

МОНИТОРИНГОВЫЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И
ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
MONITORING, EXPERIMENTAL AND EXPEDITIONARY RESEARCH

УДК 551.46

DOI: 10.34753/HS.2021.3.2.155

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТ-
АНАЛИЗА В ИЗУЧЕНИИ
РЕЛЬЕФА ДНА ЗАЛИВА ПЕТРА
ВЕЛИКОГО ЯПОНСКОГО МОРЯ**

**USE OF WAVELET ANALYSIS IN
THE STUDY OF THE BOTTOM
RELIEF OF THE PETER THE
GREAT BAY OF THE SEA OF
JAPAN**

А.Н. Самченко, И.О. Ярощук
*Тихоокеанский океанологический институт
имени В.И.Ильичева ДВО РАН,
г. Владивосток, Россия
samchenco@poi.dvo.ru*

Aleksandr N. Samchenko, Igor O. Yaroshchuk
*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB
RAS, Vladivostok, Russia
samchenco@poi.dvo.ru*

Аннотация. В работе приводится пример применения вейвлет-анализа к рельефу дна залива Петра Великого Японского моря и свала глубин. Микро- и мезорельеф дна формируются современными гидродинамическими процессами. Таким образом, изучение различных форм рельефа и их положение может показать, где наиболее выражена динамика внутренних гравитационных волн. Создана цифровая модель рельефа залива, свала глубин и прилегающей суши. Цифровая модель рельефа дна и суши базируется на доступных глобальных базах данных GEBKO и ASTER, а также данных батиметрических измерений, полученных с помощью эхолота судна. Рассматривается подготовка батиметрических данных дна залива для дальнейшего применения математических методов. На первом этапе создания цифровой модели рельефа использовалась интерполяция с помощью регрессии на основе гауссовских процессов. Далее проводилось сглаживание за счет линейной интерполяции и увеличение размера ячейки цифровой модели рельефа. За счет закругления модели уменьшилась погрешность измерений. На основе вейвлет-анализа и метода естественных ортогональных функций были выделены и оконтурены различные группы форм рельефа по их высотным характеристикам. Были определены осадочные

Abstract. The paper provides an example of the application of wavelet analysis to the bottom topography of the Peter the Great Bay of the Sea of Japan and the depth slope. The bottom micro- and mesorelief is formed by hydrodynamic processes. Thus, the study of various landforms and their position can show where the dynamics of internal gravity waves is most pronounced. A digital model of the relief of the bay, depth dump and adjacent land has been created. The digital model of the seabed and land elevation is based on the available global databases GEBKO and ASTER, as well as bathymetric measurements obtained using the ship's echo sounder. The preparation of bathymetric data on the bottom of the bay for further application of mathematical methods is considered. Interpolation with regression of Gaussian processes was used at the first stage of creating a digital elevation model. Further, smoothing was carried out due to linear interpolation and an increase in the cell size of the digital elevation model. Due to the coarsening of the model, the measurement error has decreased. On the basis of wavelet analysis and the method of natural orthogonal functions, various groups of landforms were identified and contoured according to their height characteristics. Sedimentary waves were identified in the bay. The height of sedimentary waves does not exceed 8 m, and the distances between the peaks vary within 1 km. The structural

волны в заливе. Высота осадочных волн не превышает 8 м, а расстояния между вершинами колеблются в пределах 1 км. Выделены структурные параметры рельефа дна для каждого профиля вейвлет-анализа. Наблюдаются различия в облике вейвлет-картин для разного вида осадочных волн. Так, для небольших осадочных волн, высотой до 2 м, они равномерно распределены по профилю, имея ровные «вилочки» – раздвоения. Осадочные волны высотой более 2 м сгруппированы в центральной части залива и в вейвлет-анализе также выделяются локальными раздвоениями, но с большей размерностью.

Ключевые слова: рельеф; батиметрия; вейвлет-анализ; приливные волны; внутренние гравитационные волны; залив Петра Великого.

Введение

Данные о рельефе Земли принято рассматривать как географические координаты и высотные характеристики места. Для математической обработки рельеф считают цифровым сигналом. В целом к изучению рельефа уже на протяжении многих лет применяются различные методы цифровой обработки, например в работах [Девдариани, 1967; Черников, Либина, 2011; Falorni et al., 2005; Florinsky, 2017]. Большое количество работ посвящено изучению рельефа дна морей и океанов, например [Xu, Moore, Gallant, 1993; Turcotte, 1997; Lecours et al., 2016; Hughes Clarke, 2018]. Так, в работе [Lecours et al., 2016] проведен обзор последних исследований в области морской геоморфометрии. В работе [Xu, Moore, Gallant, 1993] использовался фрактальный и вейвлет-анализ при изучении геоморфометрии. Стоит отметить, что вейвлет-анализ изначально использовался при обработке различных сигналов, например в электронике, геофизике, обработке изображений. В геоморфометрии вейвлет-анализ начали применять для прогнозирования больших объектов на основе небольших изученных участков и создания отличительных характеристик для различных структур рельефа. Так, в работах [Turcotte, 1997;

parameters of the bottom topography for each profile of the wavelet analysis are identified. Differences are observed in the shape of the wavelet patterns for different types of sedimentary waves. So, for small sedimentary waves (up to 2 m high) are evenly distributed along the profile and they are having even bifurcations. Sedimentary waves with a height of more than 2 m are grouped in the central part of the bay and in the wavelet analysis they are also distinguished by local bifurcations, but with a higher dimension.

Keywords: relief; bathymetry; wavelet analysis; tidal waves; internal gravity waves; Peter the Great Bay.

Ярмоленко, Скобенко, 2018] рассмотрено применение вейвлет-анализа к рельефу Земли при сжатии и фильтрации геоинформации. Разработка вейвлет-анализа началась еще в начале XX века, а уже в 1980-х годах появились дискретные вейвлеты непрерывного вейвлет-преобразования [Lecours et al., 2016]. С развитием цифровой техники и увеличением вычислительных мощностей появилась возможность использовать все более сложные алгоритмы [Florinsky et al., 2000]. В предыдущих работах авторов статьи применялся вейвлет-анализ и метод естественных ортогональных функций (далее – ЕОФ) к исследованию рельефа участка дна залива Петра Великого Японского моря общей площадью 400 км² [Коротченко, Самченко, Ярошук, 2011; Коротченко, Самченко, Ярошук, 2013]. В работе [Коротченко, Самченко, Ярошук, 2014] метод ЕОФ использовался для изучения рельефа залива Петра Великого и далее метод уже был расширен до всего Южного Приморья [Самченко, 2019]. В данной работе расширена география применения метода вейвлет-анализа, рассматривается рельеф дна залива Петра Великого и свала глубин. Основная задача данной статьи заключалась в изучении и описания различных форм рельефа и последующее формирование цифровой модели рельефа (далее – ЦМР), для проведения

экспериментальных и теоретических исследований распространения акустических сигналов в заливе Петра Великого.

Формирование осадочных волн (далее – ОВ) на шельфе связано с деятельностью турбидитных потоков, вызванных придонными течениями [Левченко и др., 2008; Долгих и др., 2015]. Зона обрушения нелинейных внутренних гравитационных волн (далее – ВГВ) является реальным источником таких потоков. В то же время формирование ВГВ происходит за счет разрушения натекающей приливной волны на сужающемся шельфе, где кроме прочего играет большую роль свал глубин. ОВ в заливе Петра Великого прослеживаются на глубинах 40–100 м в центральной его части.

Материалы и методы

Исходный материал для разработки ЦМР залива Петра Великого был получен из различных международных баз данных. Существует значительное различие между данными о рельефе дна моря и суши. ЦМР суши рассчитывается на основе спутниковых измерений. За счет многократных измерений данные о рельефе корректируются и обновляются для общего доступа на различных электронных ресурсах. Например, существует доступный электронный ресурс ASTER GDEM¹, разработанный совместно Министерством экономики, торговли и промышленности Японии (далее – METI) и Национальным агентством по авиации и космонавтике США (далее – NASA). Сенсор

ASTER был создан METI и запущен на борту спутника NASA Terra в декабре 1999 года. Сенсор имеет возможность стереоскопической съемки вдоль полосы пролета с помощью двух телескопов, снимающих в надир и назад в ближнем инфракрасном диапазоне с отношением база-высота = 0,6. Пространственное разрешение в плане – 15 м. ASTER GDEM распространяется в формате GeoTIFF в географической системе координат (широта/долгота) (WGS84) и разрешением 1 угловая секунда (примерно 30 м). Оценка точности глобального продукта: 20 м для данных по вертикали и 30 м – по горизонтали. В работе использовалась цифровая база данных батиметрии Генеральной батиметрической карты океанов GEBKO 08², которая имеет усреднение с ячейкой 15 сек (примерно 460×337 м для широты залива Петра Великого). Рельеф дна океана получен на основе спутниковых гравиметрических данных и многочисленных батиметрических измерений. При этом батиметрические данные крайне неравномерно распределены по мировому океану. Атлас GEBKO представляет собой ЦМР. Однако точности ЦМР не достаточно для исследования мезо- и микрорельефа залива Петра Великого. Проблему исследования мезо- и микрорельефа дна залива Петра Великого удалось решить с помощью совмещения натуральных данных с эхолота судна, оцифровывания батиметрических карт и доступных электронных баз данных. Рельеф залива Петра Великого представлен на рисунке 1.

¹ASTER Global Digital Elevation Map [Электронный ресурс]. URL: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>. Дата обращения: 16.06.2021.

²GEBKO Gridded Bathymetry Data [Электронный ресурс]. URL: http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data. Дата обращения: 16.06.2021.

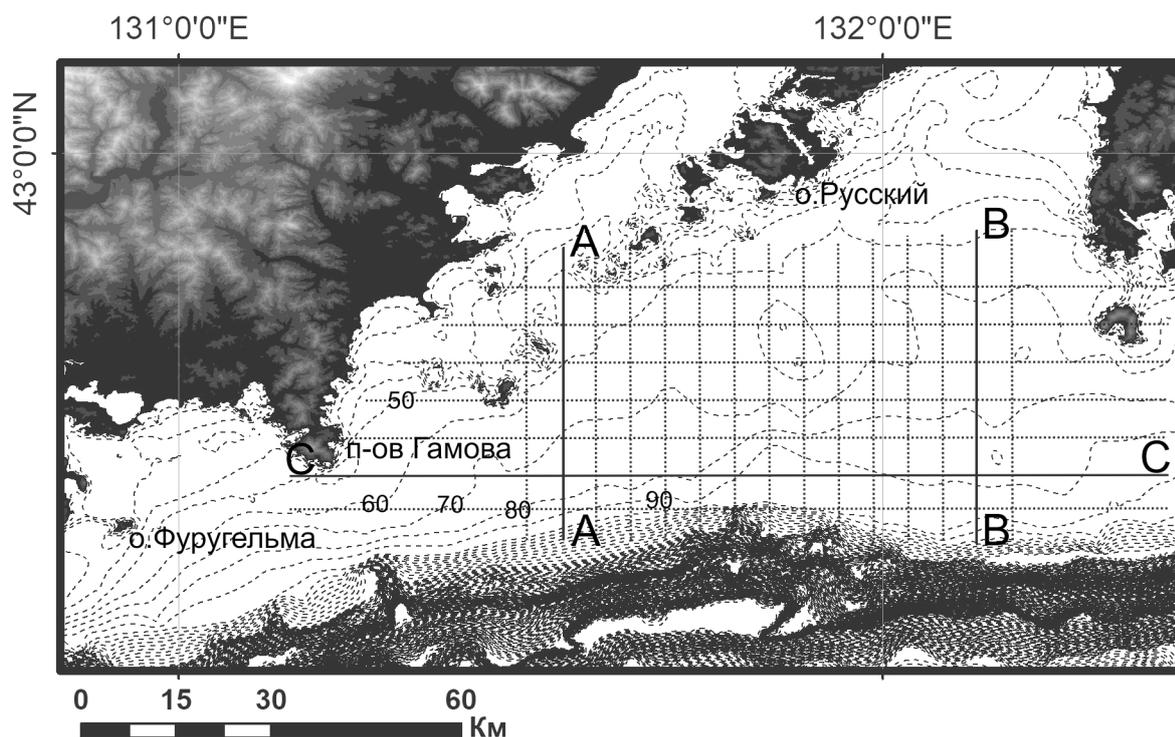


Рисунок 1. Рельеф залива Петра Великого.

Показаны профили на которых был проведен вейвлет-анализ.

Figure 1. The relief of the Peter the Great Gulf.

The profiles on which the wavelet analysis was performed are shown.

Используя разнородные батиметрические данные, которые имеют собственную погрешность, в связи с чем возникают проблемы с сопоставлением в одних координатах различных параметров глубины места. Таким образом, использовать линейную интерполяцию батиметрии некорректно при цифровом восстановлении (моделировании) рельефа дна. В данной работе использовалось на первом этапе интерполяция с помощью регрессии на основе гауссовских процессов [Бурнаев, Панов, Зайцев, 2015]. Интерполированные батиметрические данные моделируются стохастическим случайным процессом, где подбирается набор случайных величин, которые имеют многомерное нормальное распределение. Максимальная детализация интерполяции на данном этапе составила 56×56 м по заливу Петра Великого. Далее проводилось сглаживание за счет линейной интерполяции с ячейкой 150×150 м модели рельефа, полученной на первом этапе. Уменьшение разрешения необходимо для дальнейшего математического анализа рельефа

дна. Конечно, при использовании различных математических методов при создании ЦМР любого участка рельефа существует определенная погрешность, а также могут появляться различные «вредные» выбросы (артефакты). Погрешность измерений мы уменьшали за счет закругления ЦМР. Различные артефакты чаще всего образуются в ЦМР дна залива при пересечении ноля (береговой черты) и выходе на рельеф суши, а также на краях построенной карты. Методом вейвлет-анализа данные участки ЦМР залива затронуты не были.

В работах [Коротченко, Самченко, Ярошук, 2011; Коротченко, Самченко, Ярошук, 2013], достаточно подробно описана методика и результаты применения двумерного метода ЕОФ для участка залива Петра Великого в 400 км^2 . Небольшой территориальный охват дал возможность рассмотреть микрорельеф дна участка с высотными характеристиками менее 1 м. Были выделены волнообразные формы рельефа высотой до 2 м, простирающиеся вдоль параллелей на расстояниях 1–2 км друг от друга.

Более крупные формы рельефа на участке представлены ОВ с высотами до 8 м и прибойным валом высотой до 10 м. ОВ огибают весь изученный участок от острова Фуругельма до мыса Гамова в виде дуг, расстояния между вершинами ОВ в районе мыса Гамова составляет 500–700 м (рисунок 1). Применительно ко всему заливу Петра Великого методом ЕОФ выделить формы рельефа с высотными характеристиками менее 2 м не представилось возможным из-за выбранной детализации. Ранее выделенные на участке залива ОВ прослеживаются во всей западной части залива Петра Великого от острова Фуругельма до мыса Гамова и далее до середины залива на глубинах 50–100 м. ОВ вблизи острова Фуругельма высотой до 7 м с расстояниями между вершинами до 1 000 м, всего насчитывается до 3 холмов. К мысу Гамова интенсивность и число волн увеличивается до 7. Далее ОВ «разбегаются», то есть расстояния между вершинами увеличивается до 600–900 м, их количество достигает 13 холмов и в восточной части залива данные формы рельефа выглаживаются. Более крупные формы рельефа, выделенные методом ЕОФ, связаны с прогибами внутренних заливов Амурского, Уссурийского и подъемом в виде полуострова Муравьева Амурского и гряды островов. Также выделяется каньон Гамова, где глубина достигает 800 м, ширина каньона 3 000 м. Каньон расположен напротив полуострова Гамова (рисунок 1). Генеральный уклон связан со свалом глубин, где проходит кромка шельфа с падением глубины на 2 500 м на расстоянии в 8–10 км.

Вейвлет-анализ

Обычно основной задачей для вейвлет-анализа рассматривалась обработка временных рядов, например в сейсмоакустике. В настоящее время цифровой анализ сигналов, основанный на вейвлет-преобразовании, применяется в задачах распознавания образов и сжатия видеоизображений, при обработке и

синтезе различных сигналов. Вейвлет-преобразование не просто разделяет исследуемый объект на части, а выделяет из него компоненты разных масштабов и каждый компонент анализируется с той степенью детальности, которая соответствует его масштабу [Дремин, Иванов, Нечитайло, 2001]. В работе [Астафьев, 1996] детально рассмотрен вейвлет-анализ и его применение. В данной работе использовался комплексный вейвлет, реализованный в пакете MATLAB. При использовании комплексного анализирующего вейвлета в результате вейвлет-преобразования получаются двумерные массивы значений модуля коэффициентов и фазы в общем виде:

$$W(a, b) = |W(a, b)| \exp[i\Phi(a, b)] \quad (1),$$

где a – масштабный коэффициент,
 b – параметр сдвига.

В отличие от классического использования коэффициентов как масштаб времени и время, у нас применяются расстояние и отрезки. В нашем случае использовался вейвлет Морле:

$$W(a, b) = \cos(5(a, b)) \cdot \exp \frac{-(a, b)^2}{2} \quad (2).$$

Необходимо отметить, что коэффициенты вейвлет-преобразования a , b содержат комбинированную информацию об анализируемом сигнале.

В пакете MATLAB вейвлет-анализ используется функция

$$cwt(x, y, \dots, 'morl', 'plot'),$$

где x – входной сигнал,
 y – масштаб вейвлета,
'morl' – вид вейвлет-функций,
'plot' – функция графического вида решения.

Также можно использовать период дискретизации для входных частот, непрерывное вейвлет-преобразование входного сигнала для заданных масштабов и вейвлет.

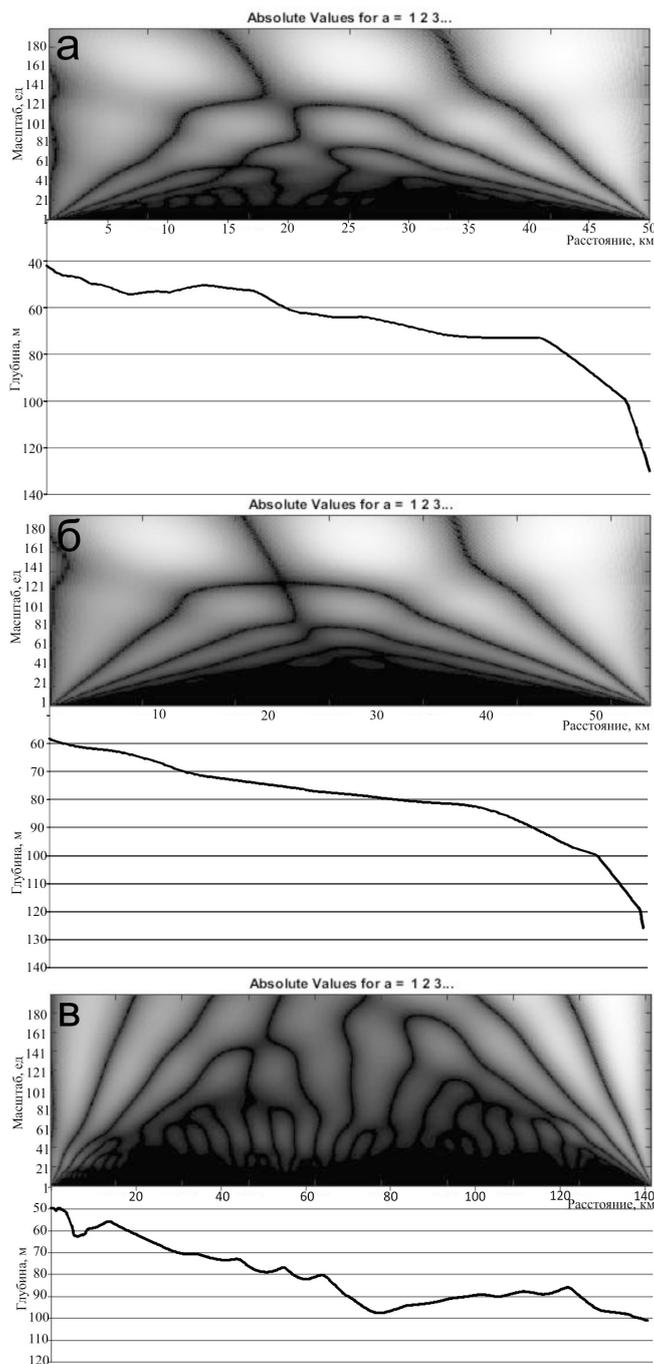


Рисунок 2. Результаты вейвлет-анализа профилей и батиметрические профили, показанные на рисунке 1: а) – профиль AA, б) – профиль BB, в) – профиль CC.

Figure 2. The results of wavelet analysis of profiles (up) and bathymetric profiles (down) (Figure 1): а) – AA profile, б) – BB profile, в) – CC profile.

Обсуждение результатов

В заливе Петра Великого был проведен вейвлет-анализ ряда профилей широтного и долготного направлений (рисунок 1). Далее будем использовать три профиля, указанные на рисунке 1. На рисунке 2 представлены результаты

вейвлет-анализа трех профилей и их батиметрия. Общая протяженность профилей составила более 255 км. Два батиметрических профиля AA и BB ориентированы с севера на юг, а профиль CC перпендикулярен первым двум и пересекает их на глубинах 80–90 м. Видно, что батиметрические профили AA и BB (рисунки 2а, 2б) достаточно

гладкие и монотонные. Профиль СС изрезанный и не монотонный. Вейвлет-анализ показывает, что профили АА и ВВ имеют три основных генеральных максимума вейвлет-коэффициентов. Максимумы связаны с характерными изменениями в рельефе дна. Первый максимум обусловлен наклоном поверхности, прослеживаемом на первых 10–15 км батиметрического профиля. Участок профиля с достаточно ровным положением поверхности (с небольшим уклоном) приурочен ко второму максимуму, а третий максимум связан с сильным уклоном на последнем участке в 10–15 км профиля. Профиль АА отличается большим количеством локальных максимумов по сравнению с профилем ВВ. Такое распределение локальных максимумов связано с ОВ. По данным ЕОФ анализа на данном участке залива, где построен батиметрический профиль АА, ОВ ослабляются. Число ОВ уменьшается, а высота холмов не превышает 5 м.

В восточной части залива Петра Великого ОВ отсутствуют, что заметно на гладком профиле ВВ (рисунок 2б). В вейвлет-анализе профиля СС (рисунок 2в) отмечается появление в распределении коэффициентов характерных «вилочек», где происходит раздвоение локальных максимумов. Такое распределение локальных максимумов в картине вейвлет-коэффициентов говорит о самоподобии некоторых участков батиметрического профиля. Таким образом, отмечается некоторая периодичность сигнала. Ранее на участке залива площадью 400 км² был проведен вейвлет-анализ ряда батиметрических профилей [Коротченко, Самченко, Ярошук, 2011]. Результаты изучения профиля СС и полученные в работе [Коротченко, Самченко, Ярошук, 2011] с помощью вейвлет-анализа имеют высокую схожесть. В этой же работе получены раздвоения локальных максимумов вейвлет-анализа на профилях, что соответствовало квазипериодичности сигнала. Волнообразные формы рельефа с высотами менее 2 м внесли основной вклад при вейвлет-анализе профиля. Однако различие между ранее исследованным батиметрическим профилем дна залива и профилем СС состоит в высоте ОВ и частоте их

проявлений. Основной вклад в картину локальных максимумов вейвлет-анализа профиля дна СС внесли ОВ с высотами до 8 м. Выделяется две группы ОВ по три холма на глубинах 100–120 м в центральной части залива и в южной части залива на глубинах 40–60 м. Расстояния между гребнями холмов порядка 900 м. На рисунке 2в каждая группа ОВ в вейвлет-преобразовании объединяется общей «вилочкой» с протяженностью до 30 км каждая.

Выводы

В настоящей работе создана ЦМР дна залива Петра Великого. На основании этой модели проведен математический анализ рельефа, который позволил установить, что ОВ простираются преимущественно в направлении север – юг в южной части залива и поворачивают по направлению запад – восток (перпендикулярно изобатам). Как было установлено авторами, в данном регионе основным фактором формирования ОВ являются приливные ВГВ [Догих и др., 2015]. Таким образом, основное направление движения возмущающих факторов в водной толще происходит нормально к изобатам. Кроме того, ВГВ со схожей динамикой и интенсивностью наблюдаются в центральной части залива на глубинах 100–120 м и в южной части залива на глубинах 40–60 м.

Наблюдаются различия в облике вейвлет-картин для разного вида ОВ. Так, для небольших ОВ высотой до 2 м они равномерно распределены по профилю, имея ровные «вилочки» – раздвоения. Тогда как для ОВ более 2 м высоты наблюдается группирование их с формированием интенсивных нелинейных ВГВ при разрушении приливных волн, натекающих на сужающийся шельф.

Применение современных математических методов обработки батиметрических данных позволяет оконтуривать различные формы рельефа, разделять их на группы и проводить статистический анализ как отдельно по группам, так и общий. Кроме того, результаты изучения характеристик рельефа дна с помощью применения математического аппарата можно использовать в решении задач гидродинамики и

гидроакустики на шельфе. Возможен подбор акустических трасс с заданными характеристиками с помощью вейвлет-коэффициентов профилей ЦМР. В заключении стоит еще отметить, что ЦМР залива является важнейшим элементом в создании геоакустической модели дна [Самченко, Ярошук, 2017].

Литература

Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и применение // Успехи физических наук. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170. DOI: [10.3367/UFNr.0166.199611a.1145](https://doi.org/10.3367/UFNr.0166.199611a.1145).

Бурнаев Е.В., Панов М.Е., Зайцев А.А. Регрессия на основе нестационарных гауссовских процессов с байесовской регуляризацией // Информационные процессы. 2015. Т.15. № 3. С. 298–313.

Девдариани А.С. Математический анализ в геоморфологии / под ред. В.В. Лонгинова. М.: Недра, 1967. 156 с.

Долгих Г.И., Новотрясов В.В., Самченко А.Н., Ярошук И.О. Об одном механизме образования осадочных волн на шельфе Японского моря // Доклады академии наук. 2015. Т. 465. № 5. С. 593–597. DOI: [10.7868/S0869565215350169](https://doi.org/10.7868/S0869565215350169).

Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук. 2001. Т.171. № 5. С.465–501. DOI: [10.3367/UFNr.0171.200105a.0465](https://doi.org/10.3367/UFNr.0171.200105a.0465).

Коротченко Р.А., Самченко А.Н., Ярошук И.О. Применение многомерного ЕОФ-анализа в геоинформатике // Цифровая обработка сигналов. 2013. № 3. С. 17–20.

Коротченко Р.А., Самченко А.Н., Ярошук И.О. Применение статистических методов в изучении рельефа шельфовой зоны на примере залива Посьета (Японское море) // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2011. № 6 (160). С. 54–59.

Коротченко Р.А., Самченко А.Н., Ярошук И.О. Пространственно-временной анализ геоморфологии океанического дна залива Петра Великого (Японское море) // Океанология. 2014.

Работа выполнена по госзаданию № АААА-А20-120021990003-3 «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана».

References

Astaf'eva N.M. Wavelet analysis: basic theory and some applications. *Physics-Uspexhi (Advances in Physical Sciences)*, 1996, vol. 39, iss. 11, pp. 1085–1108. DOI: [10.1070/PU1996v039n11ABEH000177](https://doi.org/10.1070/PU1996v039n11ABEH000177) (In Russ. ed.: Astaf'eva N.M. Veivlet-analiz: osnovy teorii i primeneniye. *Uspexhi fizicheskikh nauk*, 1996, vol. 166, iss. 11, pp. 1145–1170. DOI: [10.3367/UFNr.0166.199611a.1145](https://doi.org/10.3367/UFNr.0166.199611a.1145)).

Burnaev E.V., Panov M.E., Zaytsev A.A. Regressiya na osnove nestatsionarnykh gaussovskikh protsessov s baiesovskoi regularizatsiei [Regression Based on Nonstationary Gaussian Processes with Bayesian Regularization]. *Informatsionnye protsessy [Information Processes]*, 2015, vol.15, iss. 3, pp. 298–313. (In Russian; abstract in English).

Chernikov A.G., Libina N.V. The use of Markov hypsotomography for geological studies in oceanology. *Oceanology*, 2011, vol. 51, iss. 3, pp. 528–532. DOI: [10.1134/S0001437011030040](https://doi.org/10.1134/S0001437011030040). (In Russ. ed.: Chernikov A.G., Libina N.V. Ispol'zovanie markovskoi gispotomografii pri geologicheskikh issledovaniyakh v okeanologii. *Okeanologiya*, 2011, vol. 51, iss. 3, pp. 561–565).

Devdariani A.S. *Matematicheskii analiz v geomorfologii [Mathematical analysis in geomorphology]*. V.V. Longinov (ed.). Moscow, Publ. Nedra, 1967. 156 p. (In Russian).

Dolgikh G.I., Novotryasov V.V., Samchenko A.N., Yaroshchuk I.O. About a mechanism of the formation of sedimentary waves on the shelf of the sea of Japan. *Doklady Earth Sciences*, 2015, vol. 465, iss. 2, pp. 1278–1282. DOI: [10.1134/S1028334X15120090](https://doi.org/10.1134/S1028334X15120090). (In Russ. ed.: Dolgikh G.I., Novotryasov V.V., Samchenko A.N.,

Т. 54. № 4. С. 538–545.
DOI: [10.7868/S0030157414030046](https://doi.org/10.7868/S0030157414030046).

Левченко О.В., Росляков А.Г., Поляков А.С., Зверев А.С., Мерклин Л.Р. Новые данные об осадочных волнах на западном континентальном склоне Каспийского моря // Доклады академии наук. 2008. т.420. № 4. С. 537–542.

Самченко А.Н. Использование сингулярного спектрального анализа в геоморфологических исследованиях южного Приморья и залива Петра Великого Японского моря // Геоморфология. 2019. № 3. С. 36–45.
DOI: [10.31857/S0435-42812019336-45](https://doi.org/10.31857/S0435-42812019336-45).

Самченко А.Н., Ярошук И.О. Акустические параметры рыхлых донных отложений залива Петра Великого (Японское море) // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2017. № 5. С. 130–136.

Черников А.Г., Либина Н.В. Использование марковской гиспотомографии при геологических исследованиях в океанологии // Океанология, 2011. Т. 51. № 3. С. 561–565.

Ярмоленко А.С., Скобенко О.В. Применение теории вейвлетов при сжати и фильтрации геоинформации // Записки Горного института. 2018. Т. 234. С. 612–623.
DOI: [10.31897/PMI.2018.6.612](https://doi.org/10.31897/PMI.2018.6.612).

Falorni G., Teles V., Vivoni E.R., Bras R.L., Amaratunga K.S. Analysis and characterization of the vertical accuracy of digital elevation models from the Shuttle Radar Topography Mission // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2005. Vol. 110. Iss. F2. F02005.
DOI: [10.1029/2003JF000113](https://doi.org/10.1029/2003JF000113).

Florinsky I.V. An illustrated introduction to general geomorphometry // Progress in Physical Geography. 2017. Vol. 41. Iss. 6. Pp. 723–752.
DOI: [10.1177/0309133317733667](https://doi.org/10.1177/0309133317733667).

Florinsky I.V., Skrypitsyna T.N., Bliakharskii D.P., Ishalina O.S., Kiseleva A.S. Towards the modeling of glacier microtopography using high-resolution data from unmanned aerial survey // The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences.

Yaroshchuk I.O. Ob odnom mekhanizme obrazovaniya osadochnykh voln na shel'fe Yaponskogo moray. *Doklady akademii nauk*, 2015, vol. 465, iss. 5, pp. 593–597.
DOI: [10.7868/S0869565215350169](https://doi.org/10.7868/S0869565215350169).

Dremin I.M., Ivanov O.V., Nechitailo V.A. Wavelets and their uses. *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 2001, vol. 44, iss. 5, pp.447–478.
DOI: [10.1070/PU2001v044n05ABEH000918](https://doi.org/10.1070/PU2001v044n05ABEH000918) (In Russ. ed.: Dremin I.M., Ivanov O.V., Nechitailo V.A. Veivlety i ikh ispol'zovanie. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1996, vol. 171, iss. 5, pp. 465–501.
DOI: [10.3367/UFNr.0171.200105a.0465](https://doi.org/10.3367/UFNr.0171.200105a.0465)).

Falorni G., Teles V., Vivoni E.R., Bras R.L., Amaratunga K.S. Analysis and characterization of the vertical accuracy of digital elevation models from the Shuttle Radar Topography Mission. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2005, vol. 110, iss. F2, F02005.
DOI: [10.1029/2003JF000113](https://doi.org/10.1029/2003JF000113).

Florinsky I.V. An illustrated introduction to general geomorphometry. *Progress in Physical Geography*, 2017, vol. 41, iss. 6, pp. 723–752.
DOI: [10.1177/0309133317733667](https://doi.org/10.1177/0309133317733667).

Florinsky I.V., Skrypitsyna T.N., Bliakharskii D.P., Ishalina O.S., Kiseleva A.S. Towards the modeling of glacier microtopography using high-resolution data from unmanned aerial survey. *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020, vol. XLIII-B2-2020 (XXIV ISPRS Congress, Commission II), pp 1065–1071.
DOI: [10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-1065-2020](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-1065-2020).

Hughes Clarke J.E. The Impact of Acoustic Imaging Geometry on the Fidelity of Seabed Bathymetric Models. *Geosciences*, 2018, vol. 8, iss. 4, 109.
DOI: [10.3390/geosciences8040109](https://doi.org/10.3390/geosciences8040109).

Korotchenko R.A., Samchenko A.N., Yaroshchuk I.O. Primenenie mnogomernogo EOF-analiza v geoinformatike [Application of multidimensional EOF-analysis in geoinformatics]. *Tsifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing]*,

2020. Vol. XLIII-B2-2020 (XXIV ISPRS Congress, Commission II). Pp 1065–1071. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-1065-2020](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-1065-2020).

Hughes Clarke J.E. The Impact of Acoustic Imaging Geometry on the Fidelity of Seabed Bathymetric Models // *Geosciences*. 2018. Vol. 8. Iss. 4. 109. DOI: [10.3390/geosciences8040109](https://doi.org/10.3390/geosciences8040109).

Lecours V., Dolan M.F.J., Micallef A., Lucieer V.L. A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2016. Vol. 20. Iss. 8. Pp. 3207–3244. DOI: [10.5194/hess-20-3207-2016](https://doi.org/10.5194/hess-20-3207-2016).

Turcotte D.L. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 398 p. DOI: [10.1017/CBO9781139174695](https://doi.org/10.1017/CBO9781139174695).

Xu T., Moore I.D., Gallant J.C. Fractals, fractal dimensions and landscapes – a review. *Geomorphology*. 1993. Vol. 8. Iss. 4. Pp. 245–262. DOI: [10.1016/0169-555X\(93\)90022-T](https://doi.org/10.1016/0169-555X(93)90022-T).

2013, iss. 3, pp. 17–20. (In Russian; abstract in English).

Korotchenko RA, Samchenko AN, Yaroshchuk I.O. Primenenie statisticheskikh metodov v izuchenii rel'efa shel'fovoi zony na primere zaliva Pos'eta (Yaponskoe more) [Application of statistical methods to study the shelf zone relief of the Posyet gulf of the sea of Japan]. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk [Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences]*, 2011, iss. 6 (160), pp. 54–59. (In Russian; abstract in English).

Korotchenko R.A., Samchenko A.N., Yaroshchuk I.O. The spatiotemporal analysis of the bottom geomorphology in Peter the Great Bay of the Sea of Japan. *Oceanology*, 2014, vol. 54, iss. 4, pp. 497–504. DOI: [10.1134/S0001437014030047](https://doi.org/10.1134/S0001437014030047). (In Russ. ed.: Korotchenko R.A., Samchenko A.N., Yaroshchuk I.O. Prostranstvenno-vremennoi analiz geomorfologii okeanicheskogo dna zaliva Petra Velikogo (Yaponskoe more). *Okeanologiya*, 2014, vol. 54, iss. 4, pp. 538–545. DOI: [10.7868/S0030157414030046](https://doi.org/10.7868/S0030157414030046)).

Lecours V., Dolan M.F.J., Micallef A., Lucieer V.L. A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, vol. 20, iss. 8, pp. 3207–3244. DOI: [10.5194/hess-20-3207-2016](https://doi.org/10.5194/hess-20-3207-2016).

Levchenko O.V., Roslyakov A.G., Polyakov A.S., Zverev A.S., Merklin L.R. Novye dannye ob osadochnykh volnakh na zapadnom kontinental'nom sklone Kaspiiskogo morya [New data on sedimentary waves on the western continental slope of the Caspian Sea]. *Doklady akademii nauk [Doklady Earth Sciences]*, 2008, vol. 420, iss. 4, pp. 537–542. (In Russian).

Samchenko A.N. Ispol'zovanie singulyarnogo spektral'nogo analiza v geomorfologicheskikh issledovaniyakh yuzhnogo Primor'ya i zaliva Petra Velikogo Yaponskogo morya [Use of singular spectral analysis in geomorphological studies in the Southern Primorye and the Peter the Great Bay of the Sea of Japan]. *Geomorfologiya [Geomorfologiya]*, 2019, iss. 3, pp. 36–45. DOI: [10.31857/S0435-42812019336-45](https://doi.org/10.31857/S0435-42812019336-45). (In Russian; abstract in English).

Samchenko A.N., Yaroshchuk I.O. Akusticheskie parametry rykhlykh donnykh otlozhenii zaliva Petra Velikogo (Yaponskoe more) [Acoustic parameters of friable bottom sediments of the Peter the Great Bay of the Sea of Japan] *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk [Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences]*, 2017, iss. 5, pp. 130–136. (In Russian; abstract in English).

Turcotte D.L. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 398 p. DOI: [10.1017/CBO9781139174695](https://doi.org/10.1017/CBO9781139174695).

Xu T., Moore I.D., Gallant J.C. Fractals, fractal dimensions and landscapes – a review. *Geomorphology*, 1993, vol. 8, iss. 4, pp. 245–262. DOI: [10.1016/0169-555X\(93\)90022-T](https://doi.org/10.1016/0169-555X(93)90022-T).

Yarmolenko A.S., Skobenko O.V. Application of the theory of wavelets for compression and filtering of geoinformation. *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 234, pp. 612–623. DOI: [10.31897/PMI.2018.6.612](https://doi.org/10.31897/PMI.2018.6.612). (In Russ. ed.: Yarmolenko A.S., Skobenko O.V. Primenenie teorii veivletov pri szhatii i fil'tratsii geoinformatsii. *Zapiski Gornogo instituta*, 2018, vol. 234, pp. 612–623).