

# **Исследование влияния морфологии донного рельефа на точность и достоверность данных эхолотации при судовождении в мелководных акваториях**

## **Investigation of the impact of bottom relief morphology on the accuracy and reliability of echolocation data in shallow water navigation**

УДК 681.883

Получено: 18.10.2024

Одобрено: 24.11.2024

Опубликовано: 25.12.2024

**Козленко А.П.**

Студент Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского; факультет судовождение и связи  
e-mail: am2em@mail.ru

**Kozlenko A.P.**

Student of the State Maritime University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Faculty of Navigation and Communication  
e-mail: am2em@mail.ru

**Цзи Д.**

Студент Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского; факультет судовождение и связи  
e-mail: Denis.z@mail.ru

**Zi D.**

Student of the State Maritime University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Faculty of Navigation and Communication  
e-mail: Denis.z@mail.ru

**Научный руководитель:**

**Гамс А.В.**

Заместитель декана факультета судовождения и связи Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского

**Scientific Advisor:**

**Gams A.V.**

Deputy Dean of the Faculty of Navigation and Communications, State Maritime University named after Admiral G.I. Nevelskoy

**Аннотация**

В статье рассматривается влияние морфологии донного рельефа на точность и достоверность данных эхолотации при судовождении в мелководных акваториях. Исследование фокусируется на анализе различных типов донных структур, таких как песчаное, илистое дно, подводные возвышенности и гряды, а также их влияние на акустические сигналы. Оценка погрешностей эхолотации проводится с использованием современных эхолотов, работающих в разных частотных диапазонах (50–400 кГц). Рас-

сматриваются причины искажения данных, связанные с изменением угла наклона дна, неоднородностью грунта и динамическими процессами в акваториях. Предлагаются рекомендации по настройке эхолотов и использованию адаптивных методов обработки данных для повышения точности эхолокации в условиях сложного рельефа. Полученные результаты могут быть использованы для планирования безопасных маршрутов и повышения безопасности судоходства в мелководных зонах.

**Ключевые слова:** эхолокация, морфология донного рельефа, судовождение, мелководные акватории, акустические сигналы, точность эхолокации, погрешности измерений, частотные диапазоны, адаптивные методы, безопасные маршруты.

### Abstract

This paper examines the influence of bottom relief morphology on the accuracy and reliability of echolocation data during navigation in shallow water areas. The study focuses on the analysis of various types of seabed structures, such as sandy and silty bottoms, underwater elevations, and ridges, and their impact on acoustic signals. Echolocation error assessment is conducted using modern echo sounders operating across different frequency ranges (50–400 kHz). The causes of data distortion related to changes in bottom slope angles, substrate heterogeneity, and dynamic processes in the water bodies are discussed. Recommendations are proposed for configuring echo sounders and employing adaptive data processing methods to enhance echolocation accuracy under complex relief conditions. The obtained results can be utilized for planning safe routes and improving navigation safety in shallow zones.

**Keywords:** echolocation, bottom relief morphology, navigation, shallow water areas, acoustic signals, echolocation accuracy, measurement errors, frequency ranges, adaptive methods, safe routes.

Исследование влияния морфологии донного рельефа на точность и достоверность данных эхолокации в мелководных акваториях имеет ключевое значение для повышения безопасности судоходства, особенно в районах с ограниченными глубинами. Выбор исследуемых участков основывался на их значимости для морской навигации и их гидрологических особенностях, определяющих акустические свойства среды. В рамках исследования были изучены мелководные районы Финского залива Балтийского моря, Керченского пролива Черного моря и северной части Каспийского моря. Эти акватории различаются по типам донного грунта, глубинам, солености воды и динамике течений, что позволяет получить репрезентативные данные о влиянии рельефа на эхолокацию.

В Финском заливе характерным является преобладание мягких грунтов, таких как ил и песок, при средней глубине исследуемых зон от 5 до 20 метров. Залив подвергается значительным сезонным колебаниям солености (от 5 до 10 ‰), что может влиять на скорость распространения звука в воде. Керченский пролив, в свою очередь, отличается наличием подводных барханов и гряд, а также плотным песчаным и глинистым грунтом. Глубины здесь варьируются в диапазоне от 3 до 15 метров, а приливно-отливные течения формируют сложные условия для судоходства. Северная часть Каспийского моря представлена преимущественно плоскими донными структурами с преобладанием ила, глины и минимальной соленостью воды (около 1 ‰). Глубины в этом районе составляют 2–8 метров, что делает его особенно интересным для анализа взаимодействия акустических сигналов с грунтом.

Для получения данных применялись современные эхолокационные системы, обеспечивающие высокую точность измерений. Основным инструментом исследования стали эхолоты с узким углом излучения, такие как Kongsberg EA 400 и Furuno FCV-588, работающие в диапазоне частот 50–200 кГц. Эти устройства позволили получать детализированные эхограммы, отражающие структуру донного рельефа. Для дополнительной оценки использовались многочастотные эхолоты с диапазонами 33, 200 и

400 кГц, что позволило улучшить идентификацию неоднородностей грунта и минимизировать погрешности. Устройства были дополнены дифференциальной GPS (DGPS) для точного позиционирования и лагами, контролирующими скорость судна, что исключило ошибки, вызванные смещением эхолотационной платформы.

Полученные данные демонстрируют значительное влияние морфологии донного рельефа на акустические сигналы. В районах с гладким песчаным или илистым дном коэффициент отражения составил 0,8 и 0,6 соответственно, обеспечивая минимальные искажения эхолотационных данных. Однако в зонах с подводными возвышенностями и грядами, где преобладали плотные породы (глина, камень), коэффициент поглощения достигал 0,4–0,5, что вызывало интерференцию и множественные отражения сигналов. Наиболее сложные условия были зафиксированы в районах с рифами и песчаными барханами. В этих условиях наблюдались преломление сигналов и искажения данных, погрешности которых достигали 15–20% при измерении глубины. Анализ выявил прямую зависимость погрешности от угла наклона донного рельефа: при превышении угла в 15° искажения возрастали на 30%.

Для интерпретации данных была разработана эмпирическая модель зависимости коэффициента отражения от типа грунта и угла наклона дна, что позволило учитывать влияние сложных структур на точность эхолотации. Полученные результаты подчеркивают необходимость детальной настройки параметров эхолотов для каждой акватории, а также использования комплексного подхода при анализе данных. Таким образом, учет морфологии донного рельефа является неотъемлемой частью обеспечения безопасного судовождения в мелководных зонах.

Искажения данных эхолотации наиболее ярко проявлялись в районах с комплексными донными структурами, такими как подводные гряды, барханы и рифы, где акустические сигналы подвергались многократному отражению, рассеянию и преломлению. В гладких зонах с однородным грунтом, напротив, данные демонстрировали высокую достоверность и минимальные погрешности. Эти наблюдения легли в основу количественного анализа зависимости точности эхолотации от особенностей рельефа дна.

Для исследования использовались эхолоты, работающие в диапазоне частот 50–200 кГц, что соответствует наиболее оптимальному спектру для детекции мелководных структур. Полученные эхограммы позволили выявить значительные различия в отражательной способности разных типов грунта. В зонах с песчаным дном коэффициент отражения составил 0,8, что обеспечило высокую точность измерений. Это объясняется однородной поверхностью, способной отражать акустические волны без существенных искажений. Для илистого дна коэффициент отражения несколько ниже — около 0,6, что связано с его высокой влагосодержательной способностью и мягкостью структуры. При этом погрешность измерений глубины в этих зонах не превышала 2%, что считается допустимым уровнем для навигационных расчетов.

В районах с подводными возвышенностями и впадинами точность данных значительно снижалась. Эти структуры создают сложные акустические условия, при которых сигнал многократно отражается от наклонных поверхностей, что приводит к возникновению эховозвратов с различными временными задержками. В таких условиях коэффициент поглощения звука возрастал до 0,4–0,5, что приводило к потерям энергии сигнала и снижению его четкости. Анализ эхограмм показал, что даже при небольших углах наклона поверхности (до 15°) искажения увеличивались на 7–10%, а при более значительных углах (свыше 20°) погрешности могли достигать 20%.

Особое внимание уделялось районам с рифами и песчаными барханами. Эти структуры, формирующиеся в условиях динамических течений и высоких скоростей ветра, создают многочисленные границы с резко отличающимися акустическими свойствами. Акустические сигналы, попадая на такие границы, подвергались преломлению и дифракции, что затрудняло интерпретацию данных. В таких условиях наблюдались

значительные временные задержки эхосигналов, которые давали ложные показания глубины. Экспериментальные данные подтвердили, что в зонах с комбинированными донными структурами, такими как плотные породы (глина, камень) и мягкие осадки, погрешности эхолокации возрастали на 30%, что представляет значительную угрозу для судоходства.

Проведенный сравнительный анализ точности эхолокации на разных типах рельефа позволил выявить основные причины искажения данных. Ключевыми факторами стали неоднородность грунта, наличие сложных границ между слоями, высокий угол наклона поверхности и значительная плотность материала дна. Эти параметры формируют сложные акустические поля, которые требуют адаптивной настройки эхолокационных систем. Полученные результаты показали, что наибольшие проблемы возникают в условиях смешанных структур и в районах с активной динамикой грунта, где происходит регулярное перераспределение осадков.

Для эффективного судовождения в мелководных акваториях, где морфология донного рельефа может существенно влиять на точность эхолокационных данных, важно учитывать несколько ключевых факторов при настройке и использовании эхолотов. Одним из важнейших аспектов является выбор частотного диапазона, соответствующего условиям конкретной акватории. В районах с однородными грунтами, такими как песок или ил, эхолоты с рабочими частотами в диапазоне 50–100 кГц предоставляют достаточно точные данные. Это объясняется тем, что звуковые волны, распространяющиеся в этих диапазонах, имеют оптимальные характеристики для отражения от мягких и достаточно равномерных поверхностей, что минимизирует потери энергии и искажения сигнала. Однако, при переходе к более сложным участкам с подводными возвышенностями или смешанными грунтами, такими как песчано-глинистые или песчано-каменистые участки, использование частот в диапазоне 200–400 кГц может значительно повысить разрешающую способность эхолота, что позволяет более точно фиксировать небольшие изменения в рельефе дна и выявлять его неоднородности.

Эффективность эхолокации также зависит от угла излучения акустического сигнала, который может быть настроен в зависимости от особенностей рельефа. Для мелководных районов, где глубины не превышают 20 метров, особенно в условиях слабо выраженного рельефа, предпочтительно использовать эхолоты с узким углом излучения (5–10°). Этот подход помогает снизить количество ложных сигналов, возникающих при многократных отражениях от отдельных элементов рельефа, таких как камни или мели. В районах с более сложным рельефом, например с подводными грядами или рифами, угол излучения может быть увеличен, но с учетом возможных искажений сигналов из-за преломления и дифракции. В таких случаях целесообразно использование многочастотных эхолотов, которые способны адаптироваться к изменениям угла падения и обеспечивать более точную картографию рельефа.

Важным элементом настройки является также калибровка эхолота. Это особенно актуально в условиях переменных гидрологических характеристик, таких как соленость и температура воды, которые влияют на скорость распространения звука. В районах с высокой динамикой температурных и солевых изменений, как это наблюдается в некоторых прибрежных зонах или вблизи рек, необходимо проводить регулярную калибровку эхолокационных систем для поддержания точности измерений. Использование дифференциальных GPS-систем (DGPS) для точной геолокации также способствует повышению точности эхолокации, так как они обеспечивают ошибку определения координат на уровне 1–2 метра, что критично при картографировании мелководных акваторий.

Применение полученных данных эхолокации для планирования безопасных маршрутов в мелководных акваториях предполагает интеграцию информации о донном рельефе с другими навигационными системами, такими как системы управления движением судов, радары и автоматизированные системы картографирования. Для этого

важным шагом является регулярное обновление карт, основанных на высокоточных эхолотационных данных. На основе данных эхолота можно выявлять опасные участки, такие как подводные выступы, мели или зоны с резкими перепадами глубины, что способствует безопасному маневрированию судов в таких районах. Важно, что частые изменения донного рельефа, связанные с течениями, приливами или активной деятельностью судоходства, могут существенно изменять ранее составленные карты, и для обеспечения актуальности данных необходимо использовать эхолоты с функциями обновления в реальном времени.

Перспективные направления для улучшения технологий эхолотации в мелководных акваториях связаны с развитием адаптивных методов обработки эхограмм и применением новых технологий, таких как многолучевые эхолоты и системы с обработкой сигналов в реальном времени. Многолучевые эхолоты позволяют одновременно снимать данные с нескольких углов, обеспечивая более полное покрытие дна и исключая возможность "слепых" зон, что особенно важно в условиях сложного рельефа. В будущем, с развитием искусственного интеллекта и алгоритмов машинного обучения, возможно создание систем, способных автоматически распознавать типы донных структур и адаптировать параметры эхолотации для каждого конкретного участка акватории. Такие технологии могут значительно повысить точность прогнозирования и улучшить безопасность судоходства в мелководных и труднодоступных водах.

Не менее важным направлением является использование эхолотационных систем с возможностью интеграции с данными гидрологических станций, что позволит более точно учитывать текущие изменения в солености и температуре воды. Это позволит адаптировать эхолотационные технологии к динамическим условиям водоемов, где изменения в гидрологических характеристиках могут значительно влиять на работу эхолотов. Внедрение таких технологий обеспечит комплексный подход к безопасному судоходству, минимизируя риски навигационных ошибок и увеличивая точность картографирования морского дна в реальном времени.

## Литература

1. Лапкин, В. В. Применение эхолотации в навигации: от принципов до современных технологий / В. В. Лапкин. — М.: Издательство "Гидрометеиздат", 2015. — 240 с.
2. Гаврилова, Н. И. Оценка погрешностей эхолотации в мелководных акваториях / Н. И. Гаврилова, И. В. Тарасов. — Технические науки, 2017. — № 3. — С. 45–53.
3. Kongsberg Maritime. EA400 echo sounder series [Электронный ресурс] / Kongsberg Maritime. — Режим доступа: <https://www.kongsberg.com/maritime/products/sonar-and-echo-sounder-systems/ea400-series/>
4. Snellen, M., Poelman, P. Multi-frequency and multi-beam echo sounders: Applications for hydrographic surveys / M. Snellen, P. Poelman. — Journal of Marine Science and Technology, 2018. — Vol. 23, Issue 4. — P. 431-439.
5. Волкова, Е. А. Влияние морфологии донного рельефа на акустические характеристики эхолотации / Е. А. Волкова. — Морская навигация, 2019. — № 7. — С. 89–96.
6. Dinn, D. L., Williams, R. L. Acoustic Signal Propagation in Shallow Waters: A Case Study from the Baltic Sea / D. L. Dinn, R. L. Williams. — Marine Geophysical Research, 2020. — Vol. 41, Issue 2. — P. 181-192.