированной изолинии. Изолиния считается гладкой, если ее энергия изгиба фактически значительно уменьшена. Внутренняя энергия определяется заданием соответствующих производных, поэтому ее уменьшение приводит к сглаживанию изобаты. Математические параметры контролируют натяжение и изгиб аллегорической змеиной модели. Поскольку гладкость характеризуется изгибом

в характерной точке, значение производной в этой точке равно нулю, а функциональность определяется константой. Аналогичным образом при обработке изображений для определения четких контуров применяются плавные линии, которые формируются своей собственной энергией, исходя из геометрических особенностей сплайн-функций. Общая серпантинная энергия определяется в соответствии с плавностью кривой и требованиями безопасности судовождения, чтобы обеспечить последовательную деформацию в нужном направлении. Удобочитаемое контурное решение графического представления изобат получается, когда общая энергия физической интерпретации математической системы минимизирована.

Успешность аппроксимации безопасной изобаты *B*-сплайнами зависит от точности входных батиметрических данных, ошибок округления, допущенных при вычислениях, а также от точности самой аппроксимации. Точность математического приближения навигационных функций графически в большей степени соответствует минимальному расстоянию, которое должно соблюдаться между двумя изобатами. Именно это значение формирует визуальные конфликты. Например, во избежание «конфликта» по расстоянию, линейный размер неровностей поверхности, которые должны быть показаны на российской топографической карте масштаба 1: 200000, должен составлять не менее 3–10 мм в зависимости от типа объекта [29]. Экспериментальная работа, проведенная на нескольких примерах реконструированных эталонных цифровых моделей рельефа по использованию топографических карт, обобщенных вручную, позволила вывести эмпирическое правило для выбора оптимальной относительной степени детализации для мелкомасштабного картографирования, которая составляет приблизительно 5–6 мм в масштабе визуализации [29].

Для оценки точности аппроксимации был протестирован *B*-сплайновый алгоритм с использованием единиц измерения батиметрии в сантиметрах. Согласно результатам эксперимента прогнозируемая точность *B*-сплайновой аппроксимации должна быть равна 10^{-4} при математическом восстановлении гидрографических данных в указанных единицах измерения с целью обеспечения стандартной предельной точности масштаба векторной электронной карты [30]. На основе результатов авторского вычислительного эксперимента получена точность расчета кубическими *B*-сплайнами в основном числовом диапазоне $10^{-6} \dots 10^{-8}$ погрешности навигационного параметра синхронизированных единиц измерения [14].

Вопрос вычислительной точности сплайнового алгоритма исследован в тестовом эксперименте при решении задачи фрагментарного восстановления поверхности сегмента сферы на сеточном патче размером 30×30 маркерных узловых значений (рис. 5). Сфера выбрана в качестве объекта оригинального исследования по факту представления поверхности постоянной гауссовой кривизны, что обеспечивает возможность получения реалистичных оценок точности сплайн-аппроксимации.

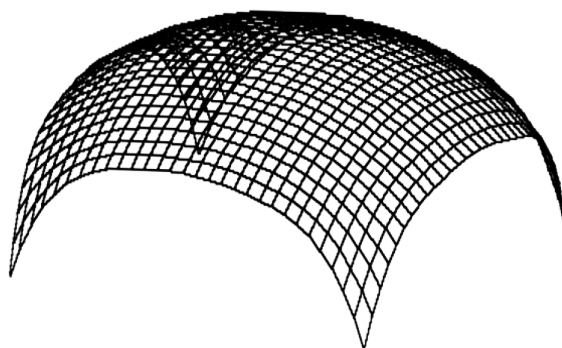


Рис. 5. Скриншот аппроксимированного сплайнового сегмента сферы

Точностные характеристики выводились на компьютерный дисплей при помощи задания в паскаль-программе специального логического условия по расчету абсолютной максимальной разницы между фиксированным значением функции как результата расчета по стандартной формуле

сферы и сплайновым аппроксимированным значением в каждом сеточном узле. Поскольку погрешность аппроксимации определялась в разностном варианте, полученные количественные характеристики применимы для любых измерительных единиц.

По результатам проведенного эксперимента точность расчета на центральной части сферического сегмента обеспечивается в числовом диапазоне 10^{-6} – 10^{-8} условных разностных единиц измерения, и только в четырех концевых позициях задания краевых условий наблюдается всплесковое повышение погрешности до 10^{-2} – 10^{-3} (см. рис. 5). Цифровые значения погрешности сплайн-аппроксимации синхронно рассчитывались в каждой сеточной точке с выводом на компьютерный дисплей максимальной погрешности по размаху.

Полученные результаты оценки точности графически демонстрируются графиком объемной погрешности аппроксимации в перспективном ракурсе (рис. 6). Весовой коэффициент задавался в данном эксперименте равным 0,5 как эмпирический параметр сглаживания, определенный автором данного исследования в интерактивном режиме.

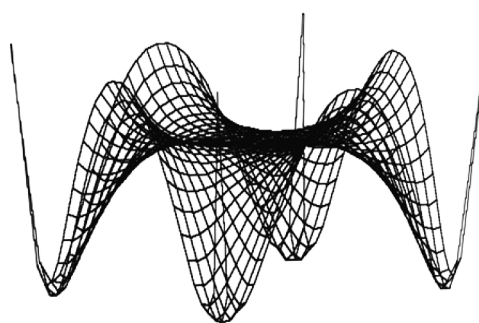


Рис. 6. Скриншот погрешности сплайновой аппроксимации сферического сегмента

На рис. 6 отчетливо различимы четыре характерных всплеска погрешности на концевых участках сферического сегмента, понижающие точность аппроксимации до 10^{-2} – 10^{-3} . Всплесков погрешности аппроксимации можно избежать при вводе специальных граничных условий, но это определенным образом усложнит алгоритм. По результатам проведенного тестового эксперимента точность расчета числового массива на основном поле вычислений обеспечивается в алгоритмических пределах 10^{-6} – 10^{-8} , и только в четырех концевых позициях задания краевых условий на фрагментированном домене аппроксимации наблюдается снижение точности до 10^{-2} – 10^{-3} , которыми в практических приложениях можно пренебречь.

Требование точности приближения *B*-сплайновой изолинии к контрольной изобате действует в качестве дополнительного регулятора как аналог полиномиальных энергий упругого сжатия для реализации задачи оптимизации синтеза алгебраической линии в физическом понимании. Следовательно, адаптивный алгоритм сплайн-аппроксимации гарантированно может быть использован для аппроксимации безопасной изобаты в реализации вопроса необходимой картографической точности. Надежное алгоритмическое обеспечение приемлемой точности аппроксимации, безусловно, создает эффект визуализированной четкости графического атрибута ЭКНИС при адаптации с учетом эстетики соответствующей семантики навигационной символики для однозначной удобочитаемости электронной карты. Альтернативная точность морской навигации является актуальной задачей обеспечения безопасности и эффективности мореплавания [31].

Практическое использование аппроксимированных данных о рельефе дна с высоким уровнем пространственного разрешения может позволить повысить надежность безопасности судовождения для крупнотоннажных судов в прибрежном плавании. Традиционно капитаны считают опасность реалистичной при ее обнаружении в полумиле от проложенного курса или если запас глубины под килем находится в пределах 10 м от осадки судна. В случае, когда суда проходят

в каналах и гаванях, возникают ситуации практической необходимости нахождения в нескольких метрах от навигационных опасностей с запасом воды под килем всего один метр [22].

Расстояние до навигационных опасностей используется в качестве основного количественного показателя стесненности акватории и может применяться как частная характеристика навигационной безопасности судоходных маршрутов [32]. При чтении морской карты вахтенный помощник должен обращать внимание на изменение уровня воды на мелководье, так как важный параметр, который судоводитель должен знать в любой момент времени — это реальный запас воды под килем. При этом необходимо учитывать, что минимальная глубина, показанная на морской карте, может существенно отличаться от фактической минимальной глубины акватории [33].

Сплайновый алгоритм с программной реализацией в вариативности паскаль-модуля для вычислительной формализации базисной аппроксимации навигационной изобаты апробирован с подробной математической формализацией на примере расчета траектории изолинейного плавания судна [14]. Процедура картографического обобщения стратегически ориентирована на характеристические точки изобаты, которые определяют аппроксимирующий ее B -сплайн. Модернизированная сплайновая изолиния оперативным образом перестраивается с использованием апостериорной информации без формального увеличения количества сеточных точек сплайна для обеспечения процесса обобщения. Типизация изолинии осуществляется путем удаления небольших изгибов при оптимальном сглаживании синтезированной кривой, как показано на скриншоте (рис. 7).

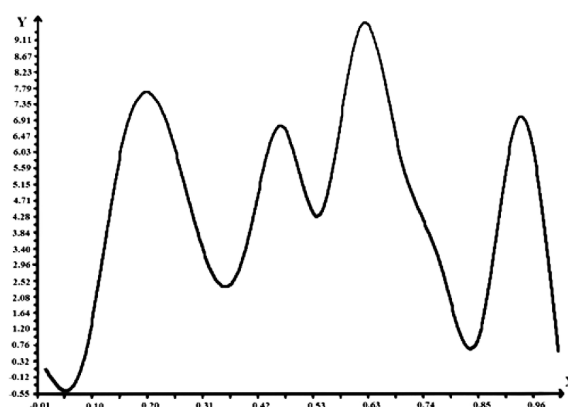


Рис. 7. Обобщенное синтезирование безопасной изобаты кубическим финитным сплайном

Целесообразность применения вариативного синтезирования контура глубины в режиме реального времени позволяет с предельной точностью конкретизировать метод решения задачи оперативного локального смещения безопасной изобаты в глубоководную область акватории методом плавного изгибания гладких кубических B -сплайнов для обеспечения процесса обобщения (см. рис. 7). Оперативное управление формой моделируемой изобаты осуществляется за счет плавности, гладкости и задания оптимального количества контрольных точек или вводом дополнительных сеточных узлов аппроксимации для повышения адаптивности и гибкости модели B -сплайнов за счет своей вычислительной эффективности при сегментировании контурных линий с высокой сложностью [34].

Применяемый практически фактор локальности означает тактическую возможность корректировки общей формы аппроксимированной изолинии без стратегической перестройки всей восстановленной алгебраической линии. Изменчивое генерирование формы аппроксимированной кривой выполняется путем синхронного координирования характеристических точек с финитными функциями B -сплайна с целью согласования геометрии изобаты. Обобщенный контур глубины алгоритмически отражает выпуклость безопасной изобаты в сторону глубоководной области

при визуализации на электронных картах реализации B -сплайновой «модели змеи» по аналогии с серпантинной конфигурацией линии активного контура глубины в виде кусочно-полиномиальной функции [35].

Стратегия локальной корректировки использует преимущества свойств оперативной поддержки базисных сплайнов при геометрических операциях выбора конкретного метода визуализации контурной линии глубины в соответствии со сложностью батиметрической среды. Кроме того, сплайновый алгоритм сокращает начальный путь аппроксимации с меньшим количеством доминирующих точек, что значительно ускоряет скорость вычислительных операций. Сплайновый алгоритм позволяет генерировать плавные и естественные визуализированные изолинии. Каждая синтезированная изолиния интерпретируется как B -сплайновая линия активного контура глубины. B -сплайны конструктивно обеспечивают удобный способ обработки внутренних свойств формы алгебраической кривой. Преимущество использования активных сплайновых изолиний заключается в том, что взаимодействие с пользователем в интерактивном режиме может быть реализовано путем локального изменения формы кривой посредством манипулирования некоторыми маркерными точками и весовыми коэффициентами сглаживания. По прототипу оперирования B -сплайнами применительно к безопасной изобате можно использовать алгоритм базисной аппроксимации к любому геометрическому атрибуту векторной электронной карты в максимальном варианте трехмерного представления морского дна [36].

ЭКНИС успешно эволюционирует от двумерного статического отображения батиметрических данных к идеальной интерфейсной системе поддержки принятия решений, способной предоставлять апробированную информацию 3D формата на основе геовизуализации с временными метками [37]. С целью обеспечения наглядности восприятия визуализированных навигационных изоповерхностей применяется оптимальная стратегия подгонки любой формы алгебраической кривой с помощью функций B -сплайна на основе метода деления пополам каждого композитного сеточного интервала для быстрого получения дополнительного узла по *схеме Марсдена* [38]. При оптимальной организации сеточных узлов использование B -сплайна позволяет получить удовлетворительную аппроксимацию реконструированной поверхности с кривизной высокого порядка [39].

При использовании дополненной виртуальности тенденции интерактивных геопространственных конфигураций неразрывно связаны с принципами цифрового картографического проектирования [40]. Дисплеи дополненной реальности предполагают наложение изображений компьютерной графики на визуализированное представление окружающей среды для одновременного непосредственного просмотра графических изображений. Технологии дополненной реальности позволяют видеть обозначенные или иным образом улучшенные береговые объекты, буи, надводные или подводные опасности в толще воды, ретранслируемые так, как если бы вода была прозрачной. Тем не менее современный дисплей ЭКНИС внешне похож на бумажную карту как двумерное отображение фиксированных цифровых данных. Практически неизбежным является то, что современные электронные карты технологически в значительной степени опираются на бумажные карты в качестве примера для составления. Для того чтобы бортовой ЭКНИС являлся оптимизированной системой поддержки принятия решений, способной предоставлять судоводителю перспективную навигационную информацию, необходимо разработать новые подходы к улучшению содержания, управления и отображения гидрографических данных.

Традиционные методы электронного картирования достаточно точны, но в то же время очень финансово затратны и требуют много времени для обширной географической области. Автоматизация производства картографических карт является важной областью исследований в аспекте функционирования электронных географических информационных систем (ЭГИС). В перспективе с развитием прогрессивных математических методов в технологии компьютерной визуализации картографических объектов необходимость обеспечения точных автоматизированных методов обработки гидрографических данных остается актуальной задачей. Контурные линии, полученные с помощью сплайновых алгоритмов из облака метаданных, могут быть ис-

пользованы эффективным образом для построения подробной цифровой модели подводной топологии [41]. Развитие ЭГИС в сочетании с достижениями в области телекоммуникационных систем, систем позиционирования, мобильных устройств и веб-сервисов с использованием открытых данных бесплатного программного обеспечения открывает новые перспективы визуализации генерализованных подводных рельефов [42]. С учетом возможностей компьютерного зрения в настоящее время практически реализуема координатная привязка интеллектуальной визуализации геоизображения как пространственно-временной мультигенерализованной модели объекта, представленного в графической образной форме, на основе технологии сопоставления изображений [43]. При этом для реализации процедуры кластеризации изображения предполагается в сложных случаях использовать сплайн-функции. Разработка исследовательских картографических интерфейсов, в которых пользователь может интерактивным образом менять параметры изображения рельефа путем различных манипуляций в интерфейсе, в том числе посредством тактильных жестов [43] или наложением звука на изобату [25], является одним из перспективных направлений развития генерализации.

В идеале судоводитель на электронной карте будущего должен иметь возможность бесплатно пользоваться подробными гидрографическими данными широкой доступности в любом открытом репозитории в совокупности с прогнозами уровня воды прибрежной зоны в реальном времени. Обладая этой информацией, вахтенный помощник сможет планировать и безопасно осуществлять переход, пользуясь точно определенным фактическим запасом воды под килем для нивелирования интуитивного понимания капитаном безопасного положения судна и развития навигационной ситуации.

Стратегия аппроксимации безопасной изобаты на основе методов сплайн-функций основывается на фактическом определении пространственных связей между синтезированными изобатами и формальными правилами картографического обобщения. Предлагаемый подход сплайн-аппроксимации безопасной изобаты в перспективе может быть использован как условие для полной автоматизации обработки батиметрической информации. Выбор метода *B*-сплайнов оптимален для полностью автоматизированных решений. Реализованный в паскаль-программе ключевой алгоритм искусственного синтеза контура глубины способствует эффективному решению задачи автоматизированного обобщения изобат на векторной электронной карте для прикладного обеспечения безопасного морского судоходства. По мнению д-ра техн. наук, проф. Б. А. Вульфовича в XXI в. достаточно точный алгоритм, реализованный в программе с дружественным интерфейсом, должен побудить судоводителей сформировать новые наблюдательные привычки в целях получения больших возможностей в вопросах обработки навигационной информации [44]. При правильном навигационном использовании актуальной безопасной изобаты вахтенному помощнику обеспечивается транзитный фарватер, в котором гарантируется безопасное движение судна.

Обсуждение (Discussion)

Для предотвращения морских аварий, причиной которых является человеческий фактор, представляется целесообразным дополнительно к аппаратуре навигационного автоматизированного комплекса использовать метод определения места судна по глубинам на основе нейронной сети, принимающей на вход последовательность глубин, измеренных при помощи эхолота, и прогнозирующей широту и долготу судна на момент измерения последней глубины [45].

Альтернативно для решения задач батиметрической навигации могут применяться *B*-сплайны, интерпретируемые как вариативность нейронных сетей в виде так называемой *B*-сплайновой нейронной сети [46]. Преимущество *B*-сплайнов в нейронных сетях получает прикладное применение. Благодаря финитному свойству *B*-сплайнов модернизированная нейронная сеть хранит информацию большой размерности в локальном варианте, что означает, что обучение в одной части входного пространства поддержки принятия решения оказывает минимальное влияние на остальную его часть, что синхронизируется с решением задач идентификации системы искусственного интеллекта.

Аппроксимация навигационных функций большой размерности является чрезвычайно сложной математической задачей. Проблема размерности оказывает негативное влияние на классические методы, и, следовательно, на практике они применимы исключительно для решения задач минимальной размерности [47]. Суть проблемы означает экспоненциальный рост экспериментальных данных по сравнению с размерностью пространства вероятностно-статистических решений. По мнению ведущего американского специалиста в области математики Ричарда Эрнеста Беллмана, проблема размерности действует на конечный результат оптимизационного метода в силу неоправданного усложнения целевой функции. Экстремум функционала, соответствующий искомого навигационному решению, в упрощенном варианте не позволяет найти абсолютно точное решение в масштабе реального времени. Таким образом, происходит автоматическое возвращение к необходимости первоначальной сложности алгоритма с организацией итерационного замкнутого круга нерешенной проблемы предсказательного моделирования навигационного процесса.

В то же время нейронные сети способны преодолеть проблему при решении различных задач большой размерности в контексте анализа изображений и распознавания образов. Комбинированная модель искусственного интеллекта в терминах *B*-сплайнов использует одномерные кусочные конструкции в качестве внутренних функций, которые впоследствии трансформируются в вариационные сплайны с тензорным произведением в качестве внешних функций. Внутренние функции действуют как средства оперирования объектами малой размерности, в то время как сочетание внешних функций рассматривается как иерархическая вариация нейронной сети большой размерности. Функциональность гибридной системы обеспечивается благодаря оптимальным вычислительным свойствам *B*-сплайнов. Оценки погрешности для линейной аппроксимации подмножества многомерных непрерывных функций, а также многомерных обобщенных функций с ограниченной полосой пропускания обуславливают положительную тенденцию успешной применимости сплайнового подхода как композиционного условия функционирования нейронной сети. В первом случае проблема нивелируется, в то время как во втором случае она полностью преодолевается.

При использовании классических алгоритмов калмановской фильтрации или метода Байеса в процессе решения навигационной задачи возникают потребности высокой вычислительной нагрузки [48]. В отличие от инвариантности фильтра Калмана и байесовского подхода [49], сплайновая аппроксимация является высокоскоростным средством решения различных навигационных задач, так как формат аппроксимированной функции определяет только объем памяти судового компьютера с предварительно рассчитанными сплайновыми коэффициентами для вычисления в масштабе реального времени значения навигационной функции. Байесовские алгоритмы дают оптимальное решение задач нелинейной фильтрации, однако необходимые для их практического воплощения вычислительные ресурсы остаются не всегда реализуемыми и при современном уровне развития компьютерной техники.

Сверхточную нейронную сеть можно рассматривать как вариативность аддитивной *B*-сплайновой модели. Сплайновая технология по своей математической архитектуре в принципе лишена проблемы размерности, что служит дополнительным основанием для применения кусочной аппроксимации при решении сложных навигационных задач.

Выводы (Summary)

Проведенное исследование применения позволяет сделать следующие выводы:

1. Определена значимость постулата безопасной изобаты для обеспечения гарантированного безаварийного транзита судна.
2. Согласно проведенному анализу оптимальности конфигурирования *B*-сплайнов на вариативном типе носителей предпочтение для решения поставленной задачи отдано кубическому случаю.
3. В качестве исследовательской разработки апробирован метод вычислительной процедуры аппроксимации безопасной изобаты на основе *B*-сплайнов. Диапазон применения данного подхода можно расширить до восстановления навигационной изолинии любой степени сложности,

включая возможность синтеза искаженной изолинии. Изолиния с многочисленными функциональными разрывами имеет сложную математическую формализацию и традиционным путем подобную задачу решить практически невозможно. Кроме того, разработанный алгоритм позволяют напрямую использовать в современном судовождении сетку искаженных поправками изолиний при широко используемом в современном судовождении дифференциальном режиме в различных его вариантах.

4. На основе алгоритмического обеспечения *B*-сплайновой аппроксимации навигационной функции составлена паскаль-программа для бортового компьютера, обеспечивающая высокую точность и устойчивость вычислительных операций в качестве прикладного обеспечения для усиления позиций полной автоматизированной обработки батиметрической информации. В перспективе дальнейшему исследованию подлежит применение перспективных возможностей искусственного интеллекта для обобщения гидрографической нагрузки электронной карты, что создает возможность обеспечить лучшую ситуационную осведомленность вахтенного помощника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костенич А. В. Цифровые модели рельефа морского дна коррекционных полигонов для подводной навигации по рельефу / А. В. Костенич, А. А. Веселов, В. Ю. Бахмутов // Навигация и гидрография. — 2022. — № 69. — С. 32–41. — EDN VTVOYE.
2. Guilbert E. Terrain generalisation / E. Guilbert, J. Gaffuri, B. Jenny // Abstracting geographic information in a data rich world: methodologies and applications of map generalisation. — Berlin, Heidelberg, New-York: Springer, 2014. — Pp. 227–258. DOI: 10.1007/978-3-319-00203-3_8.
3. Зубченко Э. С. Навигационная поверхность — новая форма цифровой модели для представления данных съемки рельефа дна в интересах повышения безопасности мореплавания / Э. С. Зубченко // Навигация и гидрография. — 2008. — № 27. — С. 77–93. — EDN NCQAWL.
4. Ююкин И. В. Сплайновая модель оперирования гридированными данными как принцип электронного картографирования топографии морского дна / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 656–675. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-656-675. — EDN PCOBT.
5. Calder B. R. Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data / B. R. Calder, L. A. Mayer // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. — 2003. — Vol. 4. — Is. 6. — Pp. 1048. DOI: 10.1029/2002GC000486.
6. Li Z. Geospatial Big Data Handling with High Performance Computing: Current Approaches and Future Directions / Z. Li // High Performance Computing for Geospatial Applications. — Springer, Cham, 2020. — Pp. 53–76. DOI: 10.1007/978-3-030-47998-5_4.
7. Кошель С. М. Моделирование рельефа по изолиниям / С. М. Кошель // Университетская школа географической картографии. К 100-летию профессора К. А. Салищева. (Ред. А. М. Берлянт). — М.: Аспект Пресс, 2005. — С. 198–208. — EDN TFLALY.
8. Koshel S. New approaches in cartographic relief representation with morphometric variables / S. Koshel, O. Mikhalyov // Proceedings of 26th International Cartographic Conference. — ICA, 2013. — Pp. 743–744. DOI: 10.13140/RG.2.1.3100.6566.
9. Самсонов Т. Е. Картографические методы визуализации и генерализации цифровых моделей рельефа / Т. Е. Самсонов // сборник Геоморфологи: Современные методы и технологии цифрового моделирования рельефа в науках о Земле, вып. № 6. — М.: Медиа-ПРЕСС, 2016. — С. 9–18. — EDN WZQPB.
10. Афонин А. Б. Особенности построения изобат в условиях недостаточной гидрографической изученности подводного рельефа / А. Б. Афонин, С. А. Лутков, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — Т. 7. — № 4. — С. 90–95. — EDN UDJUTN.
11. Nada T. Towards automating the nautical chart generalization workflow / T. Nada, C. Kastri-sios, B. Calder, C. Ence, C. Greene, A. Bethell // Geo-spatial Information Science. — 2024. — Pp. 1–26. DOI: 10.1080/10095020.2024.2366873.
12. Skopelti A. Nautical Charts Generalization: A Pragmatic Approach / A. Skopelti, L. Tsoulos, L. Stamou, S. Pe'eri // Abstracts of the International Cartographic Association. — 2021. — Vol. 3. — Pp. 267. DOI: 10.5194/ica-abs-3-267-2021.

13. *Burghardt D.* Controlled Line Smoothing by Snakes / D. Burghardt // *Geoinformatica*. — 2005. — Vol. 9. — Pp. 237–252. DOI: 10.1007/s10707-005-1283-3.
14. *Ююкин И. В.* Реализация плавности конфигурации сплайн-траектории для своевременного уклонения от запретных районов плавания / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 421–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-421-443. — EDN VCRDTK.
15. *Ююкин И. В.* Оптимизация моделирования навигационной изоповерхности методами базисных финитных сплайнов / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-266-274. — EDN BQRXTR.
16. *Saux E.* B-spline functions and wavelets for cartographic line generalization / E. Saux // *Cartography and geographic information science*. — 2003. — Vol. 30. — Is. 1. — Pp. 33–50. DOI: 10.1559/152304003100010938.
17. *Жухлин А. М.* Использование метода сплайн-функций для описания опасной изобаты / А. М. Жухлин, К. П. Мамаев // *Методы и технические средства морской навигации: сб. науч. тр.* — М.: ВО «Мортеин-формреклама», 1993. — С. 38–41.
18. *Zhang Y.* An Obstacle Avoidance Path Planning and Evaluation Method for Intelligent Vehicles Based on the B-Spline Algorithm / Y. Zhang, P. Wang, K. Cui, H. Zhou, J. Yang, X. Kong // *Sensors*. — 2023. — Vol. 23. — Is. 19. — Pp. 8151. DOI: 10.3390/s23198151.
19. *Kastrisios C.* Nautical chart data uncertainty visualization as the means for integrating bathymetric, meteorological, and oceanographic information in support of coastal navigation / C. Kastrisios, C. Ware, B. Calder, T. Butkiewicz, L. Alexander, O. Hauser // 100th American Meteorological Society Meeting, 18th Symposium on Coastal Environment. — AMS, 2020. — Pp. 11–17. DOI: 10.6084/m9.figshare.12196764.
20. *Ююкин И. В.* Проблема реализации концепции максимального интегрирования разнородных данных в практической навигации / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 998–1014. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-998-1014. — EDN JRCDLU.
21. *Dyer N.* Label-based generalization of bathymetry data for hydrographic sounding selection / N. Dyer, C. Kastrisios, L. De Floriani // *Cartography and Geographic Information Science*. — 2022. — Vol. 49. — Is. 4. — Pp. 338–353. DOI: 10.1080/15230406.2021.2014974.
22. *Glang G. F.* NOAA Harnesses Digital Technology to Improve Navigational Intelligence / G. F. Glang, S. Smith, D. Forsythe // *Marine Technology Society Journal*. — 2015. — Vol. 49. — № 2. — Pp. 159–166. DOI: 10.4031/MTSJ.49.2.4.
23. *Guilbert E.* Cartographic generalization of lines based on B-spline snake model / E. Guilbert, E. Saux // *International Journal of Geographical Information Science*. — 2008. — Vol. 22. — Is. 8. — Pp. 847–870. DOI: 10.1080/13658810701689846.
24. *Yan J.* An ontology-driven multi-agent system for nautical chart generalization / J. Yan, E. Guilbert, E. Saux // *Cartography and Geographic Information Science*. — 2017. — Vol. 44. — Is. 3. — Pp. 201–215. DOI: 10.1080/15230406.2015.1129648.
25. *Guilbert E.* Isobathymetric Line Simplification with Conflict Removal Based on a B-spline Snake Model / E. Guilbert, H. Lin // *Marine Geodesy*. — 2007. — Vol. 30. — Is. 1–2. — Pp. 169–195. DOI: 10.1080/01490410701296697.
26. *Guilbert E.* B-spline Curve Smoothing for Isobathymetric Line Generalization / E. Guilbert, H. Lin // *Geographic Information Sciences*. — 2005. — Vol. 11. — Is. 2. — Pp. 78–86. DOI: 10.1080/10824000509480603.
27. *Kastrisios C.* Efforts to Streamline Bathymetry Compilation for Marine Navigation / C. Kastrisios // *Abstracts of the International Cartographic Association*. — 2023. — Vol. 6. — Pp. 119. DOI: 10.5194/ica-abs-6-119-2023.
28. *Kastrisios C.* Increasing Efficiency of Nautical Chart Production and Accessibility to Marine Environment Data through an Open-Science Compilation Workflow / C. Kastrisios, N. Dyer, T. Nada, S. Contarinis, J. Cordero // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. — 2023. — Vol. 12. — Is. 3. — Pp. 116. DOI: 10.3390/ijgi12030116.
29. *Samsonov T.* Granularity of Digital Elevation Model and Optimal Level of Detail in Small-Scale Cartographic Relief Presentation / T. Samsonov // *Remote Sensing*. — 2022. — Vol. 14. — Is. 5. — Pp. 1270. DOI: 10.3390/rs14051270.
30. *Guilbert E.* B-Spline Curve Smoothing under Position Constraints for Line Generalization / E. Guilbert, H. Lin // *Proceedings of the 14th annual ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems (GIS'06)*. — Arlington: ACM, 2006. — Pp. 3–10. DOI: 10.1145/1183471.1183474.

31. *Логиновский В. А.* Оценка точности определения координат места судна по измерениям в реальном масштабе времени / В. А. Логиновский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 335–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-335-346. — EDN DDNVHE.

32. *Андреева Е. В.* Формализация показателя стесненности акватории Северного морского пути / Е. В. Андреева, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-55-62. — EDN WZHJEX.

33. *Афонин А. Б.* Исследование влияния подробности гидрографической съемки на оценку проходных глубин / А. Б. Афонин, И. Ю. Королёв, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9 — № 5. — С. 1007–1016. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1007-1016. — EDN ZSRYCN.

34. *Delgado-Gonzalo R.* Efficient Shape Priors for Spline-Based Snakes / R. Delgado-Gonzalo, D. Schmitter, V. Uhlmann, M. Unser // IEEE Transactions on Image Processing. — 2015. — Vol. 24. — Is. 11. — Pp. 3915–3926. DOI: 10.1109/TIP.2015.2457335.

35. *Miao D.* Gradual generalization of nautical chart contours with a cubic B-spline snake model / D. Miao, B. Calder // 2013 OCEANS — San Diego. — IEEE, 2013. DOI: 10.23919/OCEANS.2013.6741201.

36. *Ююкин И. В.* Применение метода сплайн-функций при компьютерной визуализации подводного рельефа / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 64–79. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-64-79. — EDN PQTBSM.

37. *Krassanakis V.* Geovisualization: Current Trends, Challenges, and Applications / V. Krassanakis, A. Skopelti, M. Keskin, and P. Cybulski // Geographies. — 2023. — Vol. 3. — Is. 4. — Pp. 801–805. DOI: 10.3390/geographies3040043.

38. *Ююкин И. В.* Перспективная магнитная навигация с использованием метода сплайн-функций для оптимального формирования эталона картографирования / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 519–534. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-519-534. — EDN KGJJVG.

39. *Campbell B. K.* An arbitrarily high-order three-dimensional Cartesian-grid method for reconstructing interfaces from volume fraction fields / B. K. Campbell // Journal of Computational Physics. — 2021. — Vol. 426. — Pp. 109727. DOI: 10.1016/j.jcp.2020.109727.

40. *Gralak R. A.* A Method of Navigational Information Display Using Augmented Virtuality / R. A. Gralak // Journal of Marine Science and Engineering. — 2020. — Vol. 8. — Is. 4. — Pp. 237. DOI: 10.3390/jmse8040237.

41. *Bayer T.* Simplification of contour lines, based on axial splines, with high-quality results / T. Bayer, I. Kolingerova, M. Celonk, J. Lysak, // International Journal of Geographical Information Science. — 2023. — Vol. 37. — Is. 7. — Pp. 1520–1554. DOI: 10.1080/13658816.2023.2193969.

42. *Contarinis S.* Web-based nautical charts automated compilation from open hydrospatial data / S. Contarinis, B. Nakos, L. Tsoulos, A. Palikaris // The Journal of Navigation. — 2022. — Vol. 75. — Is. 4. — Pp. 763–783. DOI: 10.1017/S0373463322000327.

43. *Мухаметшин А. Р.* Координатная привязка геоизображений с использованием компьютерного зрения / А. Р. Мухаметшин, Т. Е. Самсонов, И. К. Лурье // Геодезия и картография. — 2024. — № 5. — С. 24–36. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1007-5-24-36. — EDN QHNJBO.

44. *Vulfovich B.* New Ideas for Celestial Navigation in the Third Millennium / B. Vulfovich, V. Fogilev // The Journal of Navigation. — 2010. — Vol. 63. — Is. 2. — Pp. 373–378. DOI: 10.1017/S0373463309990348.

45. *Дерябин В. В.* Определение местоположения судна по глубинам при помощи нейронной сети / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-7-16. — EDN LJVSHI.

46. *Fakhoury D.* ExSpliNet: An interpretable and expressive spline-based neural network / D. Fakhoury, E. Fakhoury, H. Speleers // Neural Networks. — 2022. — Vol. 152. — Pp. 332–346. DOI: 10.1016/j.neunet.2022.04.029.

47. *Ююкин И. В.* Сплайновое синтезирование картографированного эталона информативности поля в задаче корреляционно-экстремальной навигации / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 25–39. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-25-39. — EDN FNMZII.

48. Stepanov O. A. Recursive and Nonrecursive Algorithms Applied to Navigation Data Processing: Differences and Interrelation with Factor Graph Optimization Algorithms / O. A. Stepanov, A. V. Motorin, V. P. Zolotarevich, A. M. Isaev, Yu. A. Litvinenko // 2024 31st Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). — IEEE, 2024. — Pp. 424–431. DOI: 10.1016/j.rtbm.2014.11.004.

49. Васильев В. А. Анализ эффективности решения задачи навигации с использованием карты и измерителя геофизического поля в зависимости от изменчивости погрешностей корректируемой навигационной системы / В. А. Васильев, О. А. Степанов // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. — 2022. — № 4. — С. 7–11. DOI: 10.24412/2541-9269-2022-4-07-11. — EDN REBGUF.

REFERENCES

1. Kostenich A V., A. A. Veselov and V. Yu. Bakhmutov “Tsifrovye modeli rel’efa morskogo dna korrektsionnykh poligonov dlya podvodnoy navigatsii po rel’efu.” *Navigatsiya i gidrografiya* 69. 2022: 32–41.

2. Guilbert, Eric, Julien Gaffuri and Bernhard Jenny. “Terrain generalisation.” *Abstracting geographic information in a data rich world: methodologies and applications of map generalisation*. Berlin, Heidelberg, New-York: Springer, 2014: 227–258. DOI: 10.1007/978-3-319-00203-3_8.

3. Zubchenko, E. S. “Navigational surface — a new form of digital model for presenting the bottom relief survey data to increase the safety of navigation.” *Navigatsiya i gidrografiya* 27 (2008): 77–93.

4. Yuyukin, Igor V. “Spline model of gridded data operation as principle of electronic mapping seabed topographies.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 656–675. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-656-675.

5. Calder, Brian R. and Larry A. Mayer. “Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data.” *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 4.6 (2003): 1048. DOI: 10.1029/2002GC000486.

6. Li, Zhenlong. “Geospatial Big Data Handling with High Performance Computing: Current Approaches and Future Directions.” *High Performance Computing for Geospatial Applications*. Springer, Cham, 2020. 53–76. DOI: 10.1007/978-3-030-47998-5_4.

7. Koshel’, S. M. . “Modelirovanie rel’efa po izoliniyam.” *Universitetskaya shkola geograficheskoy kartografii : k 100-letiyu prof. K. A. Salischeva*. Moskva : Aspekt press, 2005: 198–208.

8. Koshel, Sergey, and Oleg Mikhalyov. “New approaches in cartographic relief representation with morphometric variables.” *Proceedings of 26th International Cartographic Conference*. ICA, 2013. DOI: 10.13140/RG.2.1.3100.6566.

9. Samsonov, T. E. . “Kartograficheskie metody vizualizatsii i generalizatsii tsifrovyykh modeley rel’efa.” *Geomorfologiya : Sovremennye metody i tekhnologii tsifrovogo modelirovaniya rel’efa v nauках o Zemle. Tom Vypusk 6*. Moskva : Media-PRESS, 2016: 9–18.

10. Afonin, Andrey B., Sergey A. Lutkov and Aleksandr L. Tezikov. “Features creation of depth contours in the conditions of insufficient hydrographic study of the seabed.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 7.4 (2015): 90–95.

11. Nada, Tamer, Christos Kastrisios, Brian Calder, Christie Ence, Craig Greene and Amber Bethell. “Towards automating the nautical chart generalization workflow.” *Geo-spatial Information Science* (2024): 1–26. DOI: 10.1080/10095020.2024.2366873.

12. Skopelti, Andriani, Lysandros Tsoulos, Leda Stamou and Shachak Pe’eri. “Nautical Charts Generalization: A Pragmatic Approach.” *Abstracts of the International Cartographic Association* 3 (2021): 267. DOI: 10.5194/ica-abs3-267-2021.

13. Burghardt, Dirk. “Controlled Line Smoothing by Snakes.” *Geoinformatica* 9 (2005): 237–252. DOI: 10.1007/s10707-005-1283-3.

14. Yuyukin, Igor V. “Realization of the smoothness of spline trajectory configuration for avoidance of no-go areas in due time.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 421–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-421-443.

15. Yuyukin, Igor V. “Optimization of navigational isosurface simulation by the methods of basic finite splines.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-266-274.

16. Saux, Eric. “B-spline functions and wavelets for cartographic line generalization.” *Cartography and geographic information science* 30.1 (2003): 33–50. DOI: 10.1559/152304003100010938.

17. Zhukhlin, A. M. and K. P. Mamaev. Ispol'zovanie metoda splayn-funkciy dlya opisaniya opasnoy izobaty. M.: Mortchinformreklama, 1993.
18. Zhang, Yulong, Pengwei Wang, Kaichen Cui, Hengheng Zhou, Jinshan Yang and Xiangcun Kong. "An Obstacle Avoidance Path Planning and Evaluation Method for Intelligent Vehicles Based on the B-Spline Algorithm." *Sensors* 23.19 (2023): 8151. DOI: 10.3390/s23198151.
19. Kastrisios, Christos, Colin Ware, Brian Calder, Thomas Butkiewicz, Lee, Alexander and Olivia Hauser. "Nautical chart data uncertainty visualization as the means for integrating bathymetric, meteorological, and oceanographic information in support of coastal navigation." *100th American Meteorological Society Meeting, 18th Symposium on Coastal Environment*. AMS, 2020. DOI: 10.6084/m9.figshare.12196764.
20. Yuyukin, Igor V. "The problem of implementing the concept of maximum integration of heterogeneous data in practical navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 998–1014. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-998-1014.
21. Dyer, Noel, Christos Kastrisios and Leila De Floriani. "Label-based generalization of bathymetry data for hydrographic sounding selection." *Cartography and Geographic Information Science* 49.4 (2022): 338–353. DOI: 10.1080/15230406.2021.2014974.
22. Glang, Gerd F., Shepard Smith and Dawn Forsythe. "NOAA Harnesses Digital Technology to Improve Navigational Intelligence." *Marine Technology Society Journal* 49.2 (2015): 159–166. DOI: 10.4031/MTSJ.49.2.4.
23. Guilbert, Eric and Eric Saux. "Cartographic generalization of lines based on B-spline snake model." *International Journal of Geographical Information Science* 22.8 (2008): 847–870. DOI: 10.1080/13658810701689846.
24. Yan, Jingya, Eric Guilbert and Eric Saux. "An ontology-driven multi-agent system for nautical chart generalization." *Cartography and Geographic Information Science* 4 4.3 (2017): 201–215. DOI: 10.1080/15230406.2015.1129648.
25. Guilbert, Eric, and Hui Lin. "Isobathymetric Line Simplification with Conflict Removal Based on a B-spline Snake Model." *Marine Geodesy* 30.1–2 (2007): 169–195. DOI: 10.1080/01490410701296697.
26. Guilbert, Eric and Hui Lin. "B-spline curve smoothing for isobathymetric line generalization." *Geographic Information Sciences* 11.2 (2005): 78–86. DOI: 10.1080/10824000509480603.
27. Kastrisios, Christos. "Efforts to Streamline Bathymetry Compilation for Marine Navigation." *Abstracts of the International Cartographic Association* 6 (2023): 119. DOI: 10.5194/ica-abs6-119-2023.
28. Kastrisios, Christos, Noel Dyer, Tamer Nada, Stilianos Contarinis, and Jose Cordero. "Increasing Efficiency of Nautical Chart Production and Accessibility to Marine Environment Data through an Open-Science Compilation Workflow." *ISPRS International Journal of Geo-Information* 12.3 (2023): 116. DOI: 10.3390/ijgi12030116.
29. Samsonov, Timofey "Granularity of Digital Elevation Model and Optimal Level of Detail in Small-Scale Cartographic Relief Presentation." *Remote Sensing* 14.5 (2022): 1270. DOI: 10.3390/rs14051270.
30. Guilbert, Eric, and Hui Lin. "B-Spline Curve Smoothing under Position Constraints for Line Generalization." *Proceedings of the 14th annual ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems (GIS'06)*. ACM, 2006: 3–10. DOI: 10.1145/1183471.1183474.
31. Loginovsky, Vladimir A. "Assessing the accuracy of ship position through real-time measurements." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 335–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-335-346.
32. Andreeva, Ekaterina V. and Aleksandr L. Tezikov. "Formalization of the constraint indicator of the Northern Sea Route water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-55-62.
33. Afonin, Andrej B., Ivan Yu. Korolev and Aleksandr L. Tezikov. "Research of influence of the detail of hydrographic surveys on assessment of depths through passage." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1007–1016. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1007-1016.
34. Delgado-Gonzalo, Ricard, Daniel Schmitter, Virginie Uhlmann, and Michael Unser "Efficient Shape Priors for Spline-Based Snakes." *IEEE Transactions on Image Processing* 24.11 (2015): 3915–3926. DOI: 10.1109/TIP.2015.2457335.
35. Miao, Dandan, and Brian Calder. "Gradual generalization of nautical chart contours with a cubic B-spline snake model." *OCEANS-San Diego*. IEEE, 2013. DOI: 10.23919/OCEANS.2013.6741201.
36. Yuyukin, Igor V. "Application of the spline-functions method in computer visualization of underwater relief." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.1 (2021): 64–79. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-64-79.

37. Krassanakis, Vassilios, Andriani Skopelti, Merve Keskin, and Paweł Cybulski “Geovisualization: Current Trends, Challenges, and Applications.” *Geographies* 3.4 (2023): 801–805. DOI: 10.3390/geographies3040043.
38. Yuyukin, Igor V. “Perspective magnetic navigation with using the method of spline functions for optimal formation of the map-aided standard.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.4 (2022): 519–534. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-519-534.
39. Campbell, Bryce K. “An arbitrarily high-order three-dimensional Cartesian-grid method for reconstructing interfaces from volume fraction fields.” *Journal of Computational Physics* 426 (2021): 109727. DOI: 10.1016/j.jcp.2020.109727.
40. Gralak, Rafal A. “A Method of Navigational Information Display Using Augmented Virtuality.” *Journal of Marine Science and Engineering* 8.4 (2020): 237. DOI: 10.3390/jmse8040237.
41. Bayer, Tomas, Ivana Kolingerova, Marek Celonk and Jakub Lysak “Simplification of contour lines, based on axial splines, with high-quality results.” *International Journal of Geographical Information Science* 37.7 (2023): 1520–1554. DOI: 10.1080/13658816.2023.2193969.
42. Contarinis, Stilianos, Byron Nakos, Lysandros Tsoulos and Athanasios Palikaris. “Web-based nautical charts automated compilation from open hydrospatial data.” *The Journal of Navigation* 75.4 (2022): 763–863. DOI: 10.1017/S0373463322000327.
43. Mukhametshin, A. R., T. E. Samsonov and I. K. Lurie. “Coordinate georeferencing of geoimages using computer vision.” *Geodesy and Cartography* 85.5 (2024): 24–36. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1007-5-24-36.
44. Vulfovich, Boris, and Vasily Fogilev “New Ideas for Celestial Navigation in the Third Millennium” *The Journal of Navigation* 63.2 (2010): 373–378. DOI: 10.1017/S0373463309990348.
45. Deryabin, Victor V. “Depth-based vessel position fixing by means of a neural network.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-7-16.
46. Fakhoury, Daniele, Emanuele Fakhoury, and Hendrik Speleers. “ExSpliNet: An interpretable and expressive spline-based neural network.” *Neural Networks* 152 (2022): 332–346. DOI: 10.1016/j.neunet.2022.04.029.
47. Yuyukin, Igor V. “Spline synthesis of the charted reference of the field informativity in mission correlation-extreme navigation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 25–39. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-25-39.
48. Stepanov, O.A., A. V. Motorin, V. P. Zolotarevich, A. M. Isaev and Yu. A. Litvinenko. “Recursive and Nonrecursive Algorithms Applied to Navigation Data Processing: Differences and Interrelation with Factor Graph Optimization Algorithms.” *2024 31st Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*. — IEEE, 2024. DOI: 10.1016/j.rtbm.2014.11.004.
49. Vasilev, V. A. and O. A. Stepanov. “The efficiency of a map-aided navigation under variability of the corrected navigation system errors.” *Matematicheskoe modelirovanie, komputernyi i prirodnyy eksperiment v estestvennykh naukakh* 4 (2022): 7–11. DOI: 10.24412/2541-9269-2022-4-07-11.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ююкин Игорь Викторович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: uukiniv@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yuyukin, Igor V. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: uukiniv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 11 октября 2024 г.
Received: Oct. 11, 2024.