

УДК 539.3

© А. И. Машошин*, А. В. Цветков, 2024

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 197046, ул. Малая Посадская, д. 30, Санкт-Петербург

*aimashoshin@mail.ru

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ГЛУБИНЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ В ГРУНТ ПРИ МОРСКОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ

Статья поступила в редакцию 15.02.2023, после доработки 09.08.2023, принята в печать 29.11.2023

Аннотация

Приведена упрощённая методика расчёта глубины проникновения в грунт при морской сейсморазведке, разработанная в интересах обоснования технических характеристик элементов подводного робототехнического комплекса, предназначенного для проведения сейсморазведки подо льдом и включающего: комплект автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), оснащенных геофонами либо короткими сейсмокосами (стримерами) с датчиками-гидрофонами, а также средствами высокоточного позиционирования; подводную док-станцию, обеспечивающую доставку АНПА в район проведения работ, управление ими, а также буксировку низкочастотных гидроакустических излучателей; береговую инфраструктуру для обслуживания АНПА и док-станции. Разработанная методика учитывает давление, создаваемое гидроакустическим излучателем, а также потери энергии зондирующего сигнала вследствие расширения фронта волны, прохождения сигнала в грунт и обратно, пространственного затухания при распространении сигнала в воде и в грунте, отражения от линзы, содержащей нефть либо газ. Приведены примеры расчёта глубины проникновения в грунт для условий мелкого и глубокого морей в зависимости от давления, создаваемого излучателем, буксируемым на глубине 100 м, при использовании приёмной антенны из гидрофонов, сформированной на глубине 100 м, а также приёмной антенны из геофонов, лежащей на дне. Качественно оценена адекватность разработанной методики путём сравнения результатов расчёта с имеющимися экспериментальными данными.

Ключевые слова: морская сейсморазведка, донное зондирование, гидроакустический излучатель

UDC 539.3

© А. И. Mashoshin*, A. V. Tsvetkov, 2024

Concern Central Scientific and Research Institute 'Elektropribor', JSC, 30 Malaya Posadskaya Str., St Petersburg 197046, Russia

*aimashoshin@mail.ru

METHOD FOR DETERMINING SEABED PENETRATION DEPTH IN MARINE SEISMIC EXPLORATION

Received 15.02.2023, Revised 09.08.2023, Accepted 29.11.2023

Abstract

The paper introduces a straightforward method aimed at determining the depth of penetration into the seabed during marine seismic exploration through bottom sounding. This technique was developed to support the establishment of technical specifications for the components of an underwater robotic complex intended for seismic surveys beneath ice formations. These components include a suite of autonomous underwater vehicles (AUVs) outfitted with either geophones or short streamers equipped with hydrophone sensors, alongside high-precision positioning systems. The complex comprises an underwater docking station responsible for deploying AUVs to the designated work area, managing their operations, and towing low-frequency sound emitters. Moreover, it encompasses coastal infrastructure dedicated to the maintenance of AUVs and the support of the docking station. The developed method considers various factors including the pressure exerted by the sound emitter and the energy dissipation of the probing signal

Ссылка для цитирования: Машошин А.И., Цветков А.В. Методика расчета глубины проникновения в грунт при морской сейсморазведке // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 1. С. 95–103.

doi:10.59887/2073-6673.2024.17(1)-8

For citation: Mashoshin A.I., Tsvetkov A.V. Method for Determining Seabed Penetration Depth in Marine Seismic Exploration. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024, 17, 1, 95–103. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(1)-8

due to wave front expansion, signal transmission into and back from the ground, spatial damping during signal propagation in water and soil, and reflection from oil or gas-containing lenses. Illustrative examples demonstrate the computation of ground penetration depth in shallow and deep waters, contingent upon the pressure exerted by the sound emitter towed at a depth of 100 meters. It also assesses the method's reliability by comparing the computed outcomes against existing experimental data.

Keywords: marine seismic exploration, bottom sounding, sound emitter

1. Введение

Как известно, значительный объем залежей углеводородов на территории РФ находится в Арктической зоне. Их поиск и последующая добыча являются национальной стратегической задачей [1–3]. Основным методом решения этой задачи является сейсморазведка. Её суть заключается в излучении в воду мощных низкочастотных акустических сигналов. Они проникают в грунт и отражаются от различных неоднородностей в грунте, в том числе от полостей, содержащих залежи углеводородов. Отраженные сигналы фиксируются полем донных станций, оборудованных геофонами, либо протяженными линейными многоэлементными антеннами (сейсмокосами), буксируемыми за судном, либо сейсмокосами, лежащими на дне. Зафиксированные сигналы в береговых условиях обрабатываются на мощных компьютерах по специальным программам, позволяющим интерпретировать зафиксированные сигналы.

В настоящее время для выполнения сейсморазведки используются специально оборудованные гидрофизические суда, которые способны буксировать блок акустических излучателей и сейсмокосу, а также ставить и впоследствии поднимать на борт донные станции [1–6].

Недостатком сейсморазведки с применением гидрофизических судов является существенная зависимость от состояния поверхности моря. Естественно, что такой способ сейсморазведки не применим в районах, покрытых льдом. Высказываемые предложения об использовании для сейсморазведки ледоколов оказываются несостоятельными по экономическим причинам [7]. Также сейсморазведка затруднена в штормовую погоду. В морях российской части Арктики благоприятная для сейсморазведки погода стоит суммарно не более 3–4 месяцев в году, что делает сейсморазведку с использованием судов экономически недостаточно эффективной.

Выходом из ситуации является создание подводных робототехнических комплексов (РТК) для поиска углеводородов на морском шельфе. Идея создания подобных РТК не нова [8]. Однако ввиду исключительной сложности их создания, работы в данном направлении во всем мире находятся на стадии поисковых исследований и подготовительных процедур.

Наиболее известным зарубежным исследовательским проектом является проект Widely Scalable Mobile Underwater Sonar Technology (WiMUST) [9, 10]. Он посвящен разработке технологии создания подводного РТК, базирующегося на совместном функционировании большого числа автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), выступающих в качестве приёмников отражённых сейсмосигналов. Проект выполнялся с 2015-го по 2018 г. по заказу Евросоюза и рассматривался как продолжение ряда проектов, выполненных за последние 10 лет. Для реализации проекта был создан консорциум из 4-х научно-исследовательских организаций и 5-ти промышленных партнёров, имеющих практический опыт проведения морской сейсморазведки. Целью проекта WiMUST являлась разработка методологии, технологии и процедур создания робототехнической системы на базе АНПА для проведения сейсморазведки на морском шельфе в интересах:

- повышения эффективности сейсморазведки путем повышения информативности получаемых данных за счет формирования оптимальной (с точки зрения решаемой задачи) адаптивной приёмной динамической пространственной 3D антенной решётки, в которой датчиками являются короткоапертурные сейсмокосы (стримеры), буксируемые АНПА;

- упрощения и сокращения стоимости процесса сейсморазведки.

Задача обеспечения сейсморазведки подо льдом в проекте не ставилась и не решалась.

Для достижения поставленной цели в проекте WiMUST разрабатывались следующие технологии:

- расчета формируемой группой АНПА оптимальной пространственной 3D антенной решётки для приёма сигналов, отраженных от подземных неоднородностей;

- динамического формирования и стабилизации этой решетки;

- кооперативного управления группой АНПА;

- взаимного позиционирования и навигации группы АНПА;

- создания стримера, буксируемого АНПА, в том числе на базе векторно-скалярных приёмников;

- звукоподводной связи АНПА между собой и с судном управления.

Проект завершился демонстрационными испытаниями разрабатываемой РТК и признан успешным в части разработки перечисленных технологий. Соответствующими структурами Евросоюза принято решение о его продолжении в виде промышленной разработки.

В России подобными исследованиями занимается АО «ЦКБ МТ «Рубин» [11].

По замыслу подводный РТК для проведения сейсморазведки должен включать:

- комплект АНПА (по разным оценкам от нескольких сотен до нескольких тысяч), оснащенных геофонами либо короткими сейсмодатчиками (стримерами) с датчиками-гидрофонами, а также средствами высокоточного позиционирования;
- подводную док-станцию (т.е. специализированную подводную лодку), обеспечивающую доставку АНПА в район проведения работ, управление ими, а также буксировку низкочастотных гидроакустических излучателей;
- береговую инфраструктуру для обслуживания АНПА и док-станции.

Создание такого РТК сопряжено с решением комплекса сложных технических проблем, и должно начинаться с обоснования технических характеристик каждого элемента РТК. В основе обоснования лежит определённая геофизиками максимально необходимая в каждом конкретном районе моря глубина проникновения в грунт при проведении сейсморазведки, которая может составлять до 10 км и более.

Преимуществами подводного РТК по сравнению с традиционным методом сейсморазведки являются:

- возможность буксировки гидроакустического излучателя вдали от поверхности моря, что повышает энергоэффективность излучения зондирующего сигнала;
- повышение качества приёма эхосигналов на геофоны при использовании АНПА, обладающих способностью заглубления геофонов в грунт, что затруднительно при использовании донных станций [1];
- оперативность донной сейсморазведки, базирующейся на способности АНПА быстро менять своё местоположение.

Вместе с тем, применение подводного РТК имеет свои ограничения, основным из которых (не считая сложности управления большим количеством АНПА) является невозможность использования пневмопушек, являющихся основным типом гидроакустического излучателя при традиционной сейсморазведке. При применении других типов излучателей, которые могут буксироваться за подводным носителем (в частности, электродинамических), придётся довольствоваться существенно меньшим (менее 1 МПа) давлением излучаемого зондирующего сигнала.

Целью предлагаемой работы являлась разработка методики, предназначенной для обоснования технических характеристик элементов РТК. Методика позволяет связать физико-химические параметры воды и грунта, технические характеристики элементов РТК с глубиной проникновения в грунт при морской сейсморазведке.

2. Обоснование методики

Геометрия донного зондирования применительно к подводному РТК приведена на рис. 1.

Зондирующий сигнал (ЗС), излучённый гидроакустическим излучателем (ГИ), расположенным в толще воды на расстоянии от дна H_{emit} , преодолевает водный слой, проникает в грунт, отражается от верхней границы линзы в грунте, заполненной нефтью либо газом, и по обратному пути поступает на приёмник. В качестве приёмника рассматривается многоэлементная антенна, состоящая из гидрофонов, расположенная в толще воды на расстоянии от дна H_{rec} , либо антенна, состоящая из геофонов, имеющих контакт с грунтом.

Поскольку в доступной литературе не удалось найти примера количественного описания структуры морского дна, достаточного для моделирования, с учётом имеющихся данных [4, 6, 12, 14–16] примем, что морское дно имеет тонкослоистую структуру с толщиной слоёв, равномерно распределённой в интервале 20–50 м, с плотностью слоёв, равномерно распределённой в интервале 1240–2210 кг/м³, скоростью звука в каждом слое, равномерно распределённой в интервале 1650–1800 м/с и коэффициентом пространственного затухания на частоте 50 Гц, равномерно распределённым в интервале 5–10 дБ/км. В результате при распространении в грунте ЗС в каждом слое теряет энергию сначала вследствие пересечения границы слоя, а затем вследствие затухания звука в слое.

При расчётах не будем учитывать:

- вертикальное распределение скорости звука в водном слое, поскольку при вертикальном зондировании оно заметного влияния на интенсивность сигнала не оказывает;
- влияние поверхности моря на ЗС, поскольку в случае подводного РТК предполагается, что излучение ЗС будет осуществляться вдали от поверхности моря.

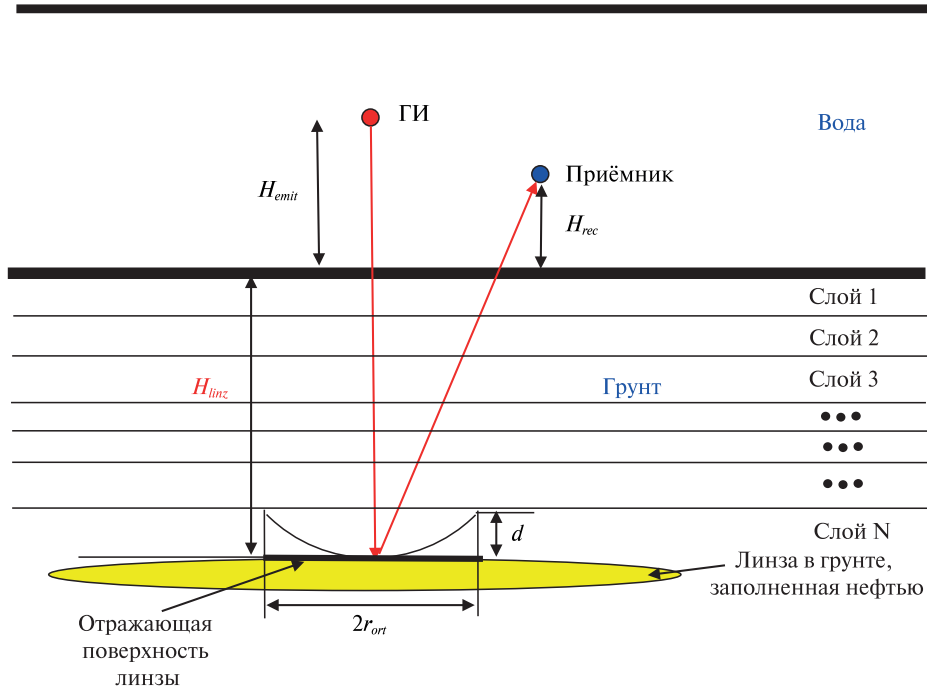


Рис. 1. Геометрия сейсморазведки

Fig. 1. Geometry of seismic exploration

В качестве глубины проникновения в грунт будем рассматривать расстояние от дна до верхней границы линзы, заполненной нефтью либо газом, H_{linz} , при котором отношение мощности эхосигнала (ЭС) к мощности шумов моря на входе одного приёмника антенны равно заданному пороговому значению Q_{tr} :

$$\frac{P_{es}^2}{P_n^2} = Q_{tr}, \quad (1)$$

где P_{es}^2 — квадрат давления ЭС на входе приёмника в полосе частот Δf ; P_n^2 — квадрат давления шумов моря на входе приёмника в полосе ЗС Δf , вычисляемый по формуле [12]:

$$P_n^2 = P_{shm}^2 \cdot \Delta f. \quad (2)$$

P_{shm} — уровень шумов моря на входе приёмника в полосе 1 Гц на средней частоте ЗС f_{zs} .

Квадрат давления ЭС в полосе частот Δf на входе приёмника вычисляется по формуле:

$$P_{es}^2 = P_{zs}^2 \cdot L_{sum}, \quad (3)$$

P_{zs}^2 — квадрат давления ЗС в полосе частот Δf , приведённый к расстоянию 1 м от ГИ; L_{sum} — относительная величина суммарных потерь энергии ЗС при распространении по маршруту «ГИ — линза — приёмник», вычисляемая по формуле:

$$L_{sum} = L_{sph/emit_linz} \cdot L_{pvo} \cdot L_{z/emit_bot} \cdot K_{pr/g-w} \cdot L_{z/bot_linz} \cdot K_{refl/linz} \times L_{z/linz_bot} \cdot L_{sph/linz_rec} \cdot K_{pr/g-w} \cdot L_{z/bot_rec}, \quad (4)$$

в которой: $L_{sph/emit_linz}$ — относительная величина потерь энергии ЗС вследствие сферического расширения фронта волны при распространении от ГИ до линзы, заполненной нефтью либо газом:

$$L_{sph/emit_linz} = \left(\frac{1}{H_{emit} + H_{linz}} \right)^2. \quad (5)$$

L_{pvo} — относительная величина потерь энергии ЗС вследствие преломления акустических лучей по закону Снеллиуса на границе вода-грунт. Поскольку скорость звука в грунте c_g больше, чем скорость звука в воде c_w , в грунт из воды проходит только энергия в телесном угле $\Delta\psi$, вычисляемом по формуле:

$$\Delta\psi = 2 \cdot \arcsin \frac{c_w}{c_g}. \quad (6)$$

В результате относительная величина потерь энергии вследствие преломления акустических лучей составляет:

$$L_{pvo} = \left(\frac{\Delta\psi}{\pi} \right)^2. \quad (7)$$

$L_{z/emit_bot}$ — величина потерь энергии ЗС вследствие пространственного затухания сигнала при распространении в воде от ГИ до дна:

$$L_{z/emit_bot} = 10^{-0,1\beta_w \cdot H_{emit}}, \quad (8)$$

где β_w — коэффициент пространственного затухания в воде на средней частоте ЗС;

$K_{pr/w-g}$, $K_{pr/g-w}$ — относительные величины потерь энергии ЗС при прохождении сигнала из воды в грунт и из грунта в воду соответственно, вычисляемые по формуле [13]:

$$K_{pr/w-g} = K_{pr/g-w} = \frac{4 \cdot Z_w \cdot Z_g}{(Z_w + Z_g)^2}; \quad (9)$$

$Z_w = \rho_w \cdot c_w$ — акустическая жёсткость воды; $Z_g = \rho_g \cdot c_g$ — акустическая жёсткость верхнего слоя грунта; ρ_w , ρ_g — плотность воды и верхнего слоя грунта соответственно; c_w , c_g — скорость звука в воде и в верхнем слое грунта соответственно;

L_{z/bot_linz} , $L_{z/linz_bot}$ — относительные величины потерь энергии ЗС вследствие затухания сигнала при распространении в грунте от дна до линзы и обратно. Учитывая принятую модель тонкослоистого грунта со случайными значениями толщины слоёв, их акустической жёсткости и коэффициента затухания:

$$L_{z/bot_linz} = L_{z/linz_bot} = \prod_{i=1}^N K_{pr_i} \cdot 10^{-0,1\beta_{g_i} \cdot \Delta H_i}, \quad (10)$$

где N — случайное количество слоёв грунта от дна до линзы, соответствующее заданному распределению вероятностей толщины слоёв; K_{pr_i} — величина относительных потерь энергии ЗС при прохождении из i — 1-го в i -й слой грунта на средней частоте ЗС:

$$K_{pr_i} = \frac{4 \cdot Z_{i-1} \cdot Z_i}{(Z_{i-1} + Z_i)^2}; \quad (11)$$

$Z_i = \rho_i \cdot c_i$ — случайная акустическая жёсткость i -го слоя грунта, распределённая в заданных пределах; β_{g_i} — случайный коэффициент пространственного затухания звука в i -м слое грунта на средней частоте ЗС, распределённый в заданных пределах; ΔH_i — случайная толщина i -го слоя грунта, распределённая в заданных пределах; $K_{refl/linz}$ — относительная величина потерь энергии ЗС при отражении ЗС от верхней границы линзы, наполненной нефтью, площадью S_{refl} , вычисляемая по формуле:

$$K_{refl/linz} = k_{refl} \cdot S_{refl}, \quad (12)$$

k_{refl} — коэффициент отражения сигнала от единичной площади раздела грунта и линзы, вычисляемый по формуле [13]:

$$k_{refl} = \left(\frac{Z_{linz} - Z_N}{Z_{linz} + Z_N} \right)^2. \quad (13)$$

$Z_{linz} = \rho_{linz} \cdot c_{linz}$, $Z_N = \rho_N \cdot c_N$ — акустическая жёсткость линзы, наполненной нефтью, и нижнего слоя грунта соответственно; S_{refl} — площадь верхней границы линзы, сигнал от которой отражается на интервале длительности ЗС τ (рис. 1), вычисляемая по формуле:

$$S_{refl} = \pi \cdot \left((H_{emit} + H_{linz}) \cdot \operatorname{tg} \left[\arccos \frac{H_{emit} + H_{linz}}{H_{emit} + H_{linz} + \frac{c_g \cdot \tau}{2}} \right] \right)^2. \quad (14)$$

$L_{sph/linz_rec}$ — относительная потеря величина энергии ЗС вследствие сферического расширения фронта волны при распространении в грунте от линзы до приёмной антенны:

$$L_{sph/linz_rec} = \left(\frac{1}{H_{linz} + H_{rec}} \right)^2; \quad (15)$$

L_{z/bot_rec} — относительная величина потерь энергии ЗС вследствие затухания сигнала при распространении от дна до приёмной антенны:

$$L_{z/bot_rec} = 10^{-0,1\beta_g \cdot H_{rec}}. \quad (16)$$

При приёме эхосигнала на геофоны в формуле (4) последние два множителя отсутствуют, а предпоследний имеет вид:

$$L_{sph/linz_bot} = \left(\frac{1}{H_{linz}} \right)^2. \quad (17)$$

В результате методика состоит в решении относительно заглубления линзы H_{linz} уравнения (1) при подстановке в него формул (2)...(17).

3. Примеры расчёта

Рассчитаем глубину проникновения в грунт для условий мелкого (глубина 300 м) и глубокого (глубина 4000 м) морей.

ГИ в обоих случаях буксируется док-станцией на глубине 100 м. Приём эхосигнала осуществляется на антенну, образованную из АНПА, использующих в качестве приёмников гидрофоны либо геофоны. В первом случае антенна сформирована из АНПА на расстоянии 20 м от дна, во втором случае АНПА, формирующие антенну, лежат на дне с геофонами, заглублёнными в грунт.

Расчёт будем осуществлять при следующих исходных данных:

- полоса частот ЗС 10...90 Гц со средней частотой 50 Гц;
- длительность ЗС 12,5 мс;
- давление ЗС 0,2...2,5 МПа×м;
- пороговое отношение сигнал/помеха на входе одного приёмника 6 дБ;
- коэффициент пространственного затухания на частоте 50 Гц в воде 4×10^{-4} дБ/км [12, 14, 15];
- уровень шумов моря на входе приёмника на частоте 50 Гц в полосе 1 Гц при умеренном судоходстве 6,3 мПа (50 дБ) [12];
- плотность воды 1030 кг/м³, нефти 835 кг/м³ [4];
- скорость звука в воде 1490 м/с, в линзе, заполненной нефтью, 1290 м/с [14].

Распространение звука в грунте осуществляется путём моделирования случайных тонких слоёв с приведёнными выше вероятностными распределениями их характеристик.

Результаты решения относительно заглубления линзы H_{linz} уравнения (1) при подстановке в него формул (2)...(17) для мелкого (глубина 300 м) и глубокого (глубина 4000 м) приведены на рис. 2.

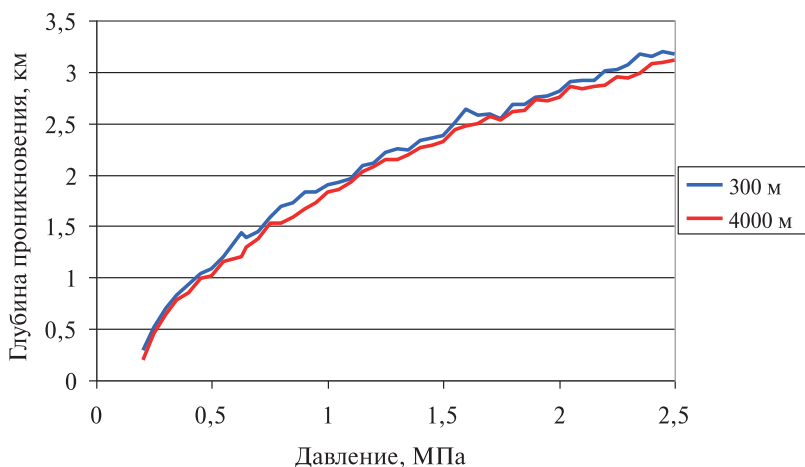


Рис. 2. Зависимости для условий мелкого (глубина 300 м) и глубокого (глубина 4000 м) морей глубины проникновения в грунт от давления, создаваемого ГИ, расположенного на глубине 100 м, при приёме эхосигналов на одиночный геофон

Fig. 2. Dependences for shallow (depth 300 m) and deep (depth 4000 m) seas of penetration depth into the ground as a function of the pressure generated by the hydroacoustic transmitter located at a depth of 100 m when receiving echo signals on a single geophone

Из рассмотрения рис. 2 следует:

- при давлении, создаваемом ГИ, в диапазоне от 0,2 до 2,5 МПа×м глубина проникновения в грунт в зависимости от условий составляет от 0,25 до 3,2 км;
- глубины проникновения ЗС в грунт в мелком и глубоком морях отличаются незначительно по двум причинам: во-первых, величина пространственного затухания низкочастотного ЗС в воде пренебрежимо мала, и во-вторых, потери энергии за счёт большего расширения фронта волны в глубоком море компенсируются расширением площади линзы, от которой отражается ЗС на интервале его длительности;
- по тем же причинам практически не отличаются глубины проникновения в грунт при использовании гидрофонов и геофонов.

На рис. 3 изображена зависимость количества слоёв в верхнем слое грунта при моделировании тонкослоистой структуры грунта с толщиной слоёв, равномерно распределённых в интервале 50–100 м.

На рис. 4 изображены зависимости глубины проникновения в грунт от давления ЗС, посчитанные для толщин слоёв грунта, распределённых в разных интервалах.

Из рассмотрения рис. 4 следует, что с ростом толщин слоёв грунта и, как следствие, уменьшением количества слоёв глубина проникновения в грунт возрастает. Объясняется это тем, что с уменьшением количества слоёв грунта уменьшаются потери энергии зондирующего сигнала, возникающие при пересечении границ каждого слоя.

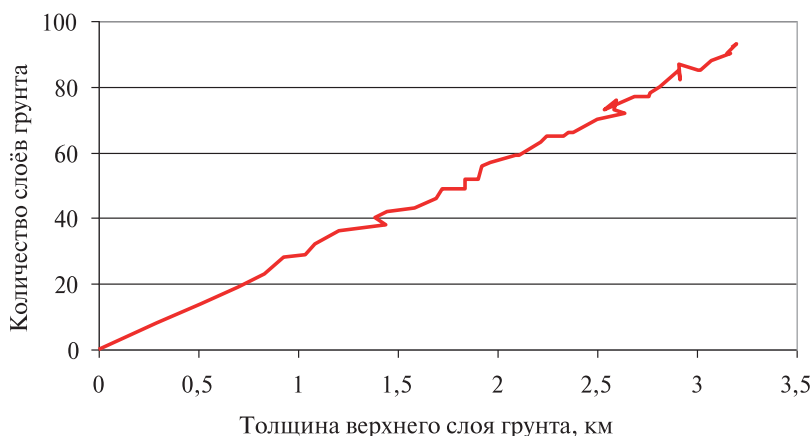


Рис. 3. Зависимость количества слоёв в верхнем слое грунта при моделировании тонкослоистой структуры грунта

Fig. 3. Dependence of the number of layers in the upper layer of the soil when modeling the thin-layered structure of the soil

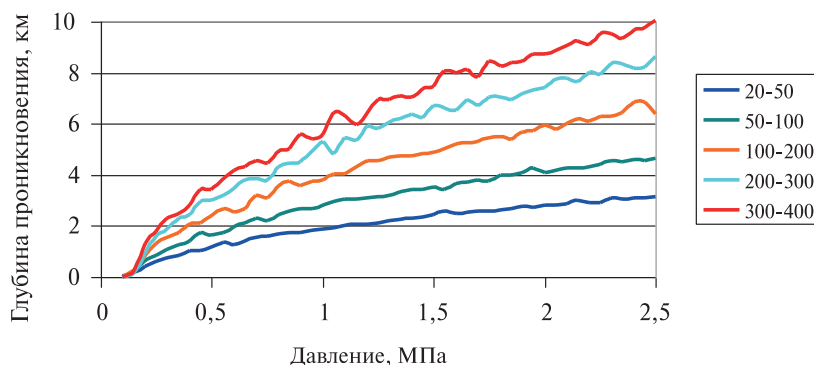


Рис. 4. Зависимость глубины проникновения в грунт от давления зондирующего сигнала. Параметром графиков является интервал, в котором заключены случайные толщины слоёв грунта

Fig. 4. The dependence of the depth of penetration into the ground as a function of the pressure of the probing signal. The colored lines represent intervals of random thickness for the soil layers

Для проверки адекватности разработанной методики экспериментальных данных в необходимом для сравнения объёме от специализированных организаций получить не удалось. В одной из таких организаций неофициально было сообщено, что при использовании набора пневмопушек, развивающих суммарное давление порядка 2,5 МПа глубина проникновения в грунт составляет около 3 км. Как видим, эти данные согласуются с результатами расчётов, приведёнными на рис. 2, а также на рис. 4 при толщинах слоёв грунта в интервале 20–50 м. Отсюда можно предположить, что толщины слоёв грунта с разными физико-химическими параметрами лежат именно в этом интервале.

4. Выводы

Перспективным направлением поиска залежей углеводородов в Арктических морях является создание подводного робототехнического комплекса (РТК) для сейсморазведки подо льдом.

Поскольку создание такого РТК сопряжено с решением комплекса сложных технических проблем и должно начинаться с обоснования технических характеристик каждого элемента РТК, исходя из необходимой глубины проникновения в грунт в районе работы. Для помощи в проведении такого обоснования в работе разработана методика, позволяющая связать физико-химические параметры морской воды и грунта в конкретном районе моря и технические характеристики элементов РТК с глубиной проникновения в грунт при морской сейсморазведке.

При этом следует заметить, что, поскольку методика не прошла тестирования путём сравнения результатов расчёта с надёжными экспериментальными данными, результаты, которые можно получить с её использованием, являются ориентировочными.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 24-19-20001).

Funding

This work was supported by the Russian Science Foundation (project 24-19-20001).

Литература

1. Лаверов Н.П., Рослов Ю.В., Лобковский Л.И. и др. Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. 2011. № 4. С. 4–13.
2. Ампилов Ю.П. Сейсморазведка на российском шельфе // Offshore Russia. 2015. № 2 (8). С. 38–45.
3. Ампилов Ю.П. Оборудование для морской сейсморазведки: Окно возможностей для импортозамещения // Offshore Russia. 2017. № 3. С. 38–45.
4. Мак-Куиллин Р., Бекон М., Барклай У. Введение в сейсмическую интерпретацию / Пер. с англ. М.: Недра, 1985. 309 с.
5. Кондратьев О.К. Сейсмические волны в поглощающих средах. М.: Недра, 1986. 174 с.
6. Уайт Дж.Э. Возбуждение и распространение сейсмических волн / Пер. с англ. М.: Недра, 1986. 264 с.
7. Костылев К.А., Зуев В.А. Технология сейсморазведки с использованием ледокольного судна // Труды Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева. 2015. № 1(108). С. 180–190.
8. Amundsen L., Landro M. Seismic imaging technology. Part IV // GEOExPro. 2008. Vol. 5, N 5.
9. Pleskach M. WiMUST — A fleet of AUVs for Seismic. URL: www.hydro0international.com (дата обращения: 14.02.2023).
10. WiMUST. Widely Scalable Mobile Underwater Sonar Technology. URL: wimust.isme.unige.it (дата обращения: 14.02.2023).
11. Торопов Е.Е., Гинтовт А.Р., Семёнов В.Б., Машошин А.И., Пашкевич И.В. Робототехнический комплекс для сейсморазведки углеводородов подо льдом // Труды 13-й международной конференции и выставки по освоению ресурсов нефти и газа российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ «RAO/CIS OFFSHORE», Санкт-Петербург, 12–15 сентября 2017.
12. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. 445 с.
13. Ржевкин С.Н. Курс лекций по теории звука. М.: Изд-во Московского университета, 1960. 337 с.
14. Акустика дна океана / Ред. Куперман У., Енсен Ф.М.: Мир, 1984. 456 с.
15. Акустика океана / Под ред. Л.М. Бреховских. М.: Наука, 1974. 694 с.
16. Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка: В 2 т. / Р. Шерифф, Л. Гелдарт; Пер. с англ. под ред. А.В. Калинина. М.: Мир, 1987.

References

1. Laverov N.P., Roslov Yu.V., Lobkovskiy L.I. et al. Prospects of bottom seismic exploration in the Russian Federation. *Arctic: Ecology and Economy*. 2011, 4, 4–13 (in Russian).
2. Ampilov Yu.P. Seismic exploration on the Russian shelf. *Offshore Russia*. 2015, 2, 8, 38–45 (in Russian).
3. Ampilov Yu.P. Equipment for marine seismic exploration: A window of opportunity for import substitution. *Offshore Russia*. 2017, 3, 38–45 (in Russian).
4. Mak-Quillin R., Bacon M., Barclay U. Introduction to seismic interpretation. M., Nedra, 1985. 309 p. (in Russian).
5. Kondratiev O.K. Seismic waves in absorbing media. M., Nedra, 1986. 174 p. (in Russian).
6. White J.E. Excitation and propagation of seismic waves. M., Nedra, 1986. 264 p. (in Russian).
7. Kostylev K.A., Zuev V.A. Technology of seismic exploration using an icebreaker vessel. *Proceedings R.E. Alekseev Nizhegorodskiy State Technical University*. 2015, 1, 108, 180–190 (in Russian).
8. Amundsen L., Landro M. Seismic imaging technology. Part IV. *GEOExPro*. 2008, 5, 5.
9. Pleskach M. WiMUST-a fleet of AUVs for Seismic. URL: www.hydro.international.com (date of access: 14.02.2023).
10. WiMUST. Widely Scalable Mobile Underwater Sonar Technology URL: wimust.isme.unige.it (date of access: 14.02.2023).
11. Toropov E.E., Gintovt A.R., Semenov V.B., Mashoshin A.I., Pashkevich I.V. A robotic complex for seismic exploration of hydrocarbons under ice // Proceedings of the 13th International Conference and Exhibition on the Development of oil and Gas resources of the Russian Arctic and the Continental shelf of the CIS countries “RAO/CIS OFFSHORE”. St. Petersburg, 12–15 January 2017 (in Russian).
12. Urick R.J. Principles of underwater sound. *McGraw-Hill*, 1975. 445 p.
13. Rzhavkin S.N. A course of lectures on the sound theory. Moscow, *Moscow State University*. 1960, 337 p. (in Russian).
14. Acoustics of the ocean floor. Eds. Kuperman U., Yensen F. Moscow, *Mir*, 1984, 456 p. (in Russian).
15. Ocean acoustics / Ed. by Brehovskikh L.M. M., *Nauka*, 1974. 694 p. (in Russian).
16. Shrif R.E., Geldart L.P. Exploration seismology. 2 volumes / R. Sheriff, L. Gerald. Moscow, *Mir*, 1987. (in Russian).

Об авторах

МАШОШИН Андрей Иванович, начальник научно-исследовательского центра АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», ORCID ID: 0000-0002-4785-966X, SPIN-код: 2017-6544, e-mail: aimashoshin@mail.ru
ЦВЕТКОВ Антон Валерьевич, заместитель начальника лаборатории — начальник группы АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», ORCID ID: 0000-0001-9441-333X, e-mail: atsvetkov@list.ru