

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.46;550.83(86)

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА ДНА

© 2022 г. Н. В. Либина*

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

**e-mail: lnatvit@mail.ru*

Поступила в редакцию 15.06.2021 г.

После доработки 12.07.2021 г.

Принята к публикации 19.08.2021 г.

Методы пространственной математической обработки цифровых моделей рельефа (ЦМР) дна позволяют получать широкий ряд характеристик поверхности дна. Результаты обработки ЦМР могут иметь как самостоятельное практическое применение и выступать в качестве параметров систематизации, типизации и районирования морского дна, так и выполнять промежуточные или подготовительные вычисления для последующих операций с преобразованным файлом в зависимости от решаемой задачи. В данной работе предлагается один из возможных вариантов классификации методов обработки ЦМР дна и приводятся примеры применения некоторых методов.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа дна, морфометрические характеристики рельефа дна, фильтр, частота

DOI: 10.31857/S0030157422020125

ВВЕДЕНИЕ

Рельеф дна является одним из основных факторов, влияющих на процессы, протекающие на границе литосферы и гидросферы. Сформированный в результате взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов различного масштабного уровня, рельеф дна может характеризовать геоморфологические свойства и геологическое строение территории. Подводный рельеф, конфигурация береговой линии, крутизна склонов и резкие изменения рельефа дна влияют на направление и скорость придонных течений, циркуляцию водных масс, перемещение и отложение осадочного материала на дне, распространение льдов на мелководных участках шельфа.

Методы пространственной математической обработки непосредственно цифровой модели рельефа (ЦМР) позволяют получать широкий ряд характеристик поверхности дна. Результаты обработки ЦМР могут иметь как самостоятельное практическое применение и выступать в качестве параметров систематизации, типизации и районирования морского дна, так и выполнять промежуточные или подготовительные вычисления для последующих операций с преобразованным файлом в зависимости от решаемой задачи.

Применяемый уже достаточно широко геоморфометрический анализ рельефа для изучения наземных ландшафтов находит все большее применение и для исследования морского дна [1, 11,

14, 15, 18, и др.]. Это связано с активным развитием и применением многолучевого эхолотирования дна, что резко увеличило доступность цифровых батиметрических данных, а также с развитием программного обеспечения пространственного анализа, в том числе геоинформационных систем (ГИС), содержащих модули для расчета геоморфометрических характеристик рельефа.

Из-за динамического, четырехмерного (4-D) характера морской среды не все наземные решения могут быть приняты для анализа морского дна. Соответственно методы обработки и анализа подводного рельефа, в том числе и морской морфометрии, не столь разнообразны, как наземные [18]. При том, что получение данных о подводном рельефе по сравнению с сухопутным рельефом существенно более трудоемко и дорогостояще, извлечение максимально возможной информации из ЦМР дна всеми возможными способами является весьма актуальным как для научных исследований, так и для прикладных работ на шельфе. Также актуально более широкое применение существующих и разработка и использование новых методов анализа рельефа.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

ЦМР представляет двумерное распределение функции высоты (глубины). Для возможности математической обработки ЦМР должна быть

сформирована в виде сеточного файла с равным шагом дискретизации по обеим осям. В частности, таким типом являются файлы GRID-формата с $\Delta X = \Delta Y$.

Основным источником общедоступных батиметрических моделей является Генеральная батиметрическая карта Мирового океана (General Bathymetric Chart of the Oceans – GEBCO). С 1973 г. Программа GEBCO является объединенной программой Межправительственной океанографической комиссии (МОК) ЮНЕСКО и Международной гидрографической организации (МГО). К 2003 году на базе оцифрованных бумажных батиметрических карт, дополненных данными батиметрических промеров, была составлена ЦМР Мирового океана, представленная в виде первого Цифрового Атласа GEBCO с размером ячейки в 1 угловую минуту. Усилиями международного научного сообщества GEBCO постоянно пополняется новыми данными и периодически обновляется. В 2009 г. была представлена новая ЦМР “GEBCO-2008” с размером ячейки 30 угловых секунд. В состав GEBCO была компилирована созданная для арктического региона Международная батиметрическая карта Северного Ледовитого океана International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO). В 2015 г. проект был обновлен и вышел с наименованием “GEBCO-2014”. Батиметрическая модель “GEBCO-2019” является новой реализацией “GEBCO-14” с размером ячейки 15 угловых секунд.

Помимо цифровой батиметрической карты GEBCO, существуют региональные ЦМР дна, а также модели, созданные на основе имеющихся ЦМР и данных многолучевого эхолотирования. Помимо ЦМР дна, построенных исключительно по данным многолучевого эхолотирования, все остальные батиметрические ЦМР являются компиляцией разнородных данных, с нерегулярной плотностью распределения промеров глубин и существенными различиями в пространственном разрешении и точности исходных данных. Для их создания могли быть использованы результаты однолучевого и многолучевого эхолотирования, оцифрованные разномасштабные навигационные и батиметрические карты, результаты обработки данных спутниковой альтиметрии, а для мелководных зон – материалы воздушной лидарной съемки. Нерегулярность сеток исходных измерений глубин, проводимых с различной точностью и разрешением, неоднозначность результатов интерполяции батиметрических данных в районах, где измерения глубин не проводились, снижает качество ЦМР дна. Это необходимо учитывать при использовании батиметрических ЦМР, в том числе и при использовании их в качестве исходных данных для последующей обработки.

В Институте океанологии им. П.П. Ширшова совместно с Географическим факультетом МГУ им. М.В. Ломоносова на основе навигационных карт различного масштаба созданы ЦМР дна Белого, Баренцева и Печорского морей с максимальной возможной по имеющимся данным детальностью и учетом геоморфологии. Методика построения ЦМР дна подробно описана в работах [9, 10].

МЕТОДЫ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ ЦМР ДНА

Цифровые модели рельефа отображают рельеф в виде сетки, в которой данные высоты H (на суше) и глубины (для подводного рельефа) могут быть представлены разными способами и соответствующими им форматами. Основные формы представления ЦМР: 1) модель GRID, где H указывается для каждой ячейки регулярной сетки, 2) треугольная нерегулярную сеть. Для проведения каких-либо вычислительных операций преимущественно используется равномерная сетка типа GRID-файла.

Рельеф может рассматриваться как сумма поверхностей различных форм и масштабов. Этот подход лежит в основе многих методов обработки ЦМР: например, низкочастотная сглаживающая фильтрация ЦМР для удаления высокочастотного шума, генерализация ЦМР (удаление высокочастотных составляющих, отличные от шума), высокочастотная фильтрация, вычитающая региональный фон, а также выделения низко- и высокочастотных компонент рельефа при изучении закономерностей его строения. Для решения этих задач используются различные методы: сглаживание скользящими окнами, анализ Фурье, тренд-анализ, фильтры Кальмана, сглаживание ЦМР удалением из грид-сетки каждой n -строки и n -столбца, двумерный анализ сингулярного спектра (2D-SSA) [3, 5], морфометрический анализ и ряд других, как типовых, так и экспериментальных, пока единично применяемых методов.

GRID-файл ЦМР можно рассматривать как аналог монохромного полутонового изображения, где значению оттенка пикселя изображения соответствует глубина. Такой подход позволяет применить методы цифровой обработки (в частности, методы фильтрации) монохромного изображения к ЦМР. Стоит отметить, что методы обработки цифрового изображения, в том числе данных дистанционного зондирования, быстро развиваются и располагают широким диапазоном методических возможностей. Некоторые из них, а также методы обработки геофизических полей могут быть применены к обработке ЦМР.

Методы численного анализа рельефа дна могут иметь принципиально различную матема-

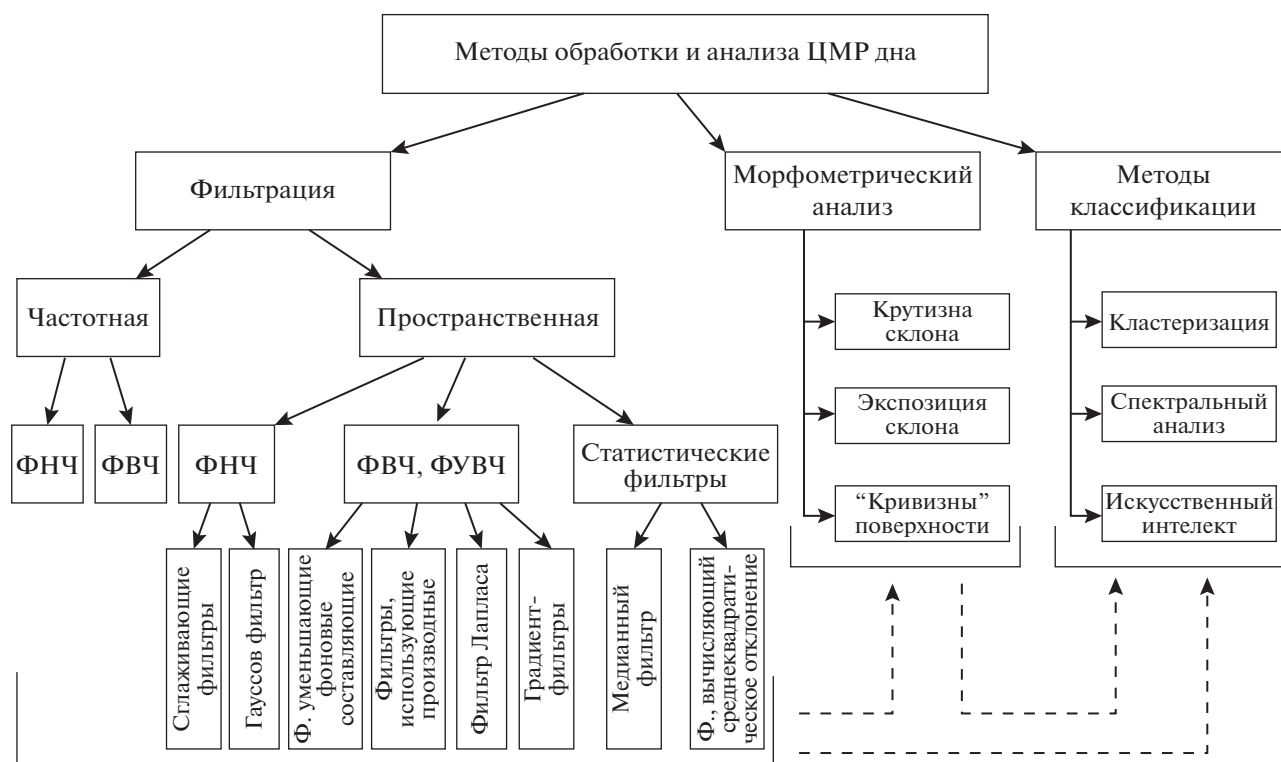


Рис. 1. Вариант классификации методов обработки и анализа ЦМР дна.

тическую основу и применяться для решения широкого круга задач, что затрудняет создание исчерпывающей их классификации. Один из возможных вариантов классификации методов обработки ЦМР дна предлагается в данной работе и приведен на рис. 1. Выделены три класса преобразования данных по виду решаемых задач: фильтрация, морфометрический анализ, классификация. Необходимо отметить, что это не единственно возможный подход систематизации методов обработки рельефа. Так, в методах, отнесенных к разным типам, может применяться аналогичный математический аппарат. В раздел классификации вошли методы, которые могут использоваться и для других задач, а также перспективные, но пока мало применяемые для обработки рельефа дна. В основном эти методы используются после фильтрации или применения морфометрического анализа. Пунктирными стрелками на рисунке 1 показана возможная последовательность применения методов обработки. В данную схему не вошли методы, являющиеся преимущественно промежуточными в обработке данных, например, удаление трендов, вычисление сплайнов и другие.

Фильтрация ЦМР может быть разделена на пространственную и частотную. К пространственной фильтрации относятся преобразования, основанные на операции свертки, использующие локальные данные из окрестности точки

(узла сетки). К частотной фильтрации относятся фильтры, основанные на преобразовании Фурье и использующие информацию обо всех элементах пространственной сетки. Пространственная и частотная фильтрации отличаются способами расчета в разных областях представления данных.

Пространственная фильтрация реализуется посредством вычисления значения в каждом узле выходной сетки как функции значения в соответствующем узле и значений в окружающих его соседних узлах во входной сетке. При этом значения в соседних узлах учитываются с присвоенными им весами. Соседними узлами является узлы прямоугольного участка входной сетки, который центрирован относительно соответствующего узла входной сетки. Соответственно, ширина и высота такого участка определяется количеством столбцов и строк. Фильтр последовательно “перезжает” от узла к узлу, и процесс продолжается, пока все узлы не будут обработаны. Преимущественно используется квадратное весовое окно (маска фильтра), например 3×3 , 5×5 узла и другие. В качестве оператора свертки, выполняемого в маске фильтра, может использоваться практически любая весовая функция. Локальные пространственные фильтры могут применять линейные и нелинейные операции над данными в пределах области, ограниченной перемещающимся (скользящим) окном [4, 7, 18].

Наиболее широко применяются линейные фильтры, использующие в качестве маски взвешенную сумму. К ним относятся фильтры низких частот (ФНЧ), фильтры высоких частот (ФВЧ), фильтры усиления высоких частот (ФУВЧ). В нелинейных локальных пространственных фильтрах механизм перемещения окна (маски) такой же, что и у линейных фильтров. Однако функция преобразования значений элементов анализируемой локальной области для получения результата, относимого к положению центра окна, является нелинейной.

К нелинейным фильтрам относятся статистические фильтры: медианный, среднеквадратичного отклонения, модальный, адаптивный, фильтры минимума и максимума, векторные градиент-фильтры.

Фильтры низких частот сглаживают локальные отклонения рельефа, удаляют мелкие детали, удаляют высокочастотный шум; в результате они могут применяться для выделения региональных, мезомасштабных форм рельефа дна. ФНЧ сохраняет локальное среднее значение (сумма весовых коэффициентов равна единице) и сглаживает входной рельеф. При этом чем больше размер окна, тем больше уровень сглаживания.

Гауссов фильтр также усредняет значения и является сглаживающим низкочастотным фильтром, но меньше размывает изображение; соответственно четкость у него выше, чем у сглаживающего. Четкость гауссова фильтра зависит от маски и размеров матрицы: чем больше матрица, тем ниже четкость.

Фильтры высоких частот удаляют низкочастотные составляющие, вычитают региональный фон, уменьшают фоновые составляющие и подчеркивают локальные детали, удаляют медленно меняющиеся значения и подчеркивают высокочастотные локальные изменения, выделяют области резких переходов на фоне постепенных изменений. ФВЧ обнуляет локальное среднее значение (сумма весовых коэффициентов равна нулю) и на выходе дает результат, характеризующий отклонение входного значения от локального среднего.

ФВЧ и ФУВЧ применяются и для повышения контрастности, выделения и усиления краев. Это могут быть фильтры с нулевой суммой весовых коэффициентов, которые приводят к получению выходных значений:

- равных нулю в областях, где исходные значения равны (нет границ);
- низких в областях низкой пространственной частоты;
- экстремальных (когда высокие значения становятся гораздо выше, а низкие – еще ниже) в областях высокой пространственной частоты [17].

Фильтры на основе первых производных улучшают изображение. Для выделения на изображении элементов, имеющих определенное направление, используют направленные фильтры. Они также относятся к фильтрам усиления высоких частот и реализуют вычисление производной в определенном направлении.

Градиент-фильтры используют первые производные, применяются для выделения контуров границ и линейных объектов, которые могут соответствовать линиям разломов или разного рода структурным элементам.

Идеальные границы могут быть двух типов: 1) “склон”, которая определяется “крутизной” смены значений глубин точек смежных областей; 2) “скачок” с резкой сменой значений глубин двух соседних точек. Однако реальные значения данных либо создают более сложные границы, либо четкие границы отсутствуют. Детекция границ может предполагать выделение очертаний, линий или областей. Алгоритмы выделения границ рассматривают изменения данных глубины как некоторую непрерывную функцию и используют операции с производными 1-го и 2-го порядка. При переходе через линейный объект или контур данные меняются скачкообразно или принимают экстремальные значения. Это вызвано тем, что если функция в некоторой точке имеет скачок, то в этой точке ее первая производная максимальна по абсолютной величине; если же функция имеет в точке экстремум, то ее первая производная равна нулю, а вторая максимальна. На вычислении второй производной основан *фильтр Лапласа (лапласиан)*. Такой фильтр, по сравнению с фильтром, основанным на вычислении первой производной, осуществляет более резкое подчеркивание мелких деталей на изображении [7, 17].

Статистические фильтры относятся к нелинейным пространственным фильтрам, основанным на порядковых статистиках. В этих фильтрах матрица фильтра не создается. Отклик таких фильтров формируется в результате упорядочения значений в пределах маски фильтра с выбором элемента, находящегося на определенной позиции сформированной последовательности.

Статистические фильтры могут быть применены для подавления случайных шумов на любом изображении с сохранением границ объектов, выделения границ (локальная дисперсия), а также для подчеркивания экстремальных значений (фильтры максимума и минимума).

Для обработки рельефа наибольший интерес представляют медианный фильтр и фильтр, вычисляющий среднеквадратическое отклонение.

Медианный фильтр. При расчете медианного фильтра значения в скользящем окне сортируются в убывающем или возрастающем порядке; при

этом на выходе фильтра будет получено значение, находящееся в середине списка (количество значений должно быть нечетным). В результате этой операции исключаются выбросы, не соответствующие статистике в текущем окне. Таким образом, медианный фильтр позволяет удалить значения, соответствующие максимальному шуму. Такая фильтрация может быть применена для подготовки “зашумленной” ЦМР для дальнейшей обработки.

Необходимо отметить ограничение данного метода. На эффективность медианного фильтра сильно влияет размер окна фильтра, и существует противоречие между устранением шума и защитой деталей изображения: уменьшение окна фильтра приводит к ухудшению фильтрации, но сохраняет детали изображения; больший размер окна эффективно фильтрует шум, но вызывает определенное размытие изображения. Кроме того, если количество выбросов приближается к половине ширины окна, то фильтр может сбиться на выделение шума, а не полезного сигнала.

Для выделения максимальных и минимальных значений в рельефе целесообразней применять не статистические фильтры, а морфометрические, специально предназначенные для выделения гребневых, килевых, выгнутых и вогнутых форм рельефа.

Среднеквадратическое отклонение значений глубины является показателем расчлененности рельефа и характеризует степень рассеяния глубин относительно их средних значений [7, 17].

Частотная фильтрация. Фильтрация ЦМР как двумерного массива может осуществляться в пространственной, а также в частотной области путем его разделения на множество различных пространственно-частотных компонент с применением методов, основанных на *преобразовании Фурье*. При этом пространственное распределение значений массива данных, в виде последовательности значений глубин (высот) строк и столбцов, может быть представлено в частотной области линейной комбинацией синусоидальных функций [7, 17].

Функции с длинными периодами отображают низкочастотные компоненты, которым соответствуют региональные, мезомасштабные структуры. Функции с короткими периодами отображают высокочастотные компоненты, соответствующие локальным формам и более мелким деталям рельефа.

ЦМР являются растровыми данными, поэтому для их обработки применяется специально разработанное для обработки дискретных данных (а к ним относятся и растровые изображения) прямое и обратное двумерное дискретное преобразование Фурье.

Многие из методов как пространственной, так и частотной фильтрации могут применяться при предварительной обработке ЦМР, включающей в себя коррекцию ошибок, удаление артефактов и ошибочных данных в модели поверхности [7, 8, 17].

Морфометрический анализ (геоморфометрические методы), в отличие от методов фильтрации, рассматривающих рельеф исключительно как двумерное распределение значения (глубины) в виде растрового изображения, позволяет анализировать, помимо рельефа, сочетание “рельеф + гравитационное поле”.

Геоморфометрия активно применяется в наземных исследованиях рельефа и почвоведении для анализа геометрических форм, крутизны склонов, расчлененности рельефа, поверхностного стока, изучения и моделирования глобальных гидрологических процессов, механизмов аккумуляции, экспозиции склонов и ряда других параметров. В наземной геоморфометрии используется около двадцати числовых характеристик рельефа, определяемых в каждой точке карты и называемых морфометрическими величинами [16]. Так, в работе [16] представлены рассчитанные для всего земного шара цифровые модели пятнадцати локальных морфометрических показателей: двенадцать “кривизн” земной поверхности (горизонтальная, вертикальная, средняя, гауссова, минимальная, максимальная, аккумуляционная, разностная, кольцевая, избыточная вертикальная, избыточная горизонтальная, несферичность), ротор, крутизна и экспозиция склонов.

Морская морфометрия опирается на опыт наземных исследований, но диапазон практического применения морфометрических методов в морских условиях значительно уже, поскольку не все наземные методы могут быть применены [18] или являются актуальными.

Основные морфометрические параметры рельефа дна — уклон (крутизна), экспозиция склона, “кривизны” поверхности, расчлененность рельефа. Уклон (крутизна) дна и экспозиция склона рассчитываются на основе частных производных первого порядка. Кривизны поверхности рассчитываются на основе частных производных второго порядка.

Крутизна склона (уклон поверхности) — угол наклона в точке пересечения между горизонтальной плоскостью и плоскостью, касательной к земной поверхности — характеризует скорость склоновых процессов, которые определяют перемещение вещества (грунтов, мутьевых потоков) по поверхности дна под действием силы тяжести.

Кривизна в некоторой точке поверхности определяется как кривизна линии, образованной пересечением земной поверхности и плоскости определенной ориентации (что и определяет вид кривизны), которая проходит через заданную

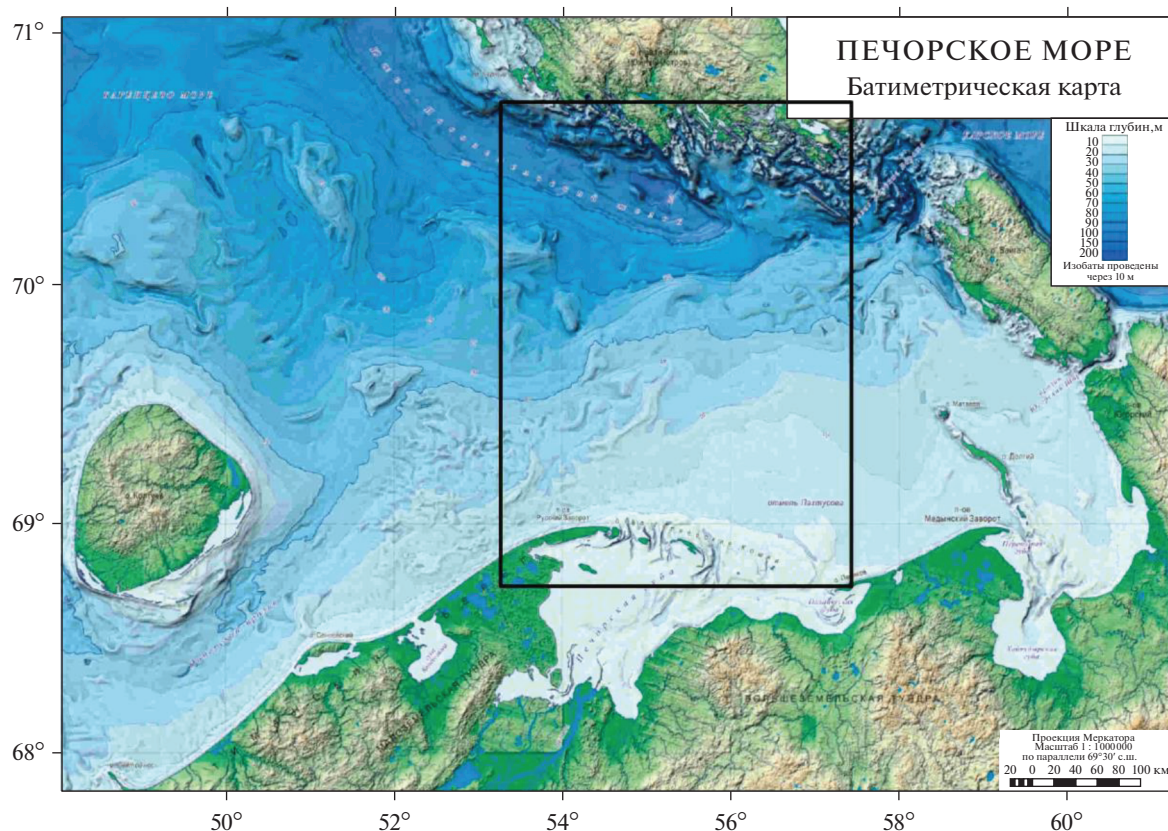


Рис. 2. Батиметрическая карта Печорского моря [6].

точку. Характеристики кривизны поверхности (“кривизны”) описывают выгнутые и вогнутые формы рельефа, гребневые и килевые формы. Чем больше значение кривизны, тем более выгнутой (выпуклой) является поверхность. Вогнутую поверхность характеризует отрицательное значение кривизны.

“Кривизны” поверхности характеризуют механизмы аккумуляции, которые зависят от способности потока сворачивать по мере движения по земной поверхности, скорости стока и процессов транспорта осадочного вещества.

Горизонтальная (плановая) кривизна характеризует меру конвергенции потоков, перемещающихся вдоль поверхности под действием гравитации (описывает первый механизм аккумуляции). Потоки дивергируют на выпуклых участках при положительных значениях кривизны и конвергируют на вогнутых при отрицательных значениях.

Вертикальная (профильная) кривизна характеризует меру относительного замедления потоков, перемещающихся вдоль поверхности под действием гравитации (второй механизм аккумуляции). Потоки ускоряются при положительном значении кривизны на выпуклых участках и замедляются при отрицательном значении кривизны на вогнутых участках.

На рис. 2 показана карта Печорского моря [6], на которой рамкой выделен участок, захватывающий различные глубины и формы рельефа (рис. 3а). Для этого участка при помощи программы Surfer (Golden Software) получены и представлены на рис. 3 некоторые характеристики рельефа дна. Произведена низкочастотная фильтрация, сглаживающая мелкие детали рельефа (рис. 3б). Рассчитаны и построены морфометрические характеристики: уклон поверхности (рис. 3в) и выпуклые и гребневые формы рельефа, полученные по данным профильной кривизны (рис. 3г).

Методы классификации. К таким можно отнести достаточно широкий диапазон методов, позволяющих проводить разделение, систематизацию и классификацию данных по некоторому признаку. В большинстве случаев они используются после применения какого-то из методов фильтрации и работают со специально подготовленными данными.

Кластерный анализ в геологии и геоморфологии позволяет выделять устойчивые сочетания параметров, незаметных при визуальном анализе карт. Различные формы рельефа и области распространения различных его видов могут быть разделены с использованием кластеризации в пространстве некоторых признаков. Кластериза-

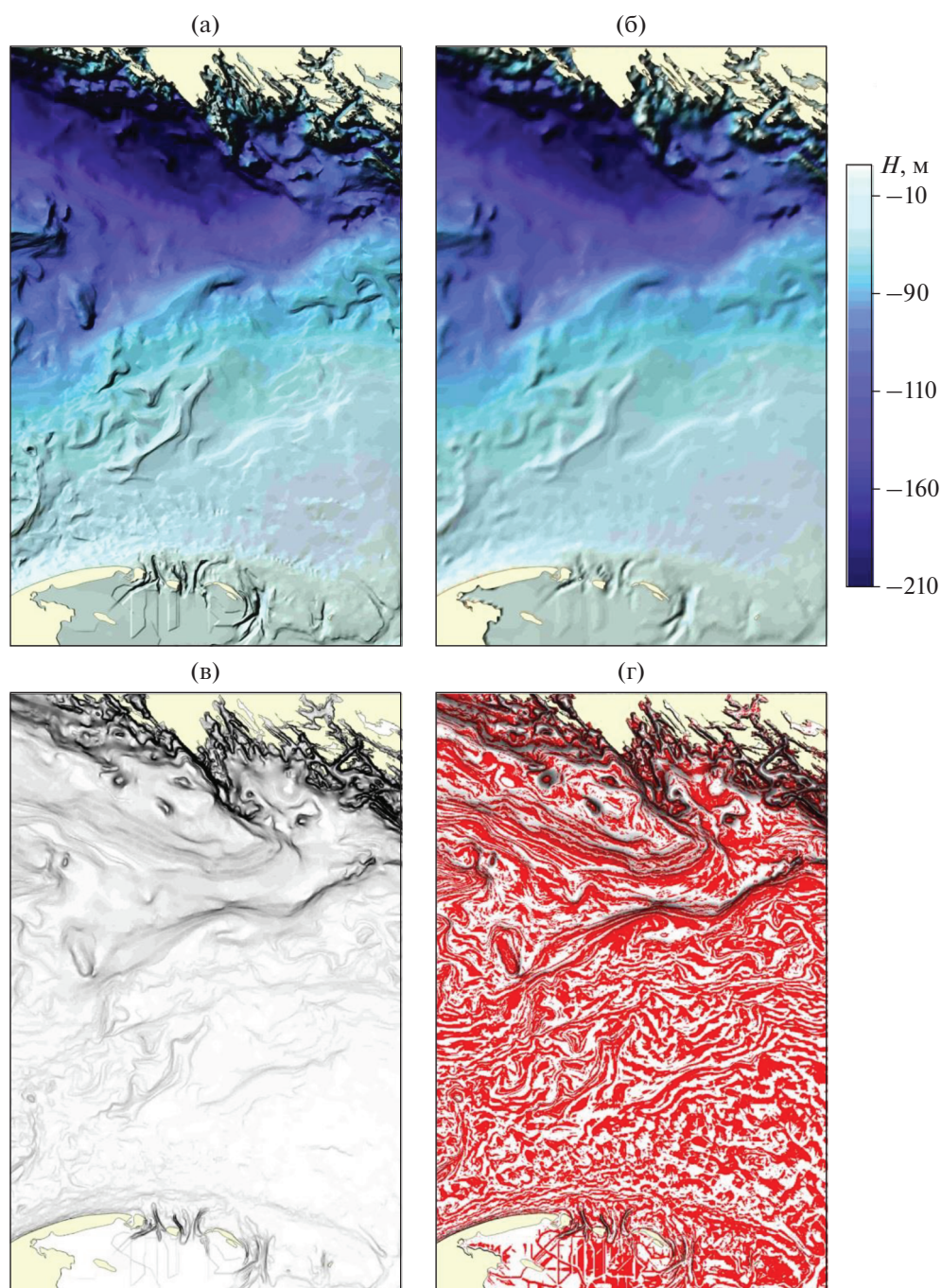


Рис. 3. Примеры обработки ЦМР дна при помощи программы Surfer (Golden Software): (а) фрагмент батиметрической карты Печорского моря, (б) фрагмент батиметрической карты Печорского моря после низкочастотной фильтрации, (в) уклон поверхности дна (большим углом соответствует более темный оттенок), (г) выпуклые и гребневые формы рельефа, полученные по данным профильной кривизны (в цветном варианте показаны красным цветом).

ция в условиях компьютерной обработки может рассматриваться как один из подходов к машинному обучению без учителя, т.е. без априорного знания о соотношении классов объектов и их индикаторов [15]. Применение кластерного анализа геолого-геофизических параметров в арктическом регионе, где рельеф дна рассматривается как один из главных параметров, описывающих

кровлю земной коры и аккумулирующих влияние многих геолого-геофизических процессов, представлено в работе [13].

Спектральные методы используются для выделения низко- и высокочастотных компонент рельефа при изучении закономерностей его строения. Спектр несет информацию о распределе-

нии энергии в сигнале между его периодическими составляющими. Применительно к рельефу можно оценить преобладающие формы некоторого участка земной поверхности. Выделяемые периоды (размеры) могут быть связаны с соответствующими процессами образования рельефа. Такие методы не имеют массового применения и являются экспериментальными авторским разработками или адаптациями методик спектрального анализа сигналов.

Авторами [12] была разработана методика применения спектрального анализа (метод двумерного преобразования Фурье) глубоководного рельефа рифтовой зоны Срединно-Атлантического хребта для прогнозных исследований локализации глубоководных полиметаллических сульфидов. Это позволило количественно оценить гармонические составляющие рельефа поверхности дна и определить их как поисковые признаки месторождения сульфидов.

Помимо преобразования Фурье, в котором функции разложения заданы изначально как набор синусоидальных функций, используются методы на основе анализа сингулярных спектров. В работе [3] авторами для разложения топографической поверхности на компоненты континентального, регионального и локального масштабов впервые был применен двумерный анализ сингулярного спектра (2D-SSA). SSA (Singular Spectrum Analysis) возник как метод для анализа временных рядов: их разложения на составляющие (тренд, периодические компоненты и шум), выявления скрытых периодичностей, сглаживания, подавления шума, прогноза и др. 2D-SSA был разработан специально для обработки двумерных полей. В результате применения 2D-SSA исходное поле разлагалось на сумму компонент гладкой поверхности, периодических составляющих и шума. Применение данной методики позволило авторам [3] построить ряд карт, выделяющих компоненты рельефа различного уровня: от региональных тектонических структур до высокочастотных составляющих топографической поверхности, которые могут отражать результат действия локальных экзогенных рельефообразующих процессов.

Другой вариант применения метода двумерного сингулярного спектрального анализа показан в работе [5] для залива Петра Великого Японского моря. Применение данного метода позволило авторам по результатам расчетов выполнить разделение поверхности рельефа шельфа на компоненты, соответствующие региональным тектоническим структурам, зонам вторичной складчатости и локальным формам, возникшим при осадконакоплении.

Искусственный интеллект. Разработка интеллектуальных систем становится практической за-

дачей во многих сферах деятельности. Искусственный интеллект к настоящему времени является достаточно разветвленной наукой и продолжает развиваться. Одной из базовых задач искусственного интеллекта является задача распознавания, что находит все более широкое применение в обработке геофизических данных, в геологоразведке, в геоинформационных системах [2 и др.]. Перспективно применение методов этой области и при анализе рельефа, являющегося базовым слоем любых ГИС.

Программные средства обработки ЦМР могут быть представлены авторскими разработками под решение конкретной задачи, стандартными пакетами обработки данных, сочетанием двух предыдущих вариантов.

В состав многих ГИС входят или подключаются дополнительно модули, позволяющие выполнять различные виды обработки данных и основные функции морфометрического анализа. Также в ГИС-системах предусмотрено подключать дополнительные авторские модули.

Наиболее “мощным” в настоящее время признается профессиональное ГИС-приложение от компании Esri – ArcGis Pro. Для анализа рельефа в этой ГИС применяется дополнительный модуль ArcGIS Spatial Analys. Программный модуль предназначен для работы с растровыми поверхностями. Он позволяет анализировать характеристики поверхности, а также интерполировать пространственно-распределенные данные для визуализации и анализа процессов.

Стоит отметить программу Surfer Golden Software, в составе которой, помимо различных вариантов расчета GDID-матриц и визуализации пространственно-распределенных данных, имеются 64 фильтра обработки, блок морфометрического анализа, расчета градиентов, сплайнов и других операций, систематизированных по направлениям.

Существенными возможностями в обработке, в том числе и растровых данных, обладают ГИС с открытым исходным кодом (свободно распространяемые): System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA), Geographic Resources Analysis Support System (GRASS), Quantum GIS (QGIS).

ГИС SAGA специально создавалась для реализации геонаучных методов. В набор SAGA входят: модули интерполяции, фильтрации, геостатистики, распознавания образов, анализа и преобразований данных, геоморфометрии рельефа, визуализации, кластерный анализ. Кроме того, можно расширять возможности программы, добавляя собственные модули или полностью модернизируя код программы на языке C++. Все модули сгруппированы в библиотеки.

ГИС GRASS включает инструменты для пространственного моделирования, визуализации растровых и векторных данных, анализа гео-

информации, а также обработки спутниковых фотографий и аэрофотоснимков, работает со всеми современными системами управления базами данных (СУБД). ГИС GRASS является модульной системой, предоставляющей доступ к более чем 300 модулям для работы с двумерными и трехмерными растровыми и векторными данными.

QGIS – свободная активно развивающаяся кроссплатформенная (работает в Unix/Linux, Windows и Mac OS) ГИС. Предоставляет инструменты анализа, выборки, геопроецирования, управления геометрией и базами данных. QGIS позволяет использовать интегрированные инструменты GRASS. ГИС обладает расширяемой архитектурой модулей, предоставляет библиотеки, которые могут использоваться для создания дополнительных модулей, предусматривает создание расширений на языках C++ или Python.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Быстрое развитие систем получения (многолучевое эхолотирование), сбора, хранения и обработки пространственных данных (ГИС) позволяет получать разноплановую информацию о строении подводного рельефа. Также ускоряющиеся развитие информационных технологий, включающих как аппаратно-вычислительные возможности, так и программно-математические средства, приводит к быстрому росту и разнообразию возможностей обработки и анализа натуральных данных. Не является исключением и рельеф, в том числе подводный.

Существующие методы и программные средства, направленные на проведение пространственной обработки данных, в частности, морфометрического анализа, позволяют получать широкий диапазон характеристик рельефа, что широко используется в наземных исследованиях при изучении, например, ландшафтов. В морских исследованиях цифровые методы для анализа батиметрических данных пока не так распространены, но в настоящее время все чаще находят применение для характеристики морского дна в широком диапазоне глубин.

Источники финансирования. Работа выполнена по государственному заказу № 0128-2021-0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авдеев А.И., Белокопытов В.Н.* Морфометрические характеристики и расчлененность рельефа дна северной части Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2011. № 4. С. 43–63.
2. *Глотов А.А.* Интеллектуализация геоинформационных систем: подходы и направления // *Геоматика*. 2015. № 4. С. 18–24.
3. *Голяндина Н.Э., Усевич К.Д., Флоринский И.В.* Анализ сингулярного спектра для фильтрации цифровых моделей рельефа // *Картография*. 2008. № 5. С. 21–28.
4. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений – М.: Техносфера, 2012. 1072 с.
5. *Коротченко Р.А., Самченко А.Н., Ярошук И.О.* Пространственно-временной анализ геоморфологии дна залива Петра Великого (Японское море) // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 4. С. 538–545.
6. *Кошель С., Кошель А., Ушакова Л.* Картографирование рельефа дна северных морей России с использованием цифровых моделей // *Интер-Карто/ИнтерГИС-20: Устойчивое развитие территорий: картографо-геоинформационное обеспечение. Материалы международной конференции. 23 июля–8 августа 2014 г.* – Издательство “Константа” Белгород, 2014. С. 417–423.
7. *Лурье И.К., Косиков А.Г.* Теория и практика цифровой обработки изображений / *Дистанционное зондирование и географические информационные системы*. Под ред. А.М. Берлянта. – М.: Научный мир, 2003. 168 с.
8. *Никитин А.А., Петров А.В.* Теоретические основы обработки геофизической информации. – М.: РГГУ, 2008. 112 с.
9. *Никифоров С.Л., Кошель С.М., Фроль В.В.* Цифровая модель рельефа дна Белого моря // *Вестник Московского университета. Сер. 5. География*. 2012. № 3. С. 86–92.
10. *Никифоров С.Л., Кошель С.М., Фроль В.В. и др.* О методах построения цифровых моделей рельефа дна (на примере Белого моря) // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 2. С. 326–336.
11. *Сергеев И.С., Егоров И.В.* Геоинформационный анализ в морских геоморфологических исследованиях (на примере беломорского шельфа) // *Известия РГО*. 2014. Т. 146. Вып. 5. С. 28–38.
12. *Сергеев И.С., Егоров И.В., Глебова А.Б.* Спектральный анализ рельефа для решения прогнозно-поисковых задач на примере рифтовой зоны Срединно-Атлантического хребта // *Геоморфология*. 2020. № 4. С. 34–44.
13. *Соколов С.Ю., Мазарович А.О.* Кластерный анализ геолого-геофизических параметров в арктическом регионе как основа для геодинамической интерпретации // *Геодинамика и тектонофизика*. 2016. Т. 7. № 1. С. 59–83.
14. *Флоринский И.В.* Морфометрические карты мира // *Геодезия и картография*. 2008. № 1. С. 24–27.
15. *Харченко С.В.* Новые задачи морфометрии рельефа и автоматизированные морфологические классификации в геоморфологии // *Геоморфология*. 2020. № 1. С. 3–21.
16. *Шарый П.А.* Геоморфометрия в науках о Земле и экологии: обзор методов и приложений // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2006. Т. 8. № 2. С. 458–473.
17. *Шовенгердт Р.А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
18. *Lecours V., Dolan M.F.J., Micallef A., Lucieer V.L.* A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2016. V. 20. № 8. P. 3207–3244.

Methods of Processing and Analyzing Digital Elevation Models of Bottom

N. V. Libina[#]

Shirshov Institute of oceanology Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[#]*e-mail: lnatvit@mail.ru*

Methods of spatial mathematical processing of digital models of the bottom relief (DEM) allow us to obtain a wide range of characteristics of the bottom surface. The results of DEM processing can have both independent practical application and act as parameters for systematization, typing and zoning of the seabed, and perform intermediate or preparatory calculations for subsequent operations with the converted file, depending on the task being solved. In this paper, we propose one of the possible options for classifying the methods of processing the bottom DEM, and examples of the application of some methods are given.

Keywords: digital elevation models, seabed morphology, filter, frequency