

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Колигаев Сергей Олегович

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ
ОБРАБОТКИ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ МОРСКИХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ
КОМПЛЕКСОВ НА БАЗЕ СТАЦИОНАРНЫХ
ПРИЁМНЫХ И СИНТЕЗИРУЕМЫХ ИЗЛУЧАЮЩИХ
АНТЕННЫХ РЕШЁТОК**

1.6.9 – Геофизика (технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

Диссертация подготовлена на кафедре общей и прикладной геофизики
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Университет «Дубна»

Научный руководитель **Кузнецов Олег Леонидович**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Гогоненков Георгий Николаевич**, доктор технических наук, ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт», Советник генерального директора

Максимов Герман Адольфович, доктор физико-математических наук, АО «Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева», начальник отделения Промышленной акустики, начальник отдела Геоакустики

Токарев Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», геологический факультет, кафедра сейсмологии и геоакустики, ведущий научный сотрудник

Защита диссертации состоится 3 ноября 2023 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета МГУ.016.6 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, геологический факультет, ауд. 415.
E-mail: dsmsu0403@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д.27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.6/2653>

Автореферат разослан «02» октября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

К.М. Кузнецов

Общая характеристика работы

Актуальность исследований

Современный этап развития мировой экономики характеризуется началом крупномасштабного освоения природных ресурсов Мирового океана. В России, в первую очередь, это относится к изысканиям и разработкам нефтегазовых месторождений на континентальном шельфе.

В процессе освоения морских месторождений углеводородов можно выделить несколько этапов, а именно:

- разведка и оконтуривание месторождения;
- инженерно-геологические исследования в предполагаемых районах разработки месторождения, местах бурения и обустройства скважин, включая места размещения подводных добычных комплексов, а также трассы прокладки магистральных трубопроводов;
- бурение скважин;
- эксплуатация скважин с контролем процесса газо- и нефтедобычи и оценкой уровня выработки месторождения.

Практически все эти этапы, за исключением этапа бурения скважин, реализуются сейсмическими методами с использованием буксируемых в приповерхностном слое пространственно-развитых приемных сейсмокос и пневматических или электроискровых источников излучения.

Учитывая, тот факт, что существенная часть шельфовых месторождений углеводородов России находится в Арктической зоне, использование буксируемых геофизических средств носит исключительно сезонный и весьма затратный характер.

Одним из путей снижения затрат и обеспечения круглогодичной возможности проведения геофизических исследований на шельфовом месторождении может являться использование стационарной пространственно-развитых донных приемных сейсмокос.

Этим определяется актуальность отработки технологии использования в морских условиях стационарных приемных выносных частей в совокупности с мобильными (в любое время года) источниками излучения.

Степень разработанности

В последнее время даже вне зависимости от указанной выше проблемы освоения арктических шельфовых месторождений углеводородов предпринимаются попытки заглупления (приближения ко дну) приемных и излучающих систем в процессе проведения морских сейсмоакустических исследований.

Обоснование этого подхода активно ведется такими представителями геофизической школы МГУ как Ю.П. Ампилов¹, М.Ю. Токарев², В.Г. Гайнанов, показывающими, что приближение ко дну моря излучающей и приемной систем может существенно повысить эффективность морских геофизических исследований.

Целесообразность установки приемных систем непосредственно на дно с целью повышения эффективности геофизического исследования, отмечается в работах В.И. Богоявленского³, Г.А. Максимова, А.В. Гладилина.

Под руководством академика РАН Лобковского Л.И.⁴ разработана и внедрена на мелководном шельфовом месторождении Северного Каспия стационарная донная система непрерывного геодинамического мониторинга процесса нефтегазодобычи.

С установкой пространственно-развитых приемных систем на дно моря появляется возможность внедрения в морскую сейсморазведку ряда совершенно новых и перспективных технологий разведки полезных ископаемых. В первую очередь это относится к технологиям, использующим методы пространственной фильтрации как первичных, так и вторичных сейсмоакустических полей, научно-технические основы которых разработаны группой геофизиков во главе с О.Л. Кузнецовым, в частности:

- метод сейсмической локации очагов эмиссии (СЛОЭ);
- метод сейсмической локации бокового обзора (СЛБО).

Отличительной особенностью технологии СЛБО является то, что для изучения геологической среды используют помимо зеркально отраженных волн, как в стандартной сейсморазведке, рассеянные волны, уровень которых на 1-2 порядка меньше. Для их выделения необходимы многоэлементные стационарные приемные и синтезируемые излучающие антенны километровой размерности.

¹ Ампилов Ю.П., Батурин Д.Г. Новейшие технологии сейсмического мониторинга 4D при разработке морских месторождений нефти и газа. // Технология сейсморазведки. - 2013. - №2. – С. 31-36.

² Токарев М.Ю. Разработка технологии многоканальных сейсмоакустических исследований с заглубленной приемно-излучающей системой на мелководных акваториях. // Автореферат диссертации. 2016. 24с.

³ Богоявленский В.И., Максимов Г. А., Гладилин А.В. Способ сейсмического мониторинга процесса освоения месторождения углеводородов на шельфе. Патент №2602735. 2014.

⁴ Лобковский Л.И., Ковачев С.А., Миронюк С.Г., Левин С.В. Технические средства и методы обеспечения геодинамической безопасности на разрабатываемых шельфовых месторождениях углеводород. // Инженерная практика. 2012. № 12. С.82-85.

При размещении на морском дне низкочастотной сейсмоакустической пространственно-развитой антенной решетки, появляется возможность в режиме пассивной локации⁵ оценки текущего положения забоя, что особенно важно при проведении глубинного наклонно-направленного и горизонтального бурения.

Технология сейсмолокации очагов эмиссии позволяет производить разведку и контроль процессов разработки месторождения при использовании эффекта генерации углеводородной залежью собственных когерентных колебаний в диапазоне низких звуковых частот.

Обнаружение и пространственная локализация выявленной микросейсмической активности, на которую, собственно, ориентирована технология СЛОЭ, осуществляется аналогично СЛБО с использованием пространственно-развитых приемных антенных решеток, обеспечивающих возможность реализации многократного синфазного накопления и пространственной фильтрации сигналов.

Наличие развернутой стационарной донной сейсмоакустической системы в районе разработки месторождения создает возможность практической реализации 4D мониторинга уровня выработки месторождения, включая оценку текущего коэффициента нефтеотдачи.

Следует отметить, что локационные методы геофизических исследований (СЛБО и СЛОЭ) в полной мере соответствуют принципам, закладываемым в технологию «геосферной обсерватории», разрабатываемой под руководством академика РАН А.Н. Дмитриевского⁶ в Институте проблем нефти и газа РАН.

Поскольку сейсмолокационные технологии хорошо зарекомендовали себя в континентальной наземной геофизике, можно сделать вывод об актуальности проблемы реализации в морских условиях активных и пассивных методов локации неоднородностей с использованием пространственной фильтрации сейсмоакустических полей фазируемыми антенными решетками.

Основной проблемой переноса данных технологий с континентальных условий на морские является проблема формирования желательной и оценки реальной конфигурации апертур

⁵ Максимов Г. А., Гладилин А.В., Лекомцев В.М. Способ определения положения бурового инструмента в процессе бурения. Патент №2572668. 2014.

⁶ Дмитриевский А.Н., Еремин Н.А., Филиппова Д.С., Сафарова Е.А. Цифровой нефтегазовый комплекс России. // Георесурсы, Спецвыпуск. 2020. С. 32–35.

излучения и приема для эффективной пространственной обработки сигналов.

При проведении работ на суше эти задачи довольно просто решаются геодезическими методами, в том числе с использованием спутниковых систем позиционирования.

Перемещение приемных и излучающих систем в водную толщу лишает этой возможности. Сложность задачи позиционирования, особенно приемных элементов пространственно-развитых антенных решеток таких масштабов, усугубляется тем обстоятельством, что решать ее необходимо в мелководных условиях шельфовой зоны, где в полной мере проявляется волноводный, дисперсионный характер распространения гидроакустических сигналов.

Целью диссертационной работы является реализация в морских условиях сейсмолокационных геофизических методов, основанных на пространственной фильтрации сейсмоакустических полей с использованием фазирюемых антенных решеток.

Основные задачи исследования:

1. Разработка основных элементов технологии морской сейморазведки, основанной на пространственной фильтрации первичных и вторичных сейсмоакустических полей морскими геофизическими комплексами (сейсмолокаторами) на базе стационарных пространственно-развитых донных приемных сейсмоакустических антенн и излучающих антенн с синтезированной апертурой.

2. Разработка программного комплекса для обеспечения реализации в морских условиях современных технологий геофизических исследований, основанных на пространственной фильтрации сейсмоакустических полей морскими геофизическими комплексами на базе стационарных донных приемных и синтезируемых излучающих антенных решеток.

Научная новизна

1. Разработан способ совместного обнаружения и оценки координат (позиционирования) источника излучения, основанный на использовании параметров функции взаимной корреляции сигналов на элементах пространственно-распределенной приемной системы.

2. Обосновано использование меры обусловленности матрицы навигационных коэффициентов в качестве критерия оптимальности при задании (выборе) конфигурации реперных точек в системах позиционирования дальномерным и разностно-дальномерным методами.

3. Показана необходимость и возможность учета передаточной характеристики акустического волновода как среды распространения сигналов при оценке координат приемных элементов приемной системы, установленной в мелководной шельфовой зоне.

4. Разработана технология оценки параметров передаточной характеристики волновода, как среды распространения поверхностных сейсмических сигналов и низкочастотных гидроакустических сигналов в мелком море, а также технология оценки параметров ее математической модели.

5. Показана возможность и эффективность реального использования в качестве геоакустической модели волноводного распространения двуслойной модели Пекериса в обеспечение согласованной обработки как низкочастотных гидроакустических, так и поверхностных сейсмических сигналов.

Защищаемые положения

1. Технология позиционирования элементов стационарной донной пространственно-развитой приемной системы сейсмолокатора в диапазоне его рабочих частот, включающая оценку и использование передаточной характеристики среды распространения гидроакустического сигнала, без дополнительных средств обеспечивает необходимую точность позиционирования приемной апертуры для реализации методов активной и пассивной сейсмолокации.

2. Технология динамического позиционирование источника излучения в процессе синтезирования излучающей апертуры сейсмолокатора с использованием приемных элементов собственной стационарной донной пространственно-развитой приемной системы по критерию максимального уровня корреляции прямого гидроакустического зондирующего сигнала и минимального значения меры обусловленности навигационной матрицы обеспечивает требуемую точность позиционирования «элементов» синтезируемой излучающей апертуры для реализации методов активной сейсмолокации.

3. Пакет программ обработки сейсмических и гидроакустических сигналов («ПОСиГС»), обеспечивает сквозную технологию морской сейсморазведки, основанной на пространственной фильтрации первичных и вторичных сейсмоакустических полей морскими геофизическими комплексами на базе пространственно-развитых стационарных приемных и синтезируемых излучающих антенн.

Практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы позволяют:

- реализовать в морских условиях современные методы геофизических исследований, таких как СЛЮЭ, СЛБО и др. на базе стационарных пространственно-развитых донных приемных антенных решеток и излучающих антенных решеток, синтезируемых буксируемым гидроакустическим излучателем, с использованием пакета программ обработки сигналов «ПОСиГС»;

- расширить функциональные возможности и повысить тактико-технические характеристики сейсмоакустических и гидроакустических систем наблюдения при использовании разработанного способа совместного обнаружения и позиционирования источника излучения, а также алгоритмов обработки информации, согласованных с передаточной характеристикой среды распространения, параметры модели которой определяются разработанными в диссертационной работе методами пространственно-частотно-временной фильтрации.

Достоверность полученных результатов

1. Все алгоритмы пространственно-временной обработки информации, представленные в настоящей работе, апробировались методами математического моделирования, аппарат которого заложен в пакете программ «ПОСиГС». Результаты математического моделирования полностью подтверждают работоспособность и правильность функционирования предложенных алгоритмов обработки информации.

2. Пакет программ «ПОСиГС» с реализованными в нем алгоритмами позиционирования неоднократно использовался для пространственной калибровки (оценки координат приемных элементов) выносных частей стационарного гидроакустического комплекса подводного наблюдения МГК-608М.

3. Способ обнаружения и определения координат источника сейсмоакустического сигнала отработан на макетном образце мобильной многоканальной системы сбора и передачи сейсмических сигналов, выносная часть которой устанавливалась в различных сезонных условиях в различных типах грунтов, с положительными результатами по обнаружению сигналов и локализации их источников.

4. Способ обнаружения и оценки координат источника излучения применительно к определению текущих координат излучателя в процессе синтезирования излучающей апертуры экспериментально отработан в натуральных условиях морского полигона.

5. Технология оценки параметров передаточной характеристики реального акустического волновода, как среды распространения гидроакустических сигналов, и технология оценки параметров ее математической модели отработана на большом объеме экспериментальных данных, полученных на обширной акватории Баренцева моря.

6. Алгоритмы пространственно-временной обработки, реализующие в пакете программ «ПОСиГС» современные геофизические методы, такие как сейсмолокация очагов эмиссии (СЛОЭ) и сейсмолокация бокового обзора (СЛБО), прошли апробацию и верификацию на разрабатываемых месторождениях в процессе обширных геофизических исследований, включая мониторинг гидроразрыва пласта (ГРП).

Методология и методы исследования

В диссертационной работе использовались методы математического моделирования, натурального эксперимента и обработки данных геофизических исследований на реальных месторождениях.

Математическое моделирование, обработка данных экспериментальных и геофизических исследований выполнено в пакете программ «ПОСиГС».

Личный вклад автора заключается в разработке методов и алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов, разработке программ обработки сейсмических и гидроакустических сигналов («ПОСиГС»), проведении математического моделирования, постановке и проведении натуральных экспериментальных исследований, обработке и интерпретации результатов.

Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на следующих конференциях: Научно-практической конференции «Гидроакустическая связь и гидроакустические средства аварийно-спасательного назначения», Волгоград, 2005г.; Научно-практической конференции «Современные технологии создания средств наблюдения», Дубна, 2006г.; XIV научной конференции преподавателей, студентов, аспирантов и молодых специалистов Международного университета «Дубна», Дубна, 2007г.; Всероссийской научно-технической конференции «Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана», Новосибирск, 2010г., 2012г.; Научно-практической конференции «Сейсмические технологии-2016», Москва, 2016г.; Пятой международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование: Maresedu-2016»,

Москва, 2016г.; Международной научно-технической конференции «Геофизическая разведка-2017», Дубна, 2017г.; Научно-практической конференции «Сейсмические технологии-2017», Москва., 2017г.; 36-ой Международной конференции по космическим лучам (ICRC2019), Мэдисон, Висконсин, США, 2019г.; Девятой международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование: Maresedu-2020», Москва, 2020г.; XVII Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований», (МСОИ-2021), Москва, 2021г.; IX Международной научно-технической конференции «Освоение ресурсов нефти и газа Российского шельфа: Арктика и Дальний Восток (ОМНР-2023), 2023г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 работ в рецензируемых журналах. Из них 5 публикаций представлены в научных журналах, включённых в международные базы цитирования Web of Science (WoS), Scopus, RSCI (РИНЦ), в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности, а 4 статьи опубликованы в журналах рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ.

Все основные результаты работы отражены в сборниках трудов указанных выше всероссийских и международных конференций.

На положения, выносимые на защиту, получено 3 патента на изобретение и 3 свидетельства о государственной регистрации программ.

В совместных публикациях использованы результаты математического моделирования, обработки результатов натурных экспериментов и геофизических исследований на реальных месторождениях, выполненных автором лично.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержит 151 страницу машинописного текста и 105 рисунков. Список литературы включает 101 наименование.

Благодарности

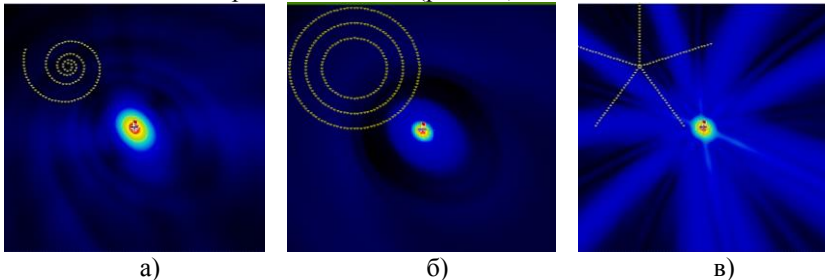
Автор приносит искреннюю благодарность научному руководителю д.т.н., профессору Олегу Леонидовичу Кузнецову, к.т.н., доценту Игорю Алексеевичу Чиркину, д.т.н., профессору Валерию Гарифьяновичу Гайнанову, сотрудникам кафедры общей и прикладной геофизики университета «Дубна».

С особой теплотой и благодарностью вспоминает ушедшего из жизни своего первого научного руководителя д.т.н., профессора Владислава Дмитриевича Неретина.

Основное содержание работы

Во **Введении** сформулированы актуальность, цель и основные задачи, методология и научная новизна исследования, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных в ходе исследования результатов, достаточность их апробации и личный вклад автора.

В **главе первой** рассмотрены вопросы пространственной фильтрации геофизических полей (сейсмических и гидроакустических). Представлены результаты математического моделирования эффективности различных конфигураций планарных приемных антенных решеток. Показано, что наилучшими по параметру коэффициента концентрации является апертура в виде вложенных концентрических колец (рис.1-б).



а) спираль Архимеда, б) – концентрические окружности, в) звезда.

Рис. 1. Пространственный отклик планарной антенны:

а)- спираль Архимеда, б) – концентрические окружности, в) звезда.

Однако с учетом того, что функционирование геофизического комплекса должно осуществляться в большинстве случаев в условиях шумящей морской буровой или добычной платформы, оптимальной конфигурацией апертуры стационарной приемной антенной решетки, минимизирующей влияние этих шумов при обеспечении высокой разрешающей способности, является конфигурация типа «Звезда» (рис.1-в). Данная конфигурация, хотя и характеризуется более высоким уровнем бокового поля в нижнем полупространстве, но обеспечивает максимальную помехозащищенность относительно основного шумящего объекта (платформы, располагающейся в центре апертуры) и обладает максимальной технологичностью установки, что особенно важно в морских условиях.

В разделе 1.3 рассмотрены факторы, влияющие на пространственное развитие антенн. Показано, что размер антенны ограничивается интервалом пространственной корреляции сигнала, определяемым свойствами среды его распространения.

В разделе 1.4 рассмотрены особенности реализации методов пространственной фильтрации и, в частности, синтеза излучающей апертуры в морских условиях.

В разделе 1.5 представлены результаты математического моделирования сейсмолокации бокового обзора с использованием приемной линейной донной стационарной антенной решетки и излучающей антенны с синтезированной апертурой (Рис.2).

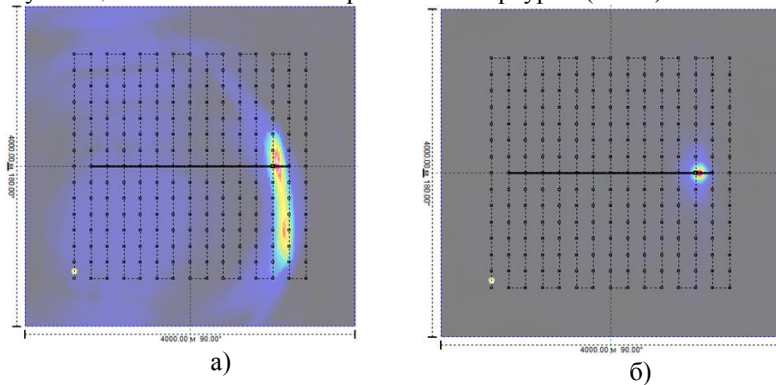


Рис. 2. Пространственный отклик линейной приемной антенны при воздействии точечным излучателем (а) и излучателем с синтезированной апертурой (б).

Результатами моделирования продемонстрирована реальная возможность решения задачи обнаружения и локализации искомой неоднородности с использованием минимального набора технических средств, а именно, даже одной линейной донной приемной антенны и одного буксируемого излучателя.

Вторая глава посвящена рассмотрению методов позиционирования стационарной донной приемной антенной решетки и динамического позиционирования излучателя применительно к процессу синтеза излучающей апертуры. Исследованы дальномерный (ДМ) и разностно-дальномерный методы (РДМ) пространственного позиционирования с длинной базой. Рассмотрены возможные математические методы решения задачи позиционирования в том числе: алгебраический метод, метод наименьших квадратов, метод Ньютона.

Показано, что дальномерным методом целесообразно оценивать координаты только одного приемного элемента, выбираемого в качестве опорного.

Координаты остальных приемных элементов целесообразно оценивать разностно-дальномерным методом позиционирования. Разностно-дальномерный метод позиционирования позволяет обеспечить более высокую точность оценки относительных координат приемных элементов за счет использования функции взаимной корреляции сигналов для оценки относительных задержек, возможности линеаризации системы уравнений и использования метода наименьших квадратов для ее решения.

Фактором, определяющим точность оценок координат, является мера обусловленности навигационной матрицы. Поэтому для повышения точности позиционирования необходимо конфигурировать реперные точки таким образом, чтобы минимизировать число обусловленности матрицы навигационных коэффициентов.

Предлагаемая процедура позиционирования излучателя в процессе синтезирования излучающей апертуры, использующая в качестве реперов приемники собственной стационарной донной приемной системы, создает условия для оптимизации системы уравнений и соответственно повышения точности оценок координат, как по уровню корреляции сигналов, так и по мере обусловленности матрицы навигационных коэффициентов (*cond*).

На рис. 3 и 4 представлены результаты статистического моделирования РДМ позиционирования источника излучения и показана возможность повышения точности оценки его координат (dx, dz) за счет незначительного изменения конфигурации приемной системы, ограниченной радиусом r относительно источника.

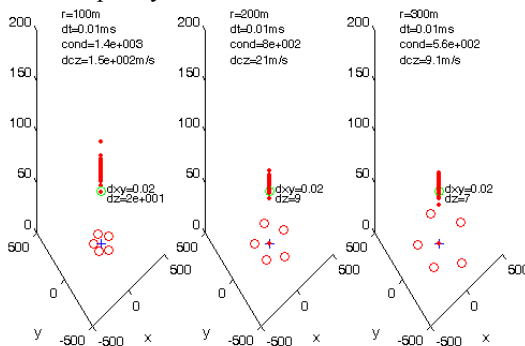


Рис. 3. РДМ (приемная система по периметру района).

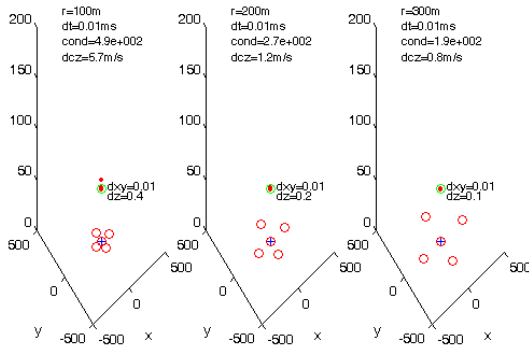


Рис.4. РЕМ (элемент приемной системы установлен внутри района).

В **третьей главе** представлено описание пакета программ обработки сейсмо- и гидроакустических сигналов «ПОСиГС», предназначенного для решения в морских условиях всего комплекса программно-алгоритмических задач, связанных с реализацией современных методов геофизических исследований, основанных на пространственной фильтрации первичных и вторичных сейсмоакустических полей.

Показано, что «ПОСиГС» обеспечивает возможность ввода, регистрации и обработки информации от многоканальных геофизических комплексов. В нем реализованы все основные функциональные процедуры, необходимые для решения морских геофизических задач, в частности:

- частотно-временной обработки многоканальной информации, включая спектральный и корреляционный анализ;
- оценки параметров передаточной характеристики дисперсионной среды распространения сейсмоакустических и гидроакустических сигналов, в том числе зоны малых скоростей и мелководной шельфовой зоны;
- оценки координат приемных элементов стационарных сейсмоакустических антенн на базе дальномерного и разностно-дальномерного методов позиционирования, с использованием методов линейной и нелинейной алгебры;
- оценки текущих координат источника излучения (динамического позиционирования) с использованием собственной приемной системы и реализации функции формирования синтезированной излучающей апертуры;
- пространственной фильтрации сейсмоакустических полей на базе когерентной обработки сигналов пространственно-

распределенной приемной системы, в том числе возбуждаемых синтезированной излучающей апертурой, обеспечивающей реализацию в морских условиях современных локационных технологий геофизических исследований.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных с использованием разработанного пакета программного обеспечения «ПОСиГС».

В разделе 4.1 представлены результаты позиционирования элементов протяженных стационарных приемных антенн в морских условиях. В качестве источника излучения используется низкочастотный пневматический излучатель (пневмопушка). Экспериментально показана возможность существенного расширения интервала пространственной корреляции сигналов и соответственно повышения точности оценки как абсолютных, так и относительных координат элементов приемной антенны, путем предварительной обработки сигналов, согласованной с передаточной характеристикой среды их распространения.

На рис.5 и 6 представлены дисперсионные характеристики групповой и фазовой скорости, полученные в результате анализа сигналов импульсного источника на глубине $Z_{и}=50\text{м}$.

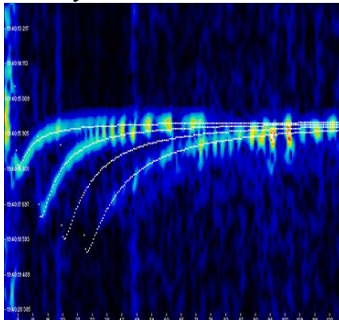


Рис.5 Дисперсионная характеристика групповой скорости ($Z_{и}=50\text{м}$)

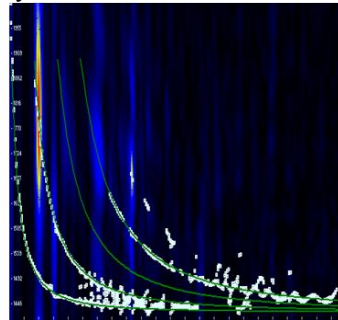


Рис.6 Дисперсионная характеристика фазовой скорости ($Z_{и}=50\text{м}$)

На дисперсионных характеристиках отчетливо видно отсутствие третьей моды при явном присутствии четвертой и даже пятой моды. Отсутствие третьей моды в сигнале, источник излучения которого помещен на глубину 50м, объясняется тем обстоятельством, что именно на этой глубине собственная функция третьей моды переходит через ноль.

Применение частотно зависимой скорости распространения приводит к сжатию сигналов и повышению среднего уровня корреляции сигналов на приемных элементах антенны (Рис. 7), что позволяет повысить точность оценки как абсолютных, так и относительных координат приемных элементов (рис. 8).

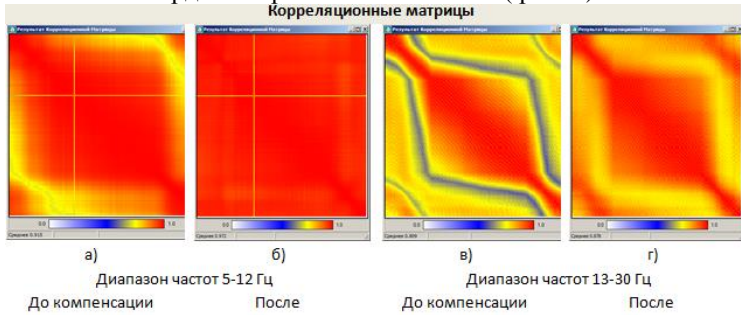


Рис. 7. Повышение уровня пространственной корреляции

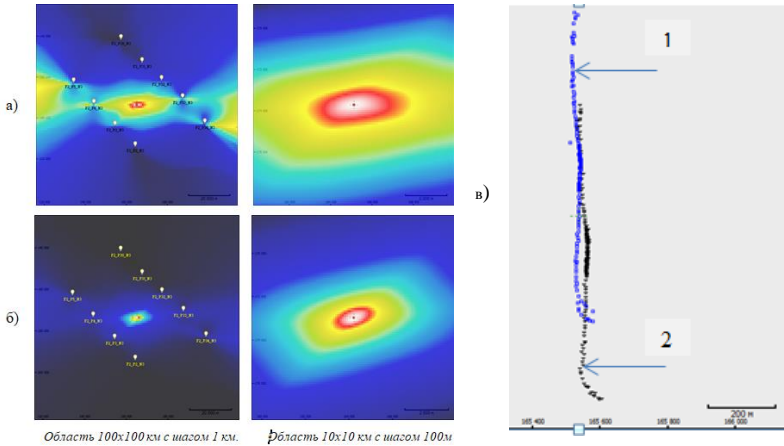


Рис. 8. Результат первой и итоговой итерации оценок абсолютных (а, б) и относительных (в) координат приемной антенны.

Учет частотной зависимости фазовой скорости приводит к повышению коэффициента концентрации антенны (рис.9).

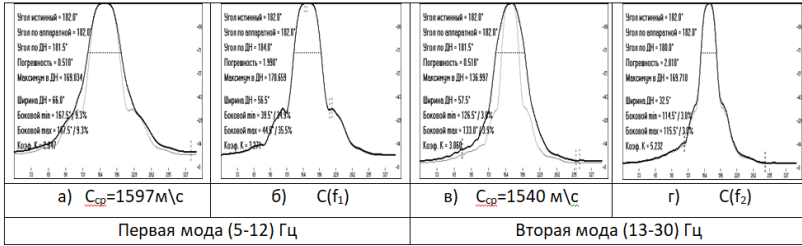
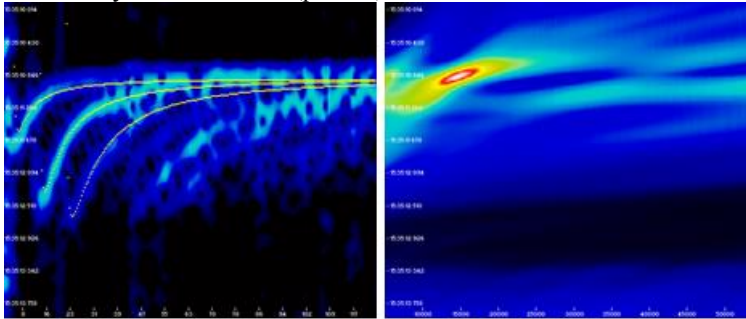
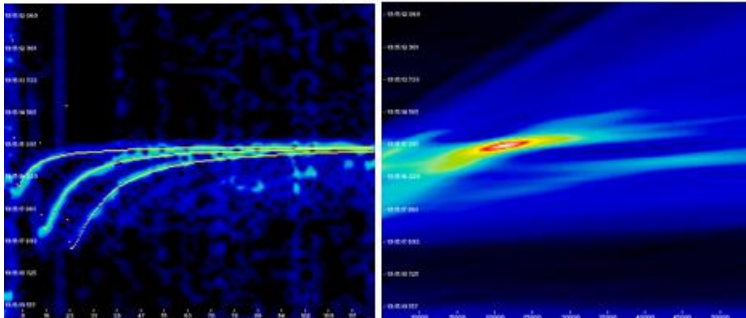


Рис.9 Повышение коэффициента концентрации антенны.

Наличие адекватной модели передаточной характеристики дисперсионной среды распространения сейсмо- и гидроакустических сигналов обеспечивает принципиальную возможность по принятому даже одиночным приемником сигналу оценить расстояние до источника излучения сигнала (рис.10).



а) Дальность $L=14661\text{ м}$



б) Дальность $L=21165\text{ м}$

Рис. 10. Дисперсионные характеристики групповой скорости и оценки дальности ($H=125\text{ м}$)

В разделе 4.1.4. показана реальная возможность повышения эффективности пространственной фильтрации поверхностных

сейсмоакустических полей использованием в качестве математической модели среды их распространения волновода Пекериса (рис.11).

На рис. 12 представлены результаты согласованной и несогласованной пространственной фильтрации линейной 24-х элементной сейсмоакустической антенной длиной $L=57.5$ метра сигнала низкочастотного импульсного источника излучения.

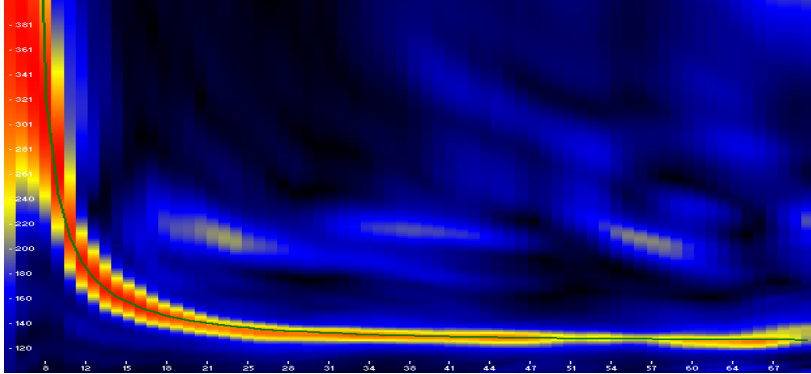
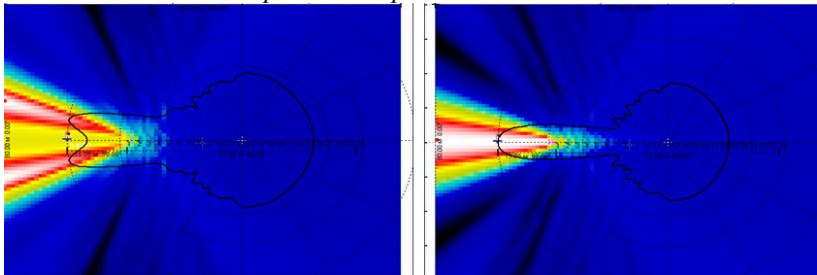


Рис.11. Дисперсия реальной и модовой (по Пекерису) фазовой скорости поверхностной волны.



а) Несогласованная обработка

б) Согласованная обработка

Рис. 12 Локализация источника поверхностных сейсмических волн.

Использование частотно-зависимой скорости распространения в соответствии с модельной дисперсионной характеристикой привело к повышению коэффициента концентрации, устранению неоднозначности оценки углового положения источника излучения, и повышению коэффициента усиления антенны на 25 %.

В разделе 4.2 представлены результаты исследований по позиционированию источника излучения.

В разделе 4.2.1. экспериментально подтверждена принципиальная возможность и эффективность использования

собственной приемной системы для оценки текущих координат источника излучения в процессе синтезирования его апертуры.

В частности, на рис. 13 и 14 представлены результаты позиционирования пневмопушки методом сеток и методом наименьших квадратов, демонстрирующие как, даже при столь неоптимальной конфигурации приемных элементов, достигается высокая точность оценки координат источника излучения.

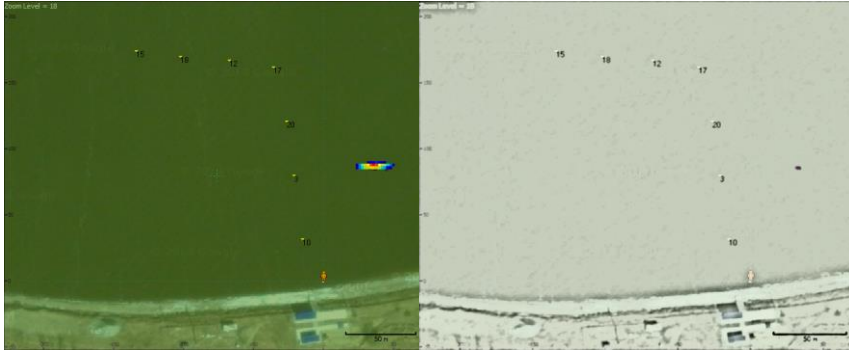


Рис. 13. Метод сеток

Рис.14. МНК

В разделе 4.2.2. даны результаты экспериментальных исследований корреляционного способа обнаружения и оценки координат источника излучения применительно к сейсмоакустической охранной системе.

На рисунке 15 представлены результаты обнаружения и сопровождения «нарушителя» в процессе пресечения «рубежа охраны», сформированного 16-ти элементной антенной.

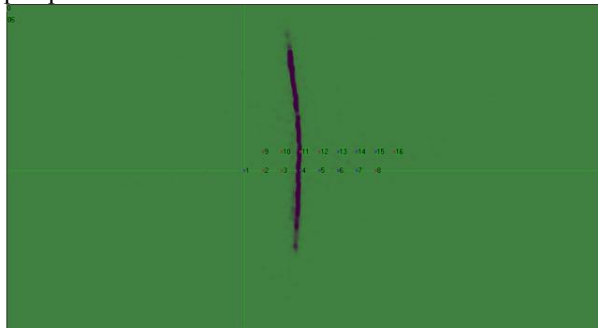


Рис. 15. Трасса отметок «нарушителя»

В разделе 4.3 представлены результаты применения разработанного пакета программ непосредственно для реализации методов СЛБО и СЛОЭ.

На рис. 16 представлены результаты пространственной фильтрации сигналов перфорации скважины планарными антенными решетками типа «Звезда» и «Окружности».

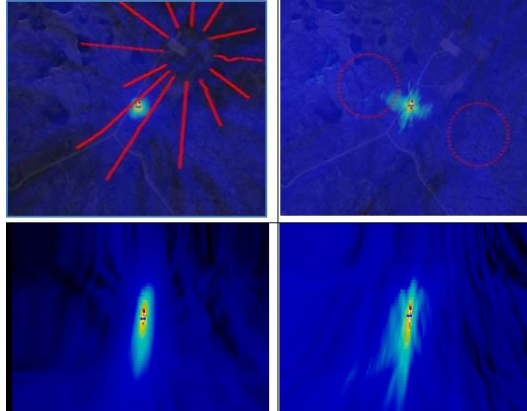


Рис. 16. Локализация места перфорации в горизонтальной и вертикальной плоскости

На рис. 17. хорошо видны уровни и направления развития трещиноватости на различных горизонтах.

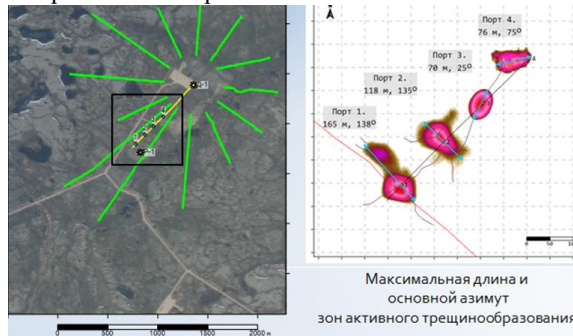


Рис. 17. Мониторинг ГРП

Программно-алгоритмическое обеспечение для активной сейсмолокации отработано на реальных данных, полученных в штате Техас (США) в процессе комплексных сейсмических исследованиях пространственного (3D) распределения открытой трещиноватости горных пород в заданном объеме.

Объектом исследований являлась геологическая среда, имеющая следующие размеры: площадь прямоугольной формы 10x5 миль, глубинный интервал от -21000 фт до -3000 фт.

Схема наблюдения на площади исследования, представленная на рис. 18, была разбита на отдельные идентичные (по форме) однопозиционные локаторы, у которых центры апертур излучения и приема совмещены (рис. 19), что позволило изучать каждую дискретную точку геологической среды с различных направлений и с высокой кратностью обзора.

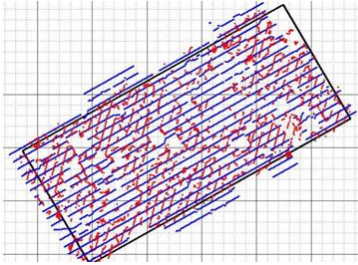


Рис. 18. Все пункты излучения и приема

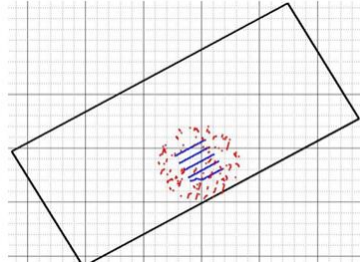


Рис. 19. Локатор №67

В частности, представленный на рис. 19 локатор, конфигурирован приемной частью из 140 приемников и излучающей частью синтезируемой 194 точками отстрела.

На рис. 20 представлены ортогональные сечения исследуемого пространства в совместном поле отраженных и рассеянных волн.

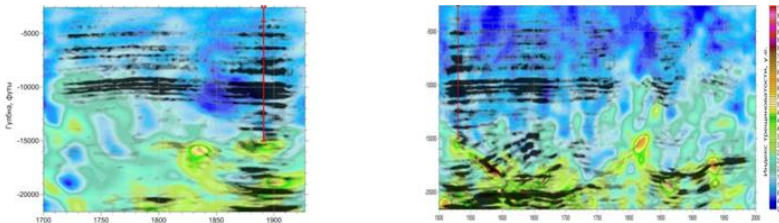


Рис. 20. Комбинированный вертикальный разрез нормального (ч/б) и бокового (цветной) обзора через рекомендованную скв. 1

По результатам комплексного исследования поля отраженных и рассеянных волн были рекомендованы участки бурения с максимально возможным притоком нефти.

Заключение

Целью диссертационной работы является обеспечение возможности реализации в морских условиях современных локационных методов геофизических исследований, основанных на пространственной фильтрации сейсмоакустических полей с использованием фазируемых стационарных пространственно-развитых донных приемных сейсмоакустических антенн и излучающих антенн с синтезированной апертурой.

Для достижения поставленной цели обозначены задачи разработки технологии морской сейсморазведки и ее программно-алгоритмического обеспечения.

Критическими элементами технологии, реализующей такого рода локационные методы, применительно к морским условиям являются позиционирование (оценка координат) элементов стационарных донных приемных антенн и динамическое позиционирование излучателя в процессе синтеза апертур излучающих антенн.

В рамках разработанной технологии предлагается:

- решать указанные задачи позиционирования в рабочем диапазоне частот сейсмолокаторов без усложнения систем сбора и передачи информации, расширения частотного диапазона и привлечения дополнительных технических средств;

- использовать излучатель активного сейсмолокатора для позиционирования элементов приемной выносной части (апертуры приемной антенны), которую в дальнейшем использовать для динамического позиционирования этого же излучателя в процессе синтеза апертуры излучающей антенны.

Результатами диссертационного исследования показано, что:

- для решения задачи оценки координат приемных элементов пространственно-развитых донных стационарных сейсмоакустических антенн целесообразно использовать дальномерного и разнодно-дальномерного метода позиционирования с длинной базой с учетом дисперсионной характеристики скорости распространения информационных сигналов;

- по крайней мере, в условиях Баренцева моря, дисперсионные характеристики скорости распространения гидроакустических сигналов в рабочем диапазоне сейсмической локации эффективно определяются двуслойной моделью Пекериса;

- этой же моделью может быть определена и дисперсионная характеристика скорости распространения поверхностной волны;

- оценка текущих координат излучателя в процессе синтеза апертуры и мониторинг толщи дна при

реализации активного сейсмолокатора, могут осуществляться одновременно одной и той же приемной сейсмоакустической антенной путем регистрации и анализа прямого гидроакустического сигнала и рассеянно-отраженного сейсмического сигналов соответственно;

- для минимизации погрешности оценок координат элементов стационарной донной приемной антенны необходимо использовать такую геометрию точек излучения, при которой минимизируется число обусловленности навигационной матрицы;

- для минимизации погрешности оценок координат излучателя в процессе синтезирования апертуры излучающей антенны необходимо использовать приемные элементы с максимальным уровнем корреляции прямого гидроакустического сигнала, пространственное положение которых минимизирует число обусловленности навигационной матрицы для текущего положения излучателя.

Экспериментально показано, что созданный в ходе диссертационной работы Программный комплекс «ПОСиГС» решает практически все задачи, связанные с реализацией в морских условиях современных сейсмоакустических локационных методов, основанных на пространственной фильтрации сейсмоакустических полей и может быть использован в процессе поиска, разработки и контроля эксплуатации шельфовых месторождений углеводородного сырья.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук

1. **Колигаев С.О.**, Колигаев О.А. Некоторые особенности позиционирования объектов в гидроакустических и сейсмоакустических информационных системах // Геоинформатика – 2010. - №4. – С. 23-27. RSCI. Импакт-фактор РИНЦ: 0,537. (0.375 п.л., авторский вклад 70%).
2. Кузнецов О.Л., Гайнанов В.Г., Радван А.А., Чиркин И.А., Ризанов Е.Г., **Колигаев С.О.** Применение сейсмических рассеянных и эмиссионных волн для повышения эффективности освоения месторождений углеводородов // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2017. – № 4. – С. 54-59. RSCI. Импакт-фактор РИНЦ: 0,411. (0.42 п.л., авторский вклад 30%).
3. Чиркин И.А., Ризанов Е.Г., **Колигаев С.О.** Мониторинг микросейсмической эмиссии – новое направление развития сейсморазведки // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2014.

- Т. 49. – № 3. С. 6-15. ВАК/МГУ. Импакт-фактор РИНЦ: 0,083. (0.6 п.л., авторский вклад 35%).
4. Kouznetsov O.L., Lyasch Y.F., Chirkin I.A., Rizanov E.G., LeRoy S.D., **Koligaev S.O.** Long-term monitoring of microseismic emissions: Earth tides, fracture distribution and fluid content// Interpretation.- 2016.- V4.- №2. - P. T191-T204. Scopus. SJR: 0.662. (0.85 п.л., авторский вклад 25%).
5. Kuznetsov O, Chirkin I, Radwan A, Ismail A, Lyasch Y, LeRoy S, Rizanov E, Koligaev S, Abdelmaksoud A. Man-made earthquakes prevention through monitoring and discharging of their causative stress-deformed states // Arabian Journal of Geosciences. - 2021. - Vol.- 4. № 14. - Article №288. - P. 1-11. Scopus. SJR: 0.406. (0.6 п.л., авторский вклад 15%).

Научные статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ

6. Чиркин И.А., Ризанов Е.Г., Каляшин С.В., **Колигаев С.О.**, Радаван А.А. Мониторинг микросейсмической эмиссии для обеспечения экологической безопасности разведки и разработки нефтяных месторождений на акватории // Вестник РАЕН. – 2014. – Т. 14. – №4. – С. 8-14. Импакт-фактор РИНЦ: 0,171. (0.4 п.л., авторский вклад 20%).
7. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Радван А.А., Ризанов Е.Г., **Колигаев С.О.** Сейсмические исследования на разрабатываемых месторождениях нефти и газа (промысловая сейсмометрия) // Каротажник. – 2016. – Т. 270, № 12. – С. 39–66. Импакт-фактор РИНЦ (2016):0.254 (1.8 п.л., авторский вклад 15%).
8. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Твердохлебов Л.И., Эльжаев А.С., Ризанов Е.Г., **Колигаев С.О.**, Юров А.А., Вьюшкина М.В. Инновационные технологии сейсморазведки // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2020. – №4 (100). С. 68-75. Импакт-фактор РИНЦ: 0,326. (0.5 п.л., авторский вклад 20%).
9. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Твердохлебов Л.И., Гурьев С.В., Юров А.А., Ризанов Е.Г., **Колигаев С.О.**, Lyasch Y.F., LeRoy S.D., Radwan A.A. Сланцевая революция: мифы, рифы и перспективы. Новая концепция освоения сланцевых месторождений нефти и газа. // Вестник РАЕН. – 2022. – Т. 22. – № 4.—С. 60–68. Импакт-фактор РИНЦ: 0,171. (0.5 п.л., авт. вклад 10%).

Иные публикации

10. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Ризанов Е.Г., **Колигаев С.О.** Долговременный мониторинг микросейсмической эмиссии – новые возможности изучения геологической среды//Вестник Международного университета природы, общества и человека "Дубна". Серия "Естественные и инженерные науки". - 2014. - № 2 (30). - С. 47 – 61, (0.82 п.л., авторский вклад 25%).
11. **Колигаев С.О.**, Чиркин И.А., Ризанов Е.Г. Сейсмические антенны // Труды конференции «Сейсмические технологии-2016». М. - 2016 - С. 49-52 (0.3 п.л., авторский вклад 75%).
12. **Колигаев С.О.**, Колигаев О.А. Некоторые практические результаты использования волновода Пекериса при исследовании низкочастотных гидроакустических полей в Баренцевом море// Материалы XVII Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований» (МСОИ-2021). - Москва, - 2021. Т.1 С. 99-104 (0.3 п.л., авторский вклад 75%).

Патенты на изобретения

1. **Колигаев С.О.** Способ обнаружения и определения текущего местоположения нарушителя охраняемой зоны. Патент РФ № 2311686. 2007.
2. Астахова Н.В, Добрянский В.М. Колигаев О.А., **Колигаев С.О.**, Крайнов А.Б, Лобов Р.В., Шикалов А.А. Способ морской сейсморазведки. Патент РФ №2502091 - 2013. (авторский вклад 45%).
3. Астахова Н.В, Добрянский В.М., Колигаев О.А., **Колигаев С.О.**, Крайнов А.Б, Лобов Р.В., Шикалов А.А. Способ оценки геологической структуры верхних слоев дна. Патент РФ №2503037 – 2013. (авторский вклад 20%).

Свидетельства о регистрации программ

1. **Колигаев С.О.** Пакет обработки сейсмо- и гидроакустических сигналов - «ПОСиГС». Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2015662772. 2015.
2. **Колигаев С.О.**, Колигаев О.А., Колтин Г.П. Регистрация, обработка и анализ экспериментальной информации (функциональное ПО) // Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2015617212. 2015. (авторский вклад 70%).
3. **Колигаев С.О.**, Колтин Г.П. Синхронизация работы с береговым комплексом калибруемой системы // Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2015617220. 2015. (авторский вклад 75%).