

APPLICATION OF THE SPLINE-FUNCTIONS METHOD IN UNDERWATER RELIEF COMPUTER VISUALIZATION

I. V. Yuyukin

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

It is proposed to consider any movement of a vessel as passage in a three-dimensional navigation space and to identify bathymetric navigation with three-coordinate positioning of the vessel with a visual triaxial representation of the route with a constant indication of the depths field under the ship's keel. The third coordinate is taken into account in the form of a depth mark, which is ignored when sailing on the high seas, but is mandatory in the coastal navigation for the accident-free transit of the vessel in the restricted navigation conditions. A scientific hypothesis about the prospects of mathematical operation of the bathymetric database from the standpoint of the theory of functions approximation is put forward. It is assumed that mathematical modeling of the seabed relief genesis can be effectively implemented on the basis of an adapted hybrid B-spline model with simultaneous display of underwater topography in the electronic mapping system. The expediency of using spline structures in the mathematical support of the on-board computer for creating a realistic synthesized image of the digital model of the bottom is substantiated. A virtual reconstruction of underwater topography is being tested on the basis of our own software developments with the actual refusal to appeal to the foreign applied projects. A three-dimensional computer visualization of a bathymetric chart fragment of the Chatham Strait is performed using the spline approximation method in order to demonstrate the principle operability of the proposed algorithm. It is concluded that when navigating with synchronous representation of bathymetry data, visual safe navigation is provided in conditions of a minimum under keel clearance based on the computer visual effect of the constant positioning of depth. A comparative assessment of methods for creating bathymetric charts is given, and the advantages and disadvantages of each mathematical approach are considered. The aspects of applying the mathematical apparatus of spline functions in the research of the problem of studying natural disasters of the Earth are expanded. The issue of applicability of digital bathymetry for numerical modeling of operational forecast of tsunami propagation is considered. It is assumed that the use of spline functions method in bathymetry will optimally update the planning horizon for creating a new generation of three-dimensional electronic navigational charts.

Keywords: bathymetric navigation, three-dimensional representation of routing, hybrid B-spline model, the underwater topography, digital model of the bottom, spline approximation, the forecast distribution of the tsunami.

For citation:

Yuyukin, Igor V. "Application of the spline-functions method in underwater relief computer visualization." *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.

УДК 656.61.052 656

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СПЛАЙН-ФУНКЦИЙ ПРИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПОДВОДНОГО РЕЛЬЕФА

И. В. Ююкин

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

Предлагается рассматривать любое перемещение судна как движение в трехмерном навигационном пространстве и отождествлять батиметрическую навигацию с трехкоординатным позиционированием судна при визуальном трехмерном представлении маршрутизации с постоянной индикацией поля глубин под килем судна. Принимается во внимание третья координата в виде отметки глубины, игнорируемая при плавании в открытом море, но обязательная в прибрежном плавании для безаварийного транзита судна в стесненных навигационных условиях. Выдвигается научная гипотеза о перспективности матема-

тического оперирования батиметрической базой данных с позиций теории приближения функций. Предполагается, что математическое моделирование генезиса рельефа морского дна эффективным образом может быть осуществлено на основе адаптированной гибридной В-сплайновой модели при синхронном отображении подводной топографии в электронной картографической системе. Обоснована целесообразность применения в математическом обеспечении бортового компьютера сплайновых конструкций для создания реалистичности синтезируемого изображения цифровой модели дна. Апробируется виртуальное реконструирование подводной топографии на базе собственных программных разработок при фактическом отказе от апелляции к зарубежным прикладным проектам. Выполнена трехмерная компьютерная визуализация фрагмента батиметрической карты пролива Чатем методом сплайн-аппроксимации с целью демонстрации принципиальной работоспособности предлагаемого алгоритма. Сделан вывод о том, что при навигации с синхронным представлением данных батиметрии обеспечивается наглядное безопасное судовождение в условиях минимального запаса под килем на основе компьютерного визуального эффекта постоянного позиционирования глубины. Приводится сравнительная оценка методов создания батиметрических карт, рассматриваются преимущества и недостатки каждого математического подхода. Расширяются аспекты применения математического аппарата сплайн-функций в рамках исследования проблемы изучения природных катастроф Земли. Рассматривается вопрос применимости цифровой батиметрии для численного моделирования оперативного прогноза распространения цунами. Сделано предположение о том, что применение методов сплайн-функций в батиметрии позволит оптимальным образом актуализировать горизонт планирования по созданию нового поколения трехмерных электронных навигационных карт.

Ключевые слова: батиметрическая навигация, трёхмерное представление маршрутизации, гибридная В-сплайновой модель, подводная топография, цифровая модель дна, сплайн-аппроксимация, прогноз распространения цунами.

Для цитирования:

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.

Введение (Introduction)

Морской переход в любом районе плавания фактически является трехкоординатным позиционированием судна, следовательно, его перемещение должно концептуально соотноситься с движением в трехмерном навигационном пространстве. Визуально это демонстрирует режим батиметрической навигации, организующий представление маршрутных данных в 3D формате при постоянной индикации поля глубин под килем судна. Классические координаты в виде географической широты и долготы традиционно ассоциируются у судоводителей с плоскостной навигацией по аналогии с двумерным представлением информации на бумажной карте.

Абстрагированный в практике судовождения учет глубины в рамках концепции навигационного пространства может быть реализован на основе данных эхолотации. При этом каждая мгновенная позиция судна в навигационном пространстве фиксируется тремя координатами, а не двумя, как это традиционно используется в классической навигации. Однако третью координату в виде отметки глубины, игнорируемую при плавании в открытом море, приходится на практике принимать во внимание в прибрежном плавании с учетом влияния приливо-отливных явлений, определяющих безаварийный транзит судна в стесненных навигационных условиях на запланированное время прохождения по маршруту.

На практике судоводитель учитывает вертикальность позиции судна в традиционном варианте использования таблиц приливов или их электронных аналогов для расчета безопасного запаса глубины под килем, что, фактически, является опосредствованным учетом фактической глубины. Такое понимание концепции навигационного пространства в современной практике судовождения может интерпретироваться как универсальное. В навигации по умолчанию предполагается гарантия недопустимости пропуска опасных глубин на морских навигационных картах, но при использовании дискретных батиметрических измерений некоторые опасные глубины могут быть не обнаружены и на картах фактически не обозначены [1], [2]. Обязательность нанесения

на карту отдельных навигационных опасностей незначительных размеров будет реализовываться только при условии, что в акватории выполнено гидрографическое траление жестким тралом или площадное обследование с использованием многолучевого эхолота. Таким образом, апробированные технологии могут спровоцировать негативный инцидент, который судоводители обязаны своевременно предвидеть и исключить при надлежащем несении ходовой вахты. Техническую поддержку в правильном принятии решения вахтенному помощнику может оказать виртуальная демонстрация трехмерного батиметрического генезиса. Высокоскоростной поиск ошибок в базе батиметрических данных, репродуцирующих локально-пиковую геометрию подводного рельефа, может быть эффективным образом выполнен на основе авторского метода визуализации сплайновой изоповерхности [3]. В качестве дополнительной помощи для судоводителя разработана концепция модифицированной сплайновой навигации на основе алгоритма роботизированной маршрутизации с гарантированной безопасностью обхода препятствий [4].

Зарубежные компании в целях презентации перспективных возможностей электронной картографии рекламируют программное обеспечение батиметрической навигации при условном соблюдении стандартов безопасности судоходства, так как плавание с визуализацией подводного ландшафта считается дополнительной функцией, не являясь основным режимом навигационного использования. Альтернативным вариантом выступает социальный проект виртуального глобуса Google Earth для реализации концепции доступной публичности при видимой имитации объемной маршрутизации [5]. Поскольку регламентирующие требования к 3D-формату не сформированы в навигационно-информационных системах, потенциальные ошибки в стилизованном представлении подводного рельефа могут являться опасными факторами для безаварийной навигации.

Для рекламных программных продуктов используются упрощенные алгоритмы на базе простейших линейных зависимостей в ходе промежуточных расчетов батиметрии с целью визуализации цифровой модели подводной топографии [6]. При современном использовании инновационных компьютерных технологий появляется реальная возможность отказаться от подхода линеаризации и применять в математическом обеспечении кубические сплайновые конструкции для создания реалистичности изометрической модели при обоснованной вычислительной устойчивости перспективных сплайновых алгоритмов [7]. Математические линейные процедуры не оставляют судоводителю выбора в правильной глазомерной оценке электронного подводного профиля ввиду допустимости искажений визуализации рельефа дна при проявлении такого негативного феномена компьютерной графики, как «лестничный эффект».

Батиметрические карты могут быть получены в реализации двух сопоставимых по значимости альтернативных алгоритмов: линейного интерполирования и методов сплайн-функций [8], [9]. При сравнительной характеристике линейного интерполирования с методами аппарата сплайн-функций предпочтение следует отдать кусочной аппроксимации. Методы, основанные на сплайнах, занимают ведущее место как среди перспективных алгоритмов непосредственно вычислительной математики [10], так и в процессе решения задач автоматизированной обработки навигационной информации [11]. Преимущество сплайнов над линейным интерполированием в ходе реализации рассматриваемой проблемы детализации цифровых массивов батиметрических карт можно объяснить следующими причинами.

Во-первых, обязательным условием сплайн-интерполяции является необходимость использования информации дискретных результатов измерений. Проведение подобных измерений практически выполнимо при использовании современной аппаратуры эхолотации либо необходимые данные имеются на бумажных батиметрических картах.

Во-вторых, алгоритмы, построенные с помощью сплайнов, эффективно реализуются в программном обеспечении бортового компьютера. Оперирование с кусочными многозвенниками является эффективным с точки зрения проведения вычислений. Расчет сплайн-функций сопряжен только с такими математическими операциями, как умножение и сложение, что обуславливает высокую результирующую точность. Кроме того, сплайн представляет собой «гладкую» функцию в смысле успешной дифференцируемости. Положительным аспектом применения сплайнов

являются хорошая сходимость и вычислительная устойчивость расчетных кусочно-аппроксимационных процедур [12].

Техника получения сравнительных оценок в случае сплайн-функций, в силу глобальности их математической конструкции, значительно сложнее, чем линейных интерполянтов. Сплайны представляют собой универсальное математическое средство восстановления электронных изобат по дискретным измерениям глубины ввиду независимости от конкретного вида навигационной функции [13]. Формат функции определяет только объем памяти судового компьютера с предварительно рассчитанными сплайновыми коэффициентами и сеточными координатами для вычисления в масштабе реального времени значения глубины по номеру сеточного интервала. Поэтому сплайновые аппроксимации являются высокоскоростным средством решения задач батиметрической навигации. В случае точных промеров решается задача *интерполяции*, т. е. построения такой изобаты, которая в соответствующих точках строго принимает измеренные значения глубины. Если погрешности измерений значительные, то решается задача *аппроксимации* — отыскание изобаты, имеющей плавный характер и проходящей в некоторой окрестности от измеренных данных глубины [13].

Линейное интерполирование стратегически уступает методам сплайн-функций в вопросе точности из-за конструктивного существования в «коридоре» математических ограничений и геометрической возможности оптимальной организации задачи аппроксимации как таковой. График многочлена первой степени в окрестности каждого двух промеров глубины по своему геометрическому характеру является обычной прямой линией со всеми нежелательными последствиями этого факта, касающимися точности интерполирования из-за невозможности оптимальной применимости процедуры «сглаживания», что может быть важным, когда в измерениях глубины присутствует погрешность. Для линейного интерполянта, по условию задачи объективно находящегося в «коридоре» точности математических ограничений, общий график представляет собой ломанную линию, негативно провоцирующую «лестничный эффект» при компьютерной визуализации [14]. Ломанная линия тактически не обеспечивает «гладкого» перехода от одного звена к другому и может даже быть разрывной, если характерные точки не включаются в число узлов интерполяции. Исходя из геометрических данных, линейный функционал представляет в физическом аналоге нить, которую условно тянут в разные стороны, при этом сама она проходит между алгоритмическими ограничениями по точности и неизбежно вырождается в тривиальную прямую линию.

В ситуации наличия хаотичности данных, отражающей современную реальность промеров глубин морского дна, только аппроксимационный сплайн выполняет лидирующую роль в реализации задачи составления батиметрической карты. В отношении непосредственно постановки задачи автоматически организуется единственная возможность применения в оптимальном варианте многозвенника, когда каждые две точки промера глубин не лежат на одной прямой. В физической интерпретации механическим аналогом сплайна выступает рейка, шарнирно закрепленная в промерных батиметрических точках и математически сплайн описывает положение ее упруго-статического равновесия.

Применимость линейного интерполирования обусловлена упрощенной постановкой задачи и наличием регулярных монотонных измерительных данных. При выборе метода создания батиметрических карт не следует во всех случаях однозначно отдавать предпочтение сплайн-функциям. В некоторых батиметрических задачах достаточно использовать линейную функцию, так как эта конструкция является математически простой, формализуется в явном виде и не требует, в отличие от сплайна, задания краевых условий. Это допустимо в ситуации, когда не планируется восстанавливать изобату с заданным свойством «гладкости». В общем случае батиметрические цифровые файлы исходных данных составляются с таким шагом, чтобы промежуточные значения глубины с требуемой точностью можно было вычислить и с помощью линейной интерполяции. Для «гладкого» восстановления изобаты сложной конфигурации необходимо увеличивать степень составляющих многочленов с определением скалярных коэффициентов интерполяции из условия стыковочного сопряжения многочленов на соседних сеточных участках. Получающиеся при этом «гладкие»

кусочно-многочленные функции и организуют сплайновый конгломерат. Поскольку в качестве оптимального аппроксиманта в постановке задачи удобочитаемости батиметрической карты всегда требуется *дифференцируемая функция*, принципиально исключающая точки геометрического разрыва, следует обратиться в оптимальном варианте к кубическим сплайнам как чрезвычайно гибкой конструкции, позволяющей выполнить наилучшие математические приближения. Таким образом, в некоторых прикладных задачах достаточно использовать линейные функции, однако более универсальным и удобным в вычислительном смысле оказывается применение кусочно-кубических многочленов для приближения «гладких» кривых и кусочно-бикубических многочленов в процессе представления «гладких» поверхностей [10].

В результате создания батиметрической карты визуально может быть практически неразличимым картографическое представление каждого алгоритма, что в первом приближении показано на рис. 1 [9].

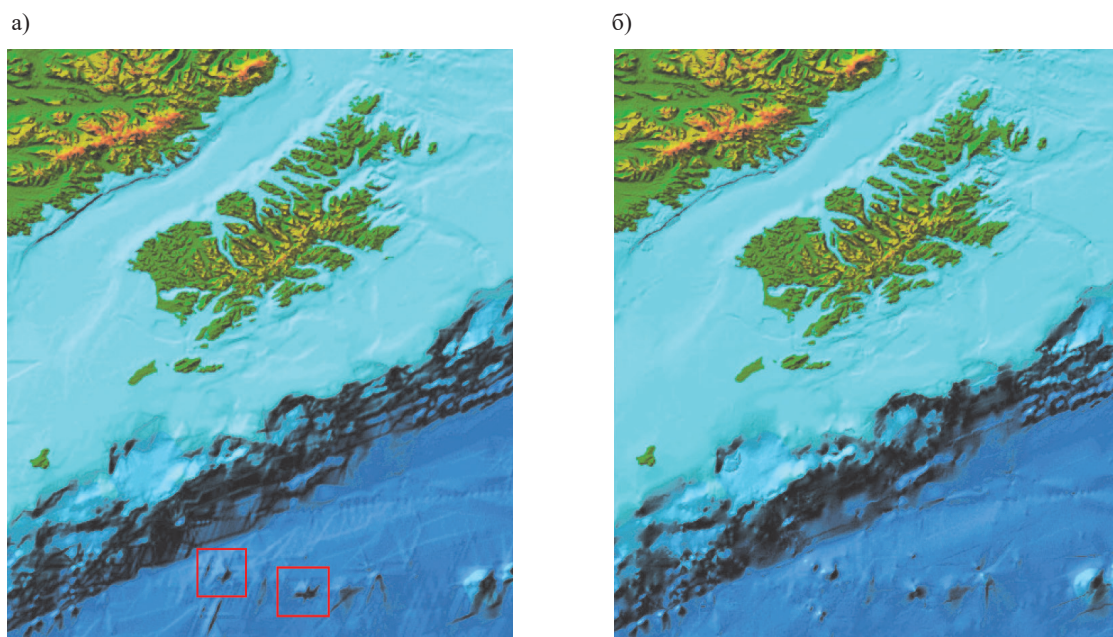


Рис. 1. Трехмерные визуализации созданных массивов глубин при использовании линейной интерполяции (а) и сплайн-функций (б)

Для географической области о. Кодиак в северной части Тихого океана были построены два массива глубин размерностью 600×600 точек с пространственным сеточным шагом в 0,5 географической минуты на основе двух рассматриваемых альтернативных алгоритмов: линейного интерполирования и сплайн-функции (см. рис. 1). Однако при внимательном рассмотрении даже в мелком масштабировании в нижней части рис. 1, а, соответствующего линейной интерполяции, видны «звездные» структуры на дне глубоководной части акватории, расположенные вокруг некоторых локальных экстремумов [9]. Негативные «звездные» элементы, обозначенные на рис. 1, а красными контурными прямоугольниками, подчеркивают стратегические недостатки алгоритма линейного интерполирования в сравнительной графической правдоподобности батиметрической карты, созданной на основе метода сплайн-функций (см. рис. 1, б). Дополнительно необходимо учитывать, что «лестничный эффект» как неизбежный атрибут линейной интерполяции неизбежно проявит себя при увеличительном масштабировании обычным зуммирующим скроллингом компьютерной мыши [15].

Подход с позиций теории приближения функций гарантирует достижение быстрогодействия вычислительных реализаций при наличии возможности получения результата в масштабе реального времени и обеспечение высокой алгоритмической точности гидрографических расчетов при условии компактности хранения навигационной информации. Популярность сплайна обусловлена эксперимен-

тально доказанной высокой точностью вычислительных операций до шестого порядка, т. е. шестого знака после запятой в расчете любого навигационного параметра при сплайн-интерполяции любой навигационной изолинии [16]. В ситуации аппроксимации альтернативными линейными комбинациями порядок приближения даже на равномерной сетке будет лишь вторым, а на неравномерной сетке — первым [17]. Если по условию практической задачи достаточно такой точности, то в этом случае появляется целесообразность применения линейного функционала.

В процессе исследования выдвигается гипотеза о необходимости высокоскоростного математического оперирования высокоточной батиметрической базой данных, которая может быть сформирована эффективным образом с использованием *методов сплайн-аппроксимаций*. В случае подтверждения данной научной гипотезы автоматически будут обеспечены высокие стандарты безопасности судоходства за счет применения в практических навигационных целях надежных в вычислительном смысле алгоритмов с программной их реализацией в удобной графической «оболочке» для воспроизводства подробной цифровой модели дна на основе разработанных средств трехмерной компьютерной визуализации.

При практической реализации концепции навигационного пространства в рамках проекта батиметрической навигации в реализации сплайн-функций сформулированы следующие задачи:

1. Математическая адаптация ретроспективного алгоритма *двумерной В-сплайновой аппроксимации* с целью получения реалистичного детального профиля подводного рельефа с требуемыми морфологическими свойствами.

2. Применение оптимального критерия в соответствии с использованием метода наименьших квадратов, учитывающего рассогласование синтезируемой топографии подводного ландшафта с морфологическими данными и априорную информацию о характере батиметрического рельефа морского дна.

3. Трехмерное визуализированное представление цифровых моделей батиметрической съемки на основе базисных финитных сплайнов.

4. Разработка прикладных паскаль-программ применительно к задаче компьютерной визуализации батиметрического ландшафта.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В обеспечение развития географических информационных компьютерных технологий предлагается нестандартный подход к созданию батиметрических электронных карт на базе *метода В-сплайновой аппроксимации*. Морфологические исследования на основе кусочных структурных каркасов могут позволить нивелировать ситуацию учета субъективного характера анализа подводной топографии при дефиците реальных измерений глубин [18].

Применение *В-сплайнов* автоматически организует стимул развития технологии трехмерной визуализации батиметрического рельефа морского дна. В минимизированном варианте предлагается в рамках апробированной стратегии обработки измерительных данных реализовывать промежуточные расчеты отметок глубин между узлами регулярной сетки на основе интерполяционных схем [19].

В качестве финального результата применения новых технологий на практике появляется исключительная возможность использования трехмерных компьютерных изображений для эффективного батиметрического мониторинга [20]. Достижение реалистичности и детальности виртуального изображения рельефа морского дна может быть обеспечено на базе собственных программных разработок при сознательном отказе от апелляции к зарубежным пакетам прикладных программ. Применение методов сплайн-функций в батиметрии позволит оптимальным образом актуализировать горизонты планирования по созданию будущей навигационной электронной карты 3D-формата.

Результаты (Results)

Математическое синтезирование батиметрического профильного рельефа морского дна реализуется на основе гибридной сплайновой модели [3]:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=-k}^{g+k+1} \sum_{j=-m}^{h+m+1} B_{i,k}(\varphi_q) B_{j,m}(\lambda_r) C_{i,j} &= F_{q,r} \text{ при } q=1, \dots, z_1; r=1, \dots, z_2; \\ \frac{1}{\sqrt{p}} \sum_{i=-k}^{g+k+1} \sum_{j=-m}^{h+m+1} B_{i,k}(\varphi_q) L_{j,r}(\lambda_r) C_{i,j} &= 0 \text{ при } q=1, \dots, z_1; r=1, \dots, h; \\ \frac{1}{\sqrt{p}} \sum_{i=-k}^{g+k+1} \sum_{j=-m}^{h+m+1} B_{j,m}(\lambda_r) L_{i,q}(\varphi_q) C_{i,j} &= 0 \text{ при } q=1, \dots, g; r=1, \dots, z_2; \\ \frac{1}{p} \sum_{i=-k}^{g+k+1} \sum_{j=-m}^{h+m+1} L_{i,q}(\varphi_q) L_{j,r}(\lambda_r) C_{i,j} &= 0 \text{ при } q=1, \dots, g; r=1, \dots, h, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где k, m — степени B -сплайна по координатным осям φ и λ соответственно;

g, h — максимальное количество узлов сеточного патча по координатным осям φ и λ соответственно;

$B_{i,k}(\varphi), B_{j,m}(\lambda)$ — «шапочные» функции базисного сплайна;

$C_{i,j}$ — матрица искомых скалярных коэффициентов;

p — сглаживающий весовой коэффициент;

z_1, z_2 — максимальное количество дискретных эхолотационных измерений глубины по координатным осям φ и λ соответственно;

$L_{i,q}, L_{j,r}$ — ассоциированные множители сплайнов лагранжевого типа;

q, r — фактическое количество узлов на координатных осях φ и λ , соответственно, с учетом граничных условий.

Алгоритмическое решение гибридной системы (1) выполняется модифицированным *методом наименьших квадратов для сплайн-аппроксимации навигационной изоповерхности* [21]. Для батиметрической навигации как процесса, протекающего в пространственной области в реальном масштабе времени, математическое моделирование эффективным образом может быть выполнено с помощью оптимального класса финитных функций при синхронном отображении результатов в электронной картографической системе [22]. Концептуально система (1) описывает аппроксимирующую сплайновую функцию, организованную из цепочки полиномов с обязательным условием «склейки» соседних в последовательности полиномов таким образом, что полиномиальные коэффициенты и значения их производных на сеточных «стыках» совпадают для обеспечения реалистичности генезиса рельефа морского дна.

Дополнительно определяются значения сплайновых производных на интервальных границах площадного промера глубин. Продуманное задание краевых условий производных обеспечивает оптимальную напряженность поверхности B -сплайна при автоматическом выполнении изогеометрической непрерывности по границам сеточного патча, что задает стимул подробной детализации реконструированной топологии за счет прохождения аппроксимированной поверхности через большинство исходных сеточных точек [23]. Поскольку при расчете одновременно подлежит арифметическому согласованию не вся комбинация задействованных в методе полиномов, а только близлежащие конструкции, такого рода многозвенники математически реализуются как B -сплайны [22]. Для универсальной ситуации применения кубического сплайна используются только четыре соседних полинома в каждой произвольной расчетной точке [13]. Интерполяционная изобата синтезируется на основе умножения последовательности «шапочных» функций из фиксированной группы базисных полиномов на расчетные скалярные коэффициенты в любой произвольной координате [24]. В данной трансформации базисная финитная функция является вторичной по отношению к оригинальной батиметрической функциональной зависимости, а сам B -сплайн — только математическим инструментарием для приближения навигационной функции глубины [25].

Главная проблема практической применимости B -сплайнов сводится к эффективному расчету искомых скалярных коэффициентов $C_{i,j}$ [26]. При конструировании любого B -сплайна авто-

матически организуется такое дополнительное преимущество упрощения интерполяционной схемы, как *свойство локальности* [27].

Согласованность смоделированных и измеренных площадных значений глубины можно определить при помощи критерия оптимизации [16]:

$$\sum_{q=1}^g \sum_{r=1}^h \left[F_{q,r} - \sum_{i=-k}^{g+k+1} \sum_{j=-m}^{h+m+1} B_{i,k}(\varphi_q) B_{j,m}(\lambda_r) C_{i,j} \right]^2 \leq S,$$

где S — эмпирический параметр сглаживания для учета морфологических особенностей рельефа морского дна.

По опыту интуитивное определение пользователем в интерактивном режиме числовой реализации S является эмпирическим компромиссом между точностью синтеза геометрии подводного ландшафта и правдоподобием трехмерной визуализации морфологических особенностей рельефа дна по принципу *виртуального ключа*, удачно «повернув» который можно получить удовлетворительную аппроксимацию батиметрических данных. На рис. 2 приведена скопированная с официального сайта National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Marine Geology and Geophysics батиметрическая карта H12373.

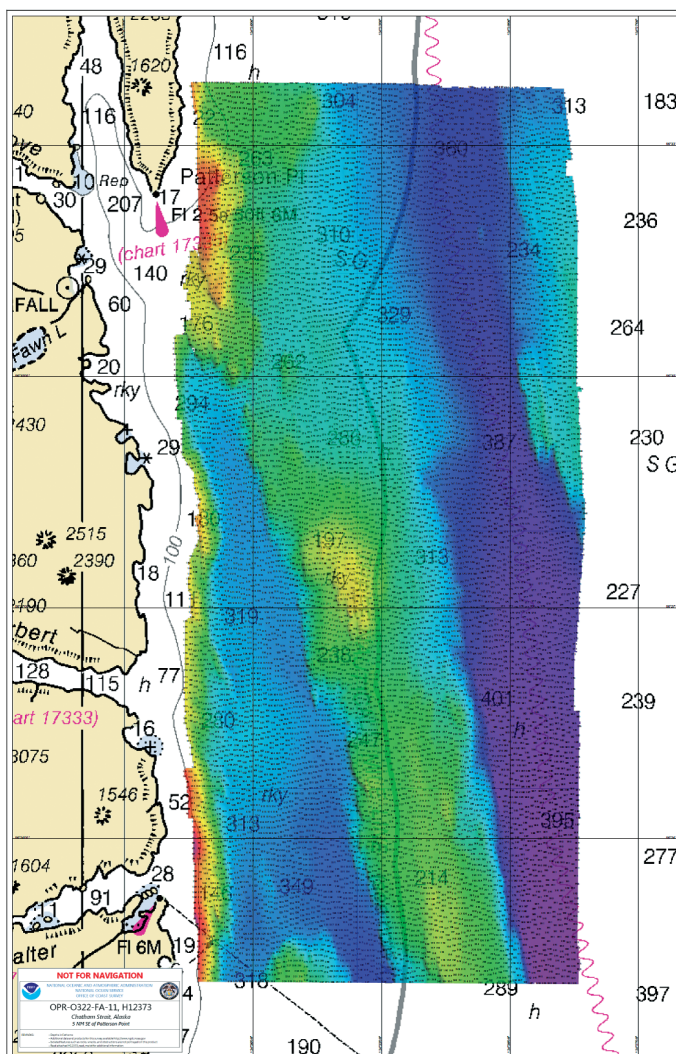


Рис. 2. Батиметрическая карта пролива Чатем

Параллельно с картой H12373 репродуцирован с сайта NOAA файл точечных данных эхолокации, являющийся цифровой основой данной батиметрической карты. Цифровая модель дна судоходного пролива на юго-востоке штата Аляска была использована для альтернативного

моделирования подводного рельефа *методом двумерной В-сплайновой аппроксимации* при использовании двенадцати сеточных точек по широте и девяти точек по долготе с соответствующим организованным матричным массивом глубин размерностью 9×12 при общем числе задействованных 108 точечных данных глубины. Принималось во внимание, что на карте побережья Аляски глубины обозначены в саженях, а цифровой файл измерительных данных представлен в метрической системе. Путем конвертации данных через переводной коэффициент 2,1336 в вычислительном процессе глубины использовались в саженях при синтезировании фрагмента рельефа дна у побережья Аляски. Цифровые данные эхолотации на рис. 3 представлены по структуре цифрового файла в текстовом формате координат XYZ (X — долгота, Y — широта и Z — измеренная глубина).

56.5328, -134.5556, 569.92
56.5351, -134.5577, 565.36
56.5494, -134.5549, 581.52
56.5420, -134.5529, 581.98
56.5460, -134.5529, 581.86
56.5448, -134.5534, 581.65
56.5382, -134.5530, 581.09
56.5480, -134.5544, 580.55
56.5431, -134.5534, 580.09
56.5469, -134.5544, 579.92

Рис. 3. Фрагмент цифрового файла эхолотационных измерений глубин

Первая координата X текстового файла представляет широту, вторая координата Y — долготу, третья координата Z — глубину до сотых долей метра в точке с прямоугольными координатами (X , Y). Поясним понимание отрицательной координаты Y на примере одного значения: -134.5556. Данное число обозначает 134 градуса западной долготы и 0,5556 десяти тысячной доли градуса этой же долготы. Факт размерности единиц измерения цифрового файла отмечается во избежание путаницы координаты долготы с типовым обозначением 134 град. 55 мин и 56 с при анализе батиметрической карты. В аспекте используемого приложения цифровой массив данных эхолотации можно интерпретировать как виртуальное цифровое облако точек глубин для *В-сплайновой аппроксимации* рельефа дна. С позиций данного подхода авторам статьи удалось успешно синтезировать профиль подводных песчаных дюн у берегов Франции при разнице в глубине моря до 33,2 м в исследуемом районе на основе математической обработки хаотичных данных, полученных с помощью батиметрической съемки [28].

С целью демонстрации принципиальной работоспособности предлагаемого алгоритма была выполнена трехмерная компьютерная визуализация синтезированного на методах базисных сплайнов фрагмента батиметрической карты пролива Чатем (рис. 4). Приведенная геометрическая интерпретация символизирует возможность адекватного вычисления в цифровом формате равного значения навигационного параметра каждой демонстрируемой изобаты.

При навигации с синхронным представлением данных батиметрии обеспечивается наглядное безопасное судовождение в условиях минимального запаса под килем в неаффилированной с зарубежным программным обеспечением графической среде трехмерной визуализации рельефа подводной топографии. При этом появляется реальная возможность эффективного прогнозирования управляемости судна на мелководье, так как рельеф дна показывает стесненность судна своей осадкой [29]. При программной реализации в бортовом компьютере алгоритмов, на основе прогрессивной технологии теории приближения функций, становится возможным оперативно маневрировать судном в сложных обстоятельствах при условии постоянной демонстрации судоводителю данных глубины в графической форме.

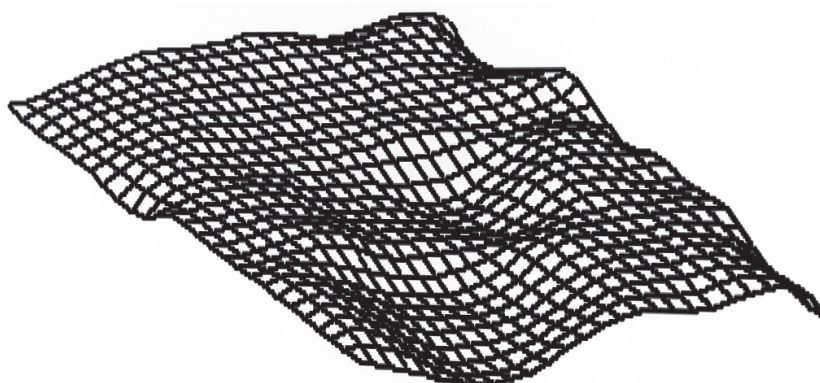


Рис. 4. Трехмерная визуализация синтезированного фрагмента рельефа подводной топографии Аляски

С учетом параллельного расчета приливо-отливных явлений на запланированное время прохода судна в географическом районе следования визуализированная информация может быть критически важной для безопасной проработки перехода. По сути, батиметрическая навигация в реализации методом сплайн-функций является *интеллектуальным подъемом карты*, апробированным на основе инновационных компьютерных технологий при усовершенствованном математическом методе моделирования рельефа дна.

Обсуждение (Discussion)

Возможности визуализации батиметрических карт в современных условиях за границами проблем классической навигации находят широкое применение в географических информационных системах (ГИС) [8], [30]. В качестве дополнительной экспертной функции структуры ГИС комплексным научно-экспериментальным подходом исследуются причинно-следственные связи природных катастроф нашей планеты [31].

Для численного моделирования региональных и локальных цунами первоначально необходимо сформировать детальную цифровую батиметрию для исследуемого региона [32]. Для обеспечения численного моделирования обязательно требуются подробные цифровые данные рельефа морского дна [33]. Исключительно на базе цифровой батиметрии непосредственно выполняется расчет распространения волн цунами. Целесообразность использования батиметрии для прогноза цунами объясняется тем, что на распространение катастрофических волн большое влияние оказывают топографические особенности морского дна. Например, подводные хребты служат волноводами, вдоль которых концентрируется энергия и создаются преимущественные направления для распространения волн цунами [8]. Таким образом, детальная цифровая батиметрия является исходной основой численного моделирования исследуемого географического региона [34].

Уникальная технология применения цифровой батиметрии на регулярной сетке для прогнозирования катастрофических волн заключается в определенной математической трансформации батиметрических данных в общем случае, когда множество точек с промерами глубины покрывает географическую область с достаточной плотностью [35]. Вначале из базы данных эхолокации извлекаются все точки с промерами, расположенные в данной области. Получается файл, каждая строка которого состоит из трех чисел: долгота, широта и измеренная глубина (см. рис. 3). Затем устанавливается длина пространственного шага сетки, в узлах которой интерполируются значения глубины. В последнюю очередь пересчитываются значения глубин из нерегулярного множества точек с промерами глубины в батиметрические значения в узлах регулярной сетки. Однако в процессе выполнения практических расчетов в большинстве случаев выясняется, что во многих гидрографических промерах расстояния между данными настолько велики, что использование только измерительной информации оказывается недостаточным для создания качественной регулярной батиметрии хорошей детальности с целью оперативного предсказания распространения волн цунами

с высокой долей вероятности [34]. Вследствие этого возникает явная необходимость применения интерполяционных процедур для расчета промежуточных батиметрических точек [9]. Фактически структурное качество базы данных батиметрической информации определяет уровень достоверности воспроизведения основных характеристик проявления волн цунами у побережья и реалистичность прогнозных параметров, вырабатываемых на основе результатов численного моделирования.

Детализированная на методе сплайн-интерполяции цифровая батиметрия эффективно используется для численного моделирования прогноза распространения волн цунами с параллельным синхронным анализом трехмерных изображений массивов глубин [36]–[38]. Цифровой массив глубин является первичной основой последующего численного алгоритма прогноза самого распространения волн цунами. В случае практического применения рассмотренного способа при трехмерной компьютерной визуализации становится возможным различать малейшие неровности рельефа морского дна.

Численное моделирование для исследования стихийных бедствий в океане реализуется методом математической формализации процессов генерации волн цунами на базовой основе данных батиметрии при условии применения специального вычислителя в структуре вентильных матриц, который в составе персонального компьютера способствует решению сложной системы уравнений с высокой производительностью [39]. Аппаратный ускоритель системы предупреждения об опасности цунами позволяет прогнозировать распространение катастрофической волны в масштабе реального времени [40]. Таким образом, в перспективе расширяются горизонты применения аппарата сплайн-функций для изучения природных катастроф Земли с позиций перспективной математической обработки батиметрических данных при использовании современных компьютерных технологий.

Выводы (Summary)

Проведенное исследование возможности синтеза и компьютерной визуализации подводного рельефа дна на основе методов сплайн-функций позволяет сделать следующие выводы:

1. Математический алгоритм двумерной B -сплайновой аппроксимации адаптирован под моделирование батиметрического профиля рельефа морского дна.
2. Реализован в алгоритме целевой квадратичный функционал, учитывающий рассогласование моделируемой поверхности рельефа дна с морфологическими данными и априорную информацию о генезисе синтезируемого батиметрического поля.
3. Выполнено трехмерное визуализированное представление цифровых моделей площадной батиметрической съемки на основе базисных финитных сплайнов.
4. Разработаны прикладные программы, объединенные пользовательским интерфейсом в турбо-паскалевской компьютерной «оболочке» применительно к задаче синтеза и визуализации батиметрических профилей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Королев И. Ю.* Исследование влияния подробности промера на оценку гарантированных глубин в акватории Северного морского пути: автореф. дис. ... канд. техн. наук / И.Ю. Королёв. — СПб., 2018. — 23 с.
3. *Ююкин И. В.* Поиск ошибок в базе навигационных данных методом визуализации сплайновой изоповерхности / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 481–491. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-481-491.
4. *Lavrenov R.* Modified Spline-Based Navigation: Guaranteed Safety for Obstacle Avoidance / R. Lavrenov, F. Matsuno, E. Magid // Interactive Collaborative Robotics. ICR 2017. Lecture Notes in Computer Science. — Springer, Cham, 2017. — Vol. 10459. — Pp. 123–133. DOI: 10.1007/978-3-319-66471-2_14.

5. *Chang K. Y.* Route planning and cost analysis for travelling through the Arctic Northeast Passage using public 3D GIS / K. Y. Chang, S. S. He, C. C. Chou, S. L. Kao, A. S. Chiou // *International Journal of Geographical Information Science*. — 2015. — Vol. 29. — Is. 8. — Pp. 1375–1393. DOI: 10.1080/13658816.2015.1030672.
6. Гагарский Д. А. Электронные картографические системы / Д. А. Гагарский. — СПб.: Морсар, 2017. — 224 с.
7. *Kvasov B.* Weighted cubic and biharmonic splines / B. Kvasov, T. W. Kim // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. — 2017. — Vol. 57. — Is. 1. — Pp. 26–44. DOI: 10.1134/S0965542517010109.
8. Марчук А. Г. Математическое моделирование генерации, распространения и наката волн цунами на берег: дис. ... д-ра физ.-мат. наук / А. Г. Марчук. — Новосибирск, 2000. — 217 с.
9. Марчук А. Г. Метод создания цифровых массивов глубин океана на регулярных сетках / А. Г. Марчук, А. Ю. Бежаев // Труды Международной конференции «Математические методы в геофизике». — Новосибирск, 2003. — Ч. 2. — С. 561–567.
10. Волков Ю. С. Сплайны как инструмент геометрического моделирования (к 80-летию со дня рождения Ю. С. Завьялова) / Ю. С. Волков, В. Л. Мирошниченко, С. И. Фадеев // *Сибирские электронные математические известия*. — 2011. — Т. 8. — С. А11–А16.
11. Жухлин А. М. Обработка навигационной информации в системах обеспечения безопасности плавания с позиций теории приближения функций: дис. ... д-ра техн. наук / А. М. Жухлин. — Л., 1984. — 325 с.
12. Ююкин И. В. Алгоритмизация навигационных задач на основе методов кусочных аппроксимаций: дис. ... канд. техн. наук / И. В. Ююкин. — Л., 1991. — 119 с.
13. 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.
14. *Getreuer P.* Linear Methods for Image Interpolation / P. Getreuer // *Image Processing On Line*. — 2011. — Vol. 1. — Pp. 238–259. DOI: 10.5201/ipol.2011.g_lmii.
15. *Briand T.* Reversibility Error of Image Interpolation Methods: Definition and Improvements / T. Briand // *Image Processing On Line*. — 2019. — Vol. 9. — Pp. 360–380. DOI: 10.5201/ipol.2019.277.
16. Ююкин И. В. Навигационное использование e-Logan в модификации с методом сплайн-функций / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 703–715. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-703-715.
17. Волков Ю. С. О погрешности приближения простейшей локальной аппроксимацией сплайнами / Ю. С. Волков, В. В. Богданов // *Сибирский математический журнал*. — 2020. — Т. 61. — № 5. — С. 1000–1008. DOI: 10.33048/smzh.2020.61.503.
18. Фирсов Ю. Г. Современная батиметрическая съемка Северного Ледовитого океана в контексте определения внешних границ континентального шельфа в Арктике / Ю. Г. Фирсов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2016. — № 6 (40). — С. 81–95. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-81-95.
19. Фирсов Ю. Г. Специальное навигационное обеспечение и точность батиметрической съемки для решения задач глубоководных геологоразведочных работ / Ю. Г. Фирсов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1070–1087. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1070-1087.
20. Фирсов Ю. Г. Проблемы отображения рельефа дна в российских батиметрических картах Северного Ледовитого океана / Ю. Г. Фирсов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 880–892. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-880-892.
21. Ююкин И. В. Модификация метода наименьших квадратов для сплайн-аппроксимации навигационной изоповерхности / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.
22. Гомонов А. Д. Математическое моделирование уровенной поверхности океана по спутниковым данным на основе двумерной В-сплайн аппроксимации: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Д. Гомонов. — СПб., 2011. — 18 с.

23. *Le-Thi-Thu N.* Reconstruction of Low Degree B-spline Surfaces with Arbitrary Topology Using Inverse Subdivision Scheme / N. Le-Thi-Thu, K. Nguyen-Tan, T. Nguyen-Thanh // Journal of Science and Technology: Issue on Information and Communications Technology. — 2017. — Vol. 3. — № 1. — Pp. 82–88. DOI: 10.31130/jst.2017.41.
24. *Chaudhuri A.* B-Splines / A. Chaudhuri // Encyclopedia of Computer Graphics and Games. — Springer, Cham, 2019. — Pp. 1–11. DOI: 10.1007/978-3-319-08234-9_359-1.
25. *Ююкин И.В.* Сплайн-интерполяция навигационных изолиний / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.
26. *Briand T.* Theory and Practice of Image B-spline Interpolation/ T. Briand, P. Monasse // Image Processing On Line. — 2018. — Vol. 8. — Pp. 99–141. DOI: 10.5201/ipol.2018.221.
27. *Ююкин И. В.* Интерполяция навигационной функции сплайном лагранжева типа / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 57–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-57-70.
28. *Raffo A.* Data-driven quasi-interpolant spline surface for point cloud approximation / A. Raffo, S. Biasotti // Computers & Graphics. — 2020. — Vol. 89. — Pp. 144–155. DOI: 10.1016/j.cag.2020.05.004.
29. *Афонин А. Б.* Комплексная оценка безопасности плавания в акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1132–1142. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1132-1142.
30. *Ol'khovik E.* Geoinformation system use for transportations planning in water area of Northern Sea Route / E. Ol'khovik // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2018. — Vol. 194. — Is. 7. — Pp. 072010. DOI: 10.1088/1755-1315/194/7/072010.
31. *Mikheeva A. V.* The GIS-ENDDB algorithms and methods for geoinformation-expert data analysis / A.V. Mikheeva, I.I. Kalinnikov // Machine Learning and Data Analysis. — 2017. — Vol. 3. — Is. 1. — Pp. 36–49. DOI: 10.21469/22233792.3.1.03.
32. *Lavrentiev M.* Fast Determination of Tsunami Source Parameters / M. Lavrentiev, D. Kuzakov, A. Marchuk // Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal. — 2019. — Vol. 4. — Is. 6. — Pp. 61–66. DOI: 10.25046/aj040608.
33. *Kulikov E. A.* Numerical tsunami modeling and the bottom relief / E. A. Kulikov, V. K. Gusiakov, A. A. Ivanova, B. V. Baranov // Moscow University Physics Bulletin. — 2016. — Vol. 71. — Is. 6. — Pp. 527–536. DOI: 10.3103/S002713491605012X.
34. *Marchuk A. G.* Estimating the height a tsunami wave propagating over a parabolic bottom in the ray approximation / A. G. Marchuk // Numerical Analysis and Applications. — 2017. — Vol. 10. — Is. 1. — Pp. 17–27. DOI: 10.1134/S1995423917010037.
35. *Hayashi K.* Distributed nested streamed models of tsunami waves / K. Hayashi, A. Vazhenin, A. Marchuk // International Journal of Computational Science and Engineering. — 2020. — Vol. 23. — Is. 2. — Pp. 124–135. DOI: 10.1504/IJCS.2020.10032807.
36. *Vazhenin A.* The Software Using Digital Databases and GIS Interface for Detecting Geodynamic Structures / A. Vazhenin, A. Mikheeva, P. Dyadkov, A. Marchuk // New Trends in Intelligent Software Methodologies, Tools and Techniques: Proceedings of the 16th International Conference (SoMeT-17). — IOS Press, 2017. — Vol. 297. — Pp. 576–592. DOI: 10.3233/978-1-61499-800-6-576.
37. *Hayashi K.* Generating Boundary Conditions for the Calculations of Tsunami Propagation on Nested Grids / K. Hayashi, An. G. Marchuk, A. P. Vazhenin // Numerical Analysis and Applications. — 2018. — Vol. 11. — Is. 3. — Pp. 256–267. DOI: 10.1134/S1995423918030060.
38. *Gusiakov V. K.* Global Occurrence of Large Tsunamis and Tsunami-like Waves Within the Last 120 years (1900-2019) / V.K. Gusiakov // Pure and Applied Geophysics. — 2020. — Vol. 177. — Pp. 1261–1266. DOI: 10.1007/s00024-020-02437-9.
39. *Kono F.* Evaluations of OpenCL-written tsunami simulation on FPGA and comparison with GPU implementation / F. Kono, N. Nakasato, K. Hayashi, A. Vazhenin, S. Sedukhin // The Journal of Supercomputing. — 2018. — Vol. 74. — Is. 6. — Pp. 2747–2775. DOI: 10.1007/s11227-018-2315-8.
40. *Lavrentiev M.* Hardware Acceleration of Tsunami Wave Propagation Modeling in the Southern Part of Japan / M. Lavrentiev, K. Lysakov, A. Marchuk, K. Oblaukhov, M. Shadrin // Applied Science. — 2020. — Vol. 10. — Is. 12. — Pp. 4159. DOI: 10.3390/app10124159.

REFERENCES

1. 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.
2. Korolev, I. Yu. Issledovanie vliyaniya podrobnosti promera na otsenku garantirovannykh glubin v akvatorii Severnogo morskogo puti. Abstract of PhD diss. SPb, 2018.
3. Yuyukin, Igor V. "Search for errors in the base of navigation data by the method of spline isosurface visualization." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 481–491. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-481-491
4. Lavrenov, Roman, Fumitoshi Matsuno, and Evgeni Magid. "Modified Spline-Based Navigation: Guaranteed Safety for Obstacle Avoidance." *Interactive Collaborative Robotics. ICR 2017. Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 10459. Springer, Cham, 2017. 123–133. DOI: 10.1007/978-3-319-66471-2_14.
5. Chang, Ki-Yin, S. S. He, C. C. Chou, Sheng Long Kao, and A.S. Chiou. "Route planning and cost analysis for travelling through the Arctic Northeast Passage using public 3D GIS." *International Journal of Geographical Information Science* 29.8 (2015): 1375–1393. DOI: 10.1080/13658816.2015.1030672.
6. GagarSKIY, Dmitriy A. *Elektronnye kartograficheskie sistemy*. SPb.: Morsar, 2017.
7. Kvasov, Boris, and Tae-Wan Kim. "Weighted cubic and biharmonic splines." *Computational Mathematics and Mathematical Physics* 57.1 (2017): 26–44. DOI: 10.1134/S0965542517010109.
8. Marchuk, Andrei G. Matematicheskoe modelirovanie generatsii, rasprostraneniya i nakata voln tsunami na bereg. Dr. Diss. Novosibirsk, 2000.
9. Marchuk, A. G., and A. Yu. Bezhaev. "Metod sozdaniya tsifrovyykh massivov glubin okeana na regulayrnykh setkah." *Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii "Matematicheskie Metody v Geofizike"*. Part 2. Novosibirsk, 2003. 561–567.
10. Volkov, Yu. S., V. L. Miroshnichenko, and S. I. Fadeev. "Splines as a geometric modeling tool (to the 80 anniversary of the birth of Yu. S. Zav'yalov)." *Siberian Electronic Mathematical Reports* 8 (2011): A11–A16.
11. Zhukhlin, A. M. Obrabotka navigatsionnoi informatsii v sistemakh obespecheniya bezopasnosti plavaniya s pozitsii teorii priblizheniya funktsii. Dr. Diss. L., 1984.
12. Yuyukin, I. V. Algoritmizatsiya navigatsionnykh zadach na osnove metodov kusochnykh approksimatsii. PhD Diss. L., 1991.
13. 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.
14. Getreuer, Pascal. "Linear Methods for Image Interpolation." *Image Processing On Line* 1 (2011): 238–259. DOI: 10.5201/ipol.2011.g_lmii.
15. Briand, Thibaud. "Reversibility Error of Image Interpolation Methods: Definition and Improvements." *Image Processing On Line* 9 (2019): 360–380. DOI: 10.5201/ipol.2019.277.
16. Yuyukin, Igor V. "Navigational use of the e-LORAN system in modification with the spline functions method." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 703–715. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-703-715.
17. Volkov, Yu. S., and V. V. Bogdanov. "On error estimates of local approximation by splines." *Siberian Mathematical Journal* 61.5 (2020): 1000–1008. DOI: 10.33048/smzh.2020.61.503.
18. Firsov, Yuriy Georgievich. "Modern bathymetric survey in the Arctic ocean in the content of the extended continental shelf determination in Arctic." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(40) (2016): 81–95. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-81-95.
19. Firsov, Yuriy G. "Special navigational support and accuracy of bathymetric surveys for deep-sea marine geological investigations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1070–1087. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1070-1087.
20. Firsov, Yuriy G. "Seabed relief mapping problems on the Russian bathymetric chart of the Arctic Ocean." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 880–892. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-880-892.
21. Yuyukin, Igor V. "Modification of the least squares method for spline approximation of navigational isosurface." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.

22. Gomonov, A. D. Matematicheskoe modelirovanie urovnennoi poverkhnosti okeana po sputnikovym dan-nyam na osnove dvumernoi B-spline approksimatsii. Abstract of PhD diss. SPb, 2011.
23. Le-Thi-Thu, Nga, Khoi Nguyen-Tan, and Thuy Nguyen-Thanh. "Reconstruction of Low Degree B-spline Surfaces with Arbitrary Topology Using Inverse Subdivision Scheme." *Journal of Science and Technology: Issue on Information and Communications Technology* 3.1 (2017): 82–88. DOI: 10.31130/jst.2017.41.
24. Chaudhuri, Arindam. "B-Splines." *Encyclopedia of Computer Graphics and Games*. Springer, Cham, 2019. 1–11. DOI: 10.1007/978-3-319-08234-9_359-1.
25. Yuyukin, Igor V. "Spline interpolation of navigational isolines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.
26. Briand, Thibaud, and Pascal Monasse. "Theory and Practice of Image B-spline Interpolation." *Image Processing On Line* 8 (2018): 99–141. DOI: 10.5201/ipol.2018.221.
27. Yuyukin, Igor V. "Interpolation of navigational function by lagrange type spline." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 57–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-57-70.
28. Raffo, Andrea, and Silvia Biasotti. "Data-driven quasi-interpolant spline surface for point cloud approximation." *Computers & Graphics* 89 (2020): 144–155. DOI: 10.1016/j.cag.2020.05.004.
29. Afonin, Andrej B. "A comprehensive assessment of the safety of navigation in the water area of the Northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1132–1142. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1132-1142.
30. Ol'khovik, E. "Geoinformation system use for transportations planning in water area of Northern Sea Route." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 194. Is. 7. 2018. DOI: 10.1088/1755-1315/194/7/072010.
31. Mikheeva, Anna V., and Igor I. Kalinnikov. "The GIS-ENDDB algorithms and methods for geoinformation-expert data analysis." *Machine Learning and Data Analysis* 3.1 (2017): 36–49. DOI: 10.21469/22233792.3.1.03.
32. Lavrentiev, Mikhail, Dmitry Kuzakov, and Andrey Marchuk. "Fast Determination of Tsunami Source Parametr." *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal* 4.6 (2019): 61–66. DOI: 10.25046/aj040608.
33. Kulikov, Evgeny A., Viacheslav K. Gusiakov, Anastasia A. Ivanova, and Boris V. Baranov. "Numerical tsunami modeling and the bottom relief." *Moscow University Physics Bulletin* 71.6 (2016): 527–536. DOI: 10.3103/S002713491605012X.
34. Marchuk, An. G. "Estimating the height a tsunami wave propagating over a parabolic bottom in the ray approximation." *Numerical Analysis and Applications* 10.1 (2017): 17–27. DOI: 10.1134/S1995423917010037.
35. Hayashi, Kensaku, Alexander Vazhenin, and Andrey Marchuk. "Distributed nested streamed models of tsunami waves." *International Journal of Computational Science and Engineering* 23.2 (2020): 124–135. DOI: 10.1504/IJCS.2020.10032807.
36. Vazhenin, Alexandr, Anna Mikheeva, Petr Dyadkov, and Andrey Marchuk. "The Software Using Digital Databases and GIS Interface for Detecting Geodynamic Structures." *New Trends in Intelligent Software Methodologies, Tools and Techniques: Proceedings of the 16th International Conference (SoMeT-17)*. Vol. 297. IOS Press, 2017. 576–592. DOI: 10.3233/978-1-61499-800-6-576.
37. Hayashi, Kensaku, Andrei G. Marchuk, and Alexander P. Vazhenin. "Generating Boundary Conditions for the Calculations of Tsunami Propagation on Nested Grids." *Numerical Analysis and Applications* 11.3 (2018): 256–267. DOI: 10.1134/S1995423918030060.
38. Gusiakov, Viacheslav K. "Global Occurrence of Large Tsunamis and Tsunami-like Waves Within the Last 120 years (1900–2019)." *Pure and Applied Geophysics* 177 (2020): 1261–1266. DOI: 10.1007/s00024-020-02437-9.
39. Kono, Fumia, Naohito Nakasato, Kensaku Hayashi, Alexander Vazhenin, and Stanislav Sedukhin. "Evaluations of OpenCL-written tsunami simulation on FPGA and comparison with GPU implementation." *The Journal of Supercomputing* 74.6 (2018): 2747–2775. DOI: 10.1007/s11227-018-2315-8.
40. Lavrentiev, Mikhail, Konstantin Lysakov, Andrey Marchuk, Konstantin Oblaukhov, and Mikhail Shadrin. "Hardware Acceleration of Tsunami Wave Propagation Modeling in the Southern Part of Japan." *Applied Science* 10.12 (2020): 4159. DOI: 10.3390/app10124159.

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: enigma_777@mail.ru, kaf_nav@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: enigma_777@mail.ru, kaf_nav@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 16 декабря 2020 г.

Received: December 16, 2020.