

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XXII Международный научный конгресс

Сборник материалов в 9 т.

Т. 2

Международная научная конференция

**«НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ГОРНОЕ ДЕЛО.
НАПРАВЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА,
РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. ЭКОНОМИКА.
ГЕОЭКОЛОГИЯ»**

№ 2

Новосибирск
СГУГиТ
2026

Ответственные за выпуск:

Доктор технических наук, академик РАН, профессор, научный руководитель
АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального
сырья» (АО «СНИИГГиМС»), научный руководитель Института нефтегазовой геологии
и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск
М. И. Энов

Доктор физико-математических наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН,
директор Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск
В. Н. Глинских

Кандидат технических наук, директор Института горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
г. Новосибирск
А. П. Хмелинин

Доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН,
заместитель директора по научной работе Института нефтегазовой геологии
и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск
Б. Л. Никитенко

Доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН,
заведующий лабораторией Института нефтегазовой геологии
и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск
Л. М. Буриштейн

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XXII Международный научный конгресс,
18–22 мая 2026 г., Новосибирск : сборник материалов в 9 т. Т. 2: Междуна-
родная научная конференция «Недропользование. Горное дело. Направления
и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных иско-
паемых. Экономика. Геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2026. № 2. –
293 с. – ISSN 2618-981X. – Текст : непосредственный.

DOI 10.33764/2618-981X-2026-2-2

В сборнике опубликованы материалы XXII Международного научного конгресса
«Интерэкспо ГЕО-Сибирь», представленные на Международной научной конференции
«Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разра-
ботки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

Издание может содержать сведения об иностранных агентах

А. С. Ельчин¹✉, И. С. Сизиков^{1,2}, Д. А. Носов^{1,2}, А. Ю. Тимиртдинов^{1,2}

Комплекс исследований в рамках модернизации абсолютных баллистических гравиметров типа ГАБЛ/ГБЛ

¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Публично-правовая компания «Роскадастр», г. Москва, Российская Федерация

e-mail: elchinas@iae.nsk.su

Аннотация. В данной статье представлены наиболее важные результаты комплекса работ в рамках модернизации абсолютных баллистических гравиметров типа ГАБЛ/ГБЛ. Результат исследований с альтернативным расположением магнитоэлектрического насоса исключает его влияние на движение свободно падающего тела. Разработана система автоматического определения высоты гравиметра с использованием лазерных датчиков, которая улучшает метрологические характеристики гравиметра. Результаты испытаний показали, что модернизированная система выставления гравиметра по вертикали является более точной. Проведен расчёт поправки за самопритяжение для гравиметров типа ГАБЛ/ГБЛ.

Ключевые слова: гравиметрия, самопритяжение, система выставления гравиметра по вертикали

A. S. Elchin¹✉, I. S. Sizikov^{1,2}, D. A. Nosov^{1,2}, A. Yu. Timirtdinov^{1,2}

Researches within the modernization of absolute ballistic gravimeters of the GABL/GBL type

¹Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²Public Law Company “Roskadastr”, Moscow, Russian Federation

e-mail: elchinas@iae.nsk.su

Abstract. This paper presents the most significant results obtained during the modernization of absolute ballistic gravimeters of the GABL/GBL type. The results of studies with an alternative location of the ion pump exclude its influence on the motion of a free-falling body. A system for automatic determination of the gravimeter’s height using laser sensors has been developed, which enhances the metrological characteristics of the gravimeter. Test results showed that the upgraded vertical gravimeter alignment system is more accurate. A self-gravity correction was calculated for GABL/GBL gravimeters.

Keywords: gravimetry, self-attraction, gravimeter vertical alignment system

Введение

С целью открытия и определения запасов месторождений (газовых или нефтяных) и составления проекта их разработки проводятся поисково-разведочные работы, которые делят на три основных этапа: общая геологическая съемка, детальная структурно-геологическая съемка и детальная разведка открытого нефтяного или газового месторождения [1]. На втором этапе работ применяют геофизические и геохимические методы, позволяющие более детально изучить

строение недр и выделить площади, перспективные для глубоко бурения с целью поиска залежей нефти и газа. Геофизические методы разведки основаны на измерении физических полей Земли, которые делятся на естественные (гравиметрия, магнитометрия, радиометрия и др.) и искусственно созданные (сейсморазведка, акустическая разведка и др.).

Гравиметрический метод основан на измерении силы притяжения на поверхности Земли с помощью гравиметров. Если пласт горизонтальный, то показатели, обычно, стабильны, если в пласте присутствуют складки и синклинали, то возникают аномалии в измерениях [2].

Гравиметрические измерения делятся на абсолютные и относительные. Абсолютные измерения силы тяжести используются в качестве опорных для гравиметрических наблюдений с применением относительных гравиметров. Наличие абсолютных опорных гравиметрических пунктов (АОГП), расположенных в центре месторождений, существенно сокращает продолжительность гравиметрического рейса и обеспечивает равномерное и однородное по точности измерений покрытие всей площади месторождения. Кроме того, полученное значение силы тяжести на абсолютном пункте не связано с другими пунктами относительными измерениями [3].

Также абсолютные гравиметрические наблюдения являются важной частью исследования современных вертикальных движений земной поверхности при мониторинге месторождений полезных ископаемых [4]. Огромное значение имеет изучение геодинамических процессов в районах разработки месторождений, где возможны опускания, быстрые движения земной поверхности и оползни [5, 6, 7, 8, 9].

Требуемую точность (первые единицы мкГал) определения абсолютных значений силы тяжести обеспечивают современные баллистические лазерные гравиметры как отечественного, так и иностранного производства. На территории Российской Федерации для гравirazведки и мониторинга месторождений полезных ископаемых в настоящее время широко используются полевые абсолютные гравиметры типа ГАБЛ/ГБЛ отечественного производства, среднеквадратическая ошибка измерения которых составляет 2-3 мкГал [10, 11, 12, 13, 14]. Но, как и все прецизионные приборы и устройства, эти гравиметры обладают рядом неучтенных систематических ошибок, например, наиболее весомой из которых является ошибка, связанная с влиянием внешнего магнитного поля на свободно падающее тело (СПТ).

Современные абсолютные гравиметры являются очень сложными по настройке и подготовке к измерениям устройствами, требующие от оператора больших знаний об их конструкции и принципе работы. Соответственно, обслуживающий персонал проходит длительное обучение и специальную подготовку для допуска к работе с прибором и его техническому обслуживанию. Кроме того, абсолютные гравиметры имеют относительно небольшой ресурс времени (циклов единичного броска) работы до проведения профилактических работ и ремонта. Поэтому необходимо постоянно проводить исследования в поисках методов усовершенствования различных узлов и систем настройки и контроля гравиметров, в том числе и для достижения целей:

максимально увеличить ресурс их работы и полностью автоматизировать процесс подготовки к измерениям.

Ранее были рассмотрены возможные пути модернизации абсолютных гравиметров типа ГАБЛ/ГБЛ с целью улучшения метрологических характеристик и автоматизации процесса подготовки прибора к измерениям [15]. Проанализировав результаты проделанных исследований, был выполнен комплекс работ, связанных с расчетами, проектированием и изготовлением макетных образцов модернизированных узлов гравиметра с последующим проведением их испытаний, наиболее важные результаты которых представлены в настоящей статье.

Уменьшение влияния магнитного поля магниторазрядного насоса на свободно падающее тело гравиметра типа ГАБЛ/ГБЛ

В абсолютных гравиметрах типа ГАБЛ/ГБЛ используются магниторазрядные насосы для получения высокого вакуума в камере, в которой движется свободно падающее тело (СПТ). Во всех магниторазрядных насосах, установлены сильные постоянные магниты. То есть такие насосы сами по себе являются источниками сильных магнитных полей. При этом на корпусе СПТ установлена ферритовая пластина, необходимая для захвата СПТ в стартовом положении с помощью электромагнита. На рис. 1 изображены схематически вакуумная камера баллистического блока (ББ), СПТ, магниторазрядный насос (МРН) и силовые линии магнитного поля, создаваемые постоянными магнитами МРН.

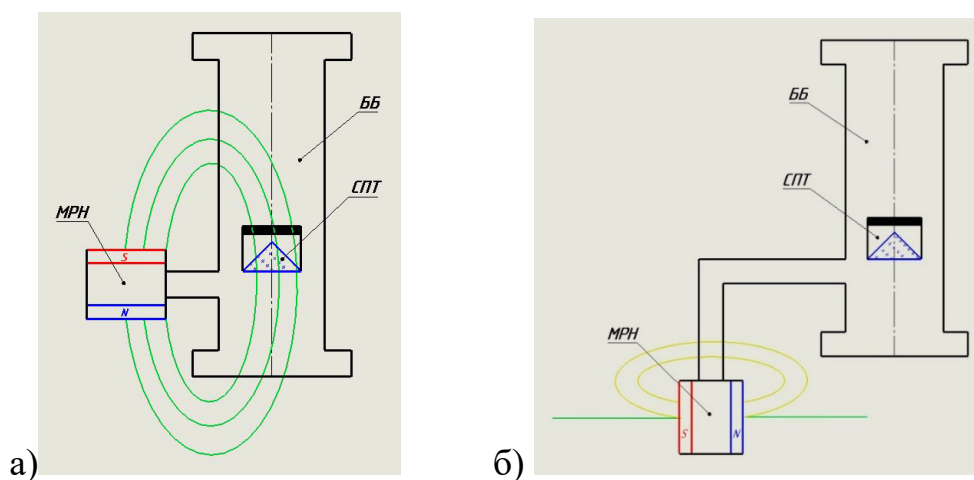


Рис. 1. а) силовые линии магнитного поля, создаваемого магниторазрядным насосом; б) альтернативное расположение магниторазрядного относительно баллистического блока абсолютного гравиметра.

Из рис. 1(а) наглядно видно, как магнитное поле МРН влияет на движение СПТ, создавая систематическую ошибку в определениях абсолютного значения ускорения силы тяжести. Для исключения влияния магнитного поля МРН в гравиметрах типа ГБЛ/ГАБЛ вокруг насоса устанавливается экран из магнитомягкого материала (пермаллой марки 79НМ).

Многолетние исследования остаточных магнитных влияний показали, что полностью исключить неучтенную систематическую ошибку в гравиметрах не удалось. В настоящее время эта ошибка составляет порядка ± 5 мкГал. Неопределенность такой ошибки связана с невозможностью одинаково и достаточно эффективно экранировать магнитное поле насоса.

Решением этой проблемы стало альтернативное расположение МРН относительно баллистического блока гравиметра, а именно удаленность насоса от траектории движения СПТ и продольная его установка, чтобы основные силовые линии располагались перпендикулярно траектории движения СПТ. Для этого был изготовлен специальный (дополнительный) Г-образный патрубок (рис. 1(б)).

Во время испытаний было проведено 6 сеансов высокоточных определений абсолютного значения ускорения силы тяжести, состоящих из 16 серий по 100 единичных бросков: 3 сеанса с магнитным экраном и 3 сеанса – без. Среднеквадратическая ошибка измерений каждого сеанса не превышала 1,5 мкГал. Кроме того, каждый сеанс проводился в разные дни с полным процессом подготовки прибора к измерениям для организации их независимости.

Абсолютный разброс значений ускорения свободного падения силы тяжести не превысил 3 мкГал.

Реализация автоматического определения высоты гравиметра

Одним из важных процессов при подготовке абсолютного гравиметра является определение высоты гравиметра. В гравиметре ГБЛ-М этот процесс заключался в измерении ручной рулеткой от нижней части верхнего фланца трубы баллистического блока до верхней плиты блока интерферометра (основного блока); затем – от верхней плиты до плоскости фундамента гравиметрического пункта. После определения высоты гравиметра, оператор вводил значение вручную в соответствующее поле ввода параметров сеанса измерений. В таком случае точность определения высоты составляет в идеальных условиях ± 3 мм (а то и хуже), что соответствует ошибке в определении абсолютного значения гравиметром, примерно, $\pm 0,9$ мкГал.

Для реализации автоматического определения высоты гравиметра был выбран датчик расстояния VL53L1X с лазерным ToF-модулем с диапазоном до 400 см и точностью единичного измерения ± 20 мм, основанный на методе измерения времени полета (Time-of-Flight): датчик генерирует короткий невидимый инфракрасный лазерный импульс (940 нм), который отражается от цели и возвращается к приемнику.

В бесконечном цикле программа периодически опрашивает датчик на наличие готовых результатов измерения. Если данные доступны, она извлекает сырое значение расстояния от измерительного пункта до нижней плиты гравиметра (до датчика). Полученное расстояние корректируется путем добавления константы коррекции.

Для повышения надежности данных предусмотрена опциональная фильтрация: простое усреднение нескольких последовательных измерений (например, по 10 сэмплам), что сглаживает шум от вибраций или неровностей поверхности

и снижает погрешность до ± 1 мм. Если измерение признано невалидным (например, из-за отсутствия отражения или превышения диапазона), программа пропускает его, избегая ложных значений.

Модернизированная система выставления гравиметра по вертикали

Выставление гравиметров ГАБЛ/ГБЛ по вертикали происходит по регистрации движения блика измерительного луча в поле визуализатора в оптической схеме интерферометра (рис. 2) [13,16]

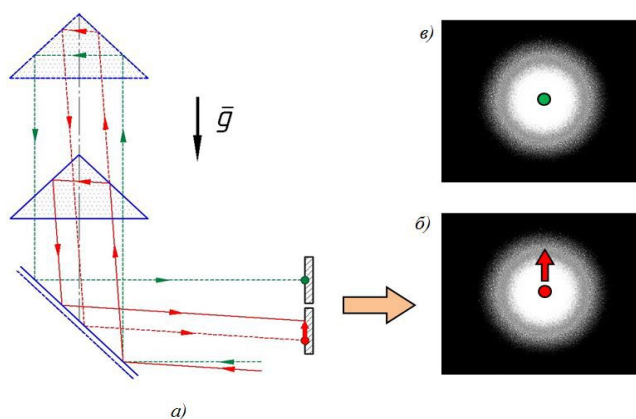


Рис. 2. а) ход лучей в оптической схеме интерферометра гравиметров ГАБЛ/ГБЛ, а также изображение блика на визуализаторе:

- б) при отклонении измерительного луча от вертикали (блик движется),
в) при совпадении (блик не движется)

На данный момент в качестве визуализатора применяются скоростные видеокамеры с ПЗС-матрицами (60-90 FPS), которые имеют определенный ряд технологических недостатков:

- а) на активном участке пути для обработки имеется 15-20 кадров;
- б) ошибка в определении траектории движения блика при возникновении паразитных лучей;
- в) проблемы с драйверами при переходе на другие операционные системы;
- г) сложный алгоритм определения последнего кадра (момент попадания тела в улавливающее устройство).

Ранее была разработана модернизированная система выставления абсолютного гравиметра по вертикали на основе 4х-элементного радиально-секторного р-і-п фотодиода (4х-квадранта) отечественного производства ФДКН-14.

Данная система обладает рядом преимуществ, среди которых:

- а) количество данных на активном участке пути для обработки не меньше 110, что позволяет более точно построить полином 2-й степени;
- б) отсутствие влияния паразитного излучения (интенсивность сильно меньше интенсивности блика);

в) в виду отсутствия задержки старта записи сложный алгоритм определения последнего кадра не требуется, что упрощает реализацию автоматического выставления гравиметра по вертикали и не требует контроля оператором;

г) драйверы для устройства не требуются.

Проведены испытания модернизированной системы выставления вертикали с новым устройством, которое было установлено в интерферометр абсолютного гравиметра. Сравнительные измерения абсолютного значения ускорения силы тяжести проводились с выставлением вертикали старой и обновленной системами. Чтобы исключить возможные сезонные вариации значений ускорения силы тяжести (УСТ), были проведены 3 группы измерений, в каждую из которых входило по 3 сеанса независимых измерений со старой и 3 сеанса обновленной системами выставления гравиметра по вертикали. Каждый сеанс включал в себя 16 серий измерений по 100 единичных бросков.

Результаты измерений абсолютного значения УСТ, а также среднее значение УСТ, со старой и обновленной системами выставления гравиметра по вертикали приведены на рис. 3.

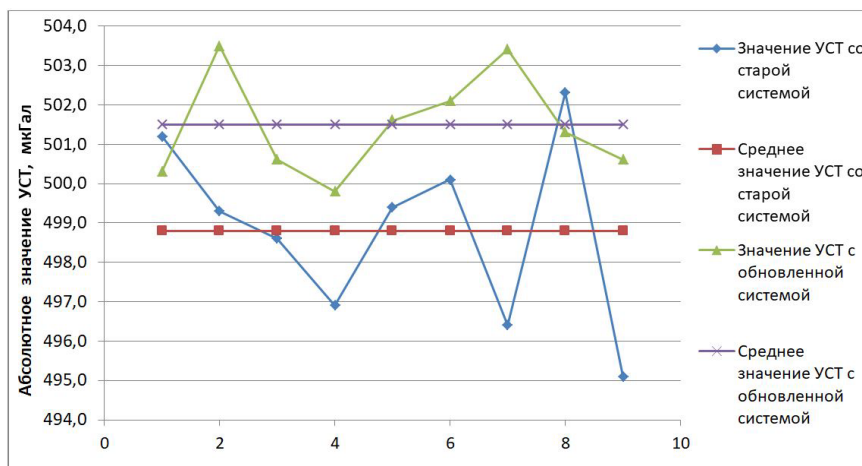


Рис. 3. Результаты измерений абсолютного значения УСТ со старой и обновленной системами выставления гравиметра по вертикали

Из рис. 3 видно, что среднее значение УСТ с обновленной системой больше, примерно, на 2,6 мкГал, чем со старой.

Самопритяжение гравиметра

До недавнего времени влияния самопритяжения гравиметров не учитывалось и считалась незначительной в пределах точности приборов. В настоящее время зарубежные ученые провели расчеты поправки за самопритяжение гравиметров MPG-2, FG5, FG5-238, IMG-02 и выяснили, что она составляет порядка 1 мкГал [17,18]. До недавнего времени в отечественных приборах эта поправка отсутствовала.

Для определения влияния эффекта самопритяжения (гравитационной нагрузки) были выбраны те элементы и узлы гравиметра типа ГАБЛ/ГБЛ, которые находятся

в непосредственной близости от траектории движения свободно падающего тела и обладают достаточно большими массами. Модель гравиметра, взятая для расчета гравитационной нагрузки выбранных элементов на падающее тело, представлена на рис. 4.

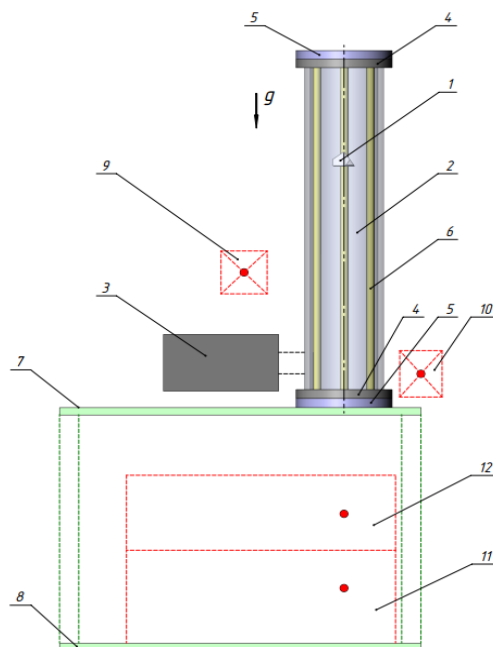


Рис. 4. Модель абсолютного гравиметра типа ГАБЛ/ГБЛ для расчета гравитационной нагрузки

На рис. 4 представлены: (1) – свободно падающее тело, (2) – труба вакуумной камеры баллистического блока, (3) – магниторазрядный насос, (4) – кольцеобразные фланцы, (5) – глухие фланцы, (6) – направляющие системы доставки падающего тела в стартовое положение, (7) – верхняя плита основного блока (блока интерферометра), (8) – нижняя плита гравиметра (основание гравиметра), (9) – вакуумный вентиль, (10) – привод вакуумного ввода системы доставки свободно падающего тела, (11) – блок виброзащиты, (12) – оптический блок интерферометра.

Красными точками на рис. 4 помечены центры масс тех элементов, для которых расчет гравитационной нагрузки производился как для материальных точек, в виду относительно малых масс при небольшом объеме тела, а также тел, которые достаточно далеко расположены от траектории движения СПТ. Расчет непосредственно массы и центра масс этих элементов проводился по созданным моделям в системе трехмерного проектирования Компас.

Расчет гравитационных нагрузок производился методом интегрирования гравитационной силы по пути свободного падения тела, а затем по времени для узлов: цилиндрической формы, формы параллелепипеда, материальных точек [19].

Расчеты гравитационной нагрузки для модели абсолютного гравиметра типа ГАБЛ/ГБЛ:

а) 1,94 мкГал в случае, когда оптический блок оптического стандарта частоты (ОСЧ) находится в стороне гравиметра (расчёт данной конфигурации происходил в виду частого выноса оптического блока ОСЧ оператором во избежание самонагрева при длительных работах);

б) 2,14 мкГал в случае, когда оптический блок ОСЧ находится внутри гравиметра.

Заключение

Испытания показали, что описанное в статье альтернативное расположение магнитоэлектрического насоса относительно баллистического блока гравиметра исключает влияние магнитного поля насоса на движение свободно падающего тела.

Разработанная система автоматического определения высоты гравиметра с использованием лазерных датчиков позволяет достичь точности определения высоты гравиметра ± 1 мм в реальном времени (при этом ошибка в определении абсолютного значения ускорения силы тяжести не превышает $\pm 0,3$ мкГал).

Отклонение вертикали измерительного луча абсолютных гравиметров от отвесной линии в любом направлении всегда приводит к уменьшению абсолютного значения ускорения силы тяжести. Среднее значение ускорения силы тяжести со старой системой меньше (примерно, на 2,6 мкГал), чем с обновленной. Соответственно выставление измерительного луча по вертикали в абсолютных гравиметрах с помощью модернизированной системы является более точной.

Расчёт гравитационной нагрузки для модели гравиметров типа ГАБЛ/ГБЛ показал, что её величина соразмерна точности приборов. Поправка за самопритяжение внесена в перечень неопределенностей для повышения метрологических характеристик гравиметров типа ГАБЛ/ГБЛ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Башкирцева Н.Ю., Куряшов Д.А., Фирсин А.А. Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений: учеб. пособие. – Казань. : КНИТУ, 2020. – 84 с.
2. Серeda, Н. Г. Основы нефтяного и газового дела / Н. Г. Серeda, В. М. Муравьев. – М.: Недра, 1980. – 287 с.
3. Андреев О.П., Кобылкин Д.Н., Ахмедсафин С.К., Кирсанов С.А., Безматерных Е.Ф., Кривицкий Г.Е. Гравиметрический контроль разработки газовых и газоконденсатных месторождений. Состояние, проблемы, перспективы. – М.: Недра, 2012. – 374 с.
4. Измерение современных движений методами абсолютной гравиметрии и космической геодезии на месторождениях заполярной части Западной Сибири / В.Ю. Тимофеев, Д.Г. Ардюков, Д.А. Носов, И.С. Сизиков, А.В. Тимофеев, Е.В. Бойко, Е.Н. Калиш, Ю.Ф. Стусь // Сейсмические приборы. – 2021. – Т. 57. – № 2. – С. 23-42.
5. Никонов А.А. Современные техногенные движения земной коры // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1976. – № 12. – С. 135-150.
6. Кукол З. Скорость геологических процессов // М.: Мир. – 1987. – 248 с.
7. Сидоров В.А., Кузьмин Ю.О. Современные движения земной коры осадочных бассейнов. М: Наука. – 1989. – 189 с.

8. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и оценка геодинимического риска при недропользовании. М.: Агентство экономических новостей. – 1999. – 220 с.
9. Адушкин В.В. Тектонические землетрясения техногенного происхождения // Физика Земли. – 2016. – № 2. – С. 22-44.
10. Арнаутов Г.П., Калиш Е.Н., Смирнов М.Г., Стусь Ю.Ф. Лазерный баллистический гравиметр ГАБЛ-М и результаты наблюдений силы тяжести // Автометрия. 1994. № 3. С. 3-11.
11. Д.А. Носов, И.С. Сизиков. Автоматическое выставление вертикали абсолютного гравиметра методом регистрации смещения измерительного луча. // Сейсмические приборы. – 2021. – Т.57. – №3. С. 41-51.
12. Е.Н. Калиш, Ю.Ф. Стусь, Д.А. Носов, И.С. Сизиков. Юстировка измерительного луча интерферометра по вертикали в баллистическом гравиметре. // Автометрия. 2020. № 3. С. 29-34.
13. Пат. 2498356 РФ. Способ выставления вертикали лазерного луча в баллистическом гравиметре и устройство для его осуществления / Е.Н. Калиш, Ю.Ф. Стусь, Д.А. Носов, И.С. Сизиков. Оpubл. 10.11.2013, Бюл. № 13
14. Стусь, Ю.Ф. Разработка и исследование оптической системы лазерного баллистического гравиметра [Текст]: диссертация ... кандидата технических наук: 01.04.05 / Стусь Юрий Федорович. – Новосибирск, 2002. – 111 с.
15. Д.А. Носов, И.С. Сизиков, А.Ю. Тимиртдинов, И.А. Бунин. Пути модернизации абсолютных гравиметров, применяемых в гравиразведке и мониторинге месторождений. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2024. – Т.2. – №4. С. 11-19.
16. Д.А. Носов, И.С. Сизиков. Автоматическое выставление вертикали абсолютного гравиметра методом регистрации смещения измерительного луча // Сейсмические приборы. – 2021. – Т.57. – № 3. – С.41-51.
17. Biolcati E. Self-attraction effect and correction on three absolute gravimeters / E. Biolcati, S. Svitlov, A. Germak // Metrologia/ - 2012. – Vol. 49, № 5. – P. 560-566.
18. Niebauer T. M. The self-attraction correction for the FG5X absolute gravity meter / T. M. Niebauer, R. Billson, A. Schiel, D. van Westrum, F.Klopping // Metrologia. – 2011. – Vol. 48, № 3. – P. 225-232.
19. А.С. Ельчин, Д.А. Носов, И.С. Сизиков, И.А. Ощепков, И.И. Меженова. Поправка за самопритяжение абсолютных лазерных баллистических гравиметров типа ГАБЛ/ГБЛ // Сейсмические приборы. 2025. Т. 61. № 2. С. 39-49.

© А. С. Ельчин, И. С. Сизиков, Д. А. Носов, А. Ю. Тимиртдинов, 2026

В. С. Захаров¹✉

Коэффициенты отражения плоской волны от пористого трехфазного слоя

¹Институт математики им. С. Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИМ СО РАН), г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: v.zakharov1@g.nsu.ru

Аннотация. В связи с активным освоением северных территорий необходимы разработка и совершенствование методов локализации многолетнемерзлых пород и изучение процесса растепления. Наиболее перспективным подходом для решения этой задачи является сейсмический мониторинг. Данный подход требует использования математической модели, учитывающей изменение фазового состояния среды. В качестве такой модели выбрана симметрическая гиперболическая термодинамически согласованная модель (СГТС). Свойства сейсмических волн в многофазных средах существенно отличаются от упругих сред. Параметры фаз и их объемные доли влияют на поглощение волн, их скорости и возникновение волн Био. В работе рассматривается модель среды, состоящая из двух слоев: верхнего упругого и нижнего пористого. Искомые параметрами являются глубина верхнего слоя и параметры объемных долей фаз нижнего. Данные параметры возможно определить по характеру поведения волны, отраженной от границы между средами. Для этого в работе выведены формулы для коэффициентов отражения и прохождения волн между упругой и трехфазной пористой средой.

Ключевые слова: сейсмический мониторинг, многолетнемерзлые породы, симметрическая гиперболическая термодинамически согласованная модель, многофазные среды, пористые среды, коэффициент отражения

V. S. Zakharov¹✉

Plane wave reflection coefficients from a porous three-phase layer

¹Sobolev Institute of Mathematics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IM SB RAS), Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: v.zakharov1@g.nsu.ru

Abstract. Due to the active development of northern territories, it is necessary to develop and improve methods for locating permafrost rocks and studying the thawing process. The most promising approach to solving this problem is seismic monitoring. This approach requires the use of a mathematical model that accounts for changes in the phase state of the medium. The symmetric hyperbolic thermodynamically consistent (SHTC) model has been chosen for this purpose. The properties of seismic waves in multiphase media differ significantly from those in elastic media. Phase parameters and their volume fractions affect wave attenuation, wave velocities, and the occurrence of Biot waves. This study considers a medium model consisting of two layers: an upper elastic layer and a lower porous layer. The unknown parameters are the thickness of the upper layer and the volume fraction parameters of the phases in the lower layer. These parameters can be determined from the behavior of the wave reflected from the interface between the media. To this end, formulas for the reflection and transmission coefficients of waves between an elastic medium and a three-phase porous medium are derived.

Keywords: seismic monitoring, permafrost rocks, symmetric hyperbolic thermodynamically consistent model, multiphase media, porous media, reflection coefficient

Введение

Изучение характеристик многофазных сред необходимо при решении большого спектра задач, в частности при мониторинге процессов таяния льдов в зонах вечной мерзлоты. Данная задача актуальна в связи с активным освоением северных территорий. При изучении пористых сред необходимо учитывать влияние параметров фаз и их объемных долей на поглощение волн и скорость их распространения. Отдельной особенностью пористой среды является возникновение медленной продольной волны (волны Био).

Одной из проблем при изучении многофазных сред является выбор корректного математического описания. Для моделирования пористых сред часто используется модель Био [3]. Однако, данная модель неприменима в случае граничных значений пористости среды, равных нулю или единице, то есть, когда пористая среда переходит в упругую. Это особенно важно при решении задачи локализации многолетнемерзлых пород, так как ожидаемый коэффициент пористости как правило имеет небольшое значение относительно объемной доли скелета. В связи с этим в работе использовалась Симметрическая Гиперболическая Термодинамически Согласованная (СГТС) модель [1, 2, 4, 5, 6, 7, 8], обладающая достаточной гибкостью для решения поставленных задач.

Возможный подход для решения обратной задачи – минимизация невязки, вычисляемой по данным профиля сейсмоприемников на свободной поверхности. Невязка представляет собой среднеквадратичное отклонение синтетических скоростей смещения, рассчитанных для истинных значений параметров, от натуральных скоростей смещения. При решении используется программа с использованием технологии CUDA для численного моделирования волнового поля в пористых трехфазных средах [2].

Поведение невязки относительно пористости и глубины активного слоя зависит от параметров фаз пористого слоя и параметров упругого слоя, что делает необходимым исследование зависимости коэффициентов отражения и прохождения волны на границе между упругой и пористой средой от параметров среды.

Таким образом, целью работы является исследование коэффициента отражения на границе между упругим и пористым слоями.

Методы и материалы

В качестве математической модели выбран вариант СГТС модели, представленный в [8]. Он предполагает малые линейные колебания, малые изменения температуры, мгновенную релаксацию фазовых давлений к общему значению, отсутствие релаксации касательных напряжений.

Распишем данную систему дифференциальных уравнений в двумерной Декартовой системе координат (x, z) :

$$\left\{ \begin{array}{l}
\rho_0 \frac{\partial V_x}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial \Sigma_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial \Sigma_{xz}}{\partial z} = 0 \\
\rho_0 \frac{\partial V_z}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\partial \Sigma_{xz}}{\partial x} - \frac{\partial \Sigma_{zz}}{\partial z} = 0 \\
\frac{\partial W_x^1}{\partial t} + \left(\frac{1}{\rho_1^0} - \frac{1}{\rho_3^0} \right) \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \\
\frac{\partial W_z^1}{\partial t} + \left(\frac{1}{\rho_1^0} - \frac{1}{\rho_3^0} \right) \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \\
\frac{\partial W_x^2}{\partial t} + \left(\frac{1}{\rho_2^0} - \frac{1}{\rho_3^0} \right) \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \\
\frac{\partial W_z^2}{\partial t} + \left(\frac{1}{\rho_2^0} - \frac{1}{\rho_3^0} \right) \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \\
\frac{\partial P}{\partial t} + K \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) + K_1' \left(\frac{\partial W_x^1}{\partial x} + \frac{\partial W_z^1}{\partial z} \right) + K_2' \left(\frac{\partial W_x^2}{\partial x} + \frac{\partial W_z^2}{\partial z} \right) = 0 \\
\frac{\partial \Sigma_{xx}}{\partial t} - \mu \left(\frac{4}{3} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = 0 \\
\frac{\partial \Sigma_{zz}}{\partial t} - \mu \left(\frac{4}{3} \frac{\partial V_z}{\partial z} - \frac{2}{3} \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) = 0 \\
\frac{\partial \Sigma_{xz}}{\partial t} - \mu \left(\frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) = 0
\end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь V_x, V_z – компоненты скорости смещения смеси, $W_x^1, W_x^2, W_z^1, W_z^2$ – компоненты фазовых относительных скоростей, P – давление, $\Sigma_{xx}, \Sigma_{zz}, \Sigma_{xz}$ – компоненты девиатора напряжений. Параметры среды выражаются через $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ объемные доли фаз ($\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$), μ – модуль сдвига твердого скелета, K_1, K_2, K_3 – модули сжатия фаз, ρ_1, ρ_2, ρ_3 – плотности фаз. Тогда $\rho_0 = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 + \alpha_3 \rho_3$, $K = (\alpha_1 / K_1 + \alpha_2 / K_2 + \alpha_3 / K_3)^{-1}$, $K_a' = (\alpha_a - c_a) K$, где $c_a = \alpha_a \rho_a / \rho_0$.

Далее будем рассматривать модель среды, изображенную на (рис. 1). Среда делится на два слоя: верхний упругий слой и нижний пористый. На свободной границе установлена полоса сейсмоприемников. Особенностью данной модели является малая глубина верхнего слоя.

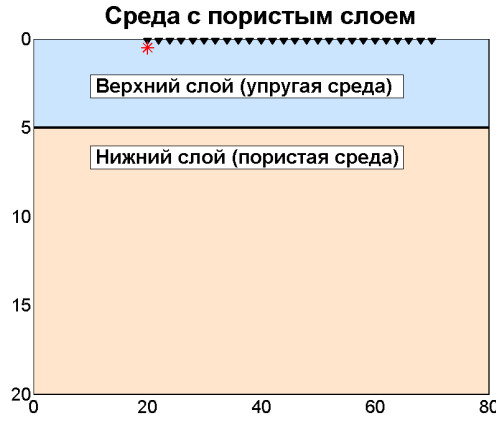


Рис. 1. Модель двухслойной среды с пористым слоем

Обратная задача заключается в определении глубины верхнего упругого слоя (активного слоя) и коэффициента пористости нижнего слоя. В качестве решения задачи предлагается точка глобального минимума невязки, имеющей вид

$$\Phi(\alpha, H) = \frac{\int \int_{T L} (u - u^*)^2 dt dl}{\int \int_{T L} u^{*2} dt dl}, \quad (2)$$

где α – пористость нижнего слоя, H – глубина активного слоя, u – вычисленная при α и H скорость смещения, u^* – истинная скорость смещения, T – временной отрезок, на котором моделировалось волновое поле, L – отрезок свободной поверхности, на котором регистрировались сейсмограммы. Минимум вычисляется при помощи алгоритма Нелдера-Мида.

Наибольшее влияние на поведение невязки оказывает отражение волн от границы между средами. В связи с этим необходимо определить коэффициент отражения между упругой и трехфазной средой, а также скорость распространения волн в трехфазной среде.

Для определения скоростей распространения волн в трехфазной среде рассмотрим решение в виде плоских гармонических волн $U(z, t) = U_0 e^{i\omega(t - z/c)}$,

где c – фазовая скорость волны, а $U = (V, W_1, W_2, P, \Sigma)^T$ – вектор переменных. Данное решение подставим в уравнения одномерной модели трехфазной среды. Отметим, что полное напряжение выражается как $\sigma = -P + \Sigma$.

После подстановки получим систему линейных уравнений, из которой:

$$c_{1,2}^2 = \frac{1}{2\rho} \left(\rho A + K + \frac{4}{3}\mu \pm \sqrt{\left(\rho A + K + \frac{4}{3}\mu \right)^2 - \frac{16}{3}\rho\mu A} \right), \quad (3)$$

где $A = K_1' \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_3} \right) + K_2' \left(\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_3} \right)$. Знак плюс соответствует быстрой волне c_1 , а знак минус – медленной c_2 .

Пусть граница между средами располагается в точке $z = 0$. На границе между средами при закрытых порах выполняются условия $V^{(1)} = V^{(2)}$, $W_1^{(2)} = 0$, $W_2^{(2)} = 0$, $\sigma^{(1)} = \sigma^{(2)}$, где верхний индекс (1) соответствует упругому слою, а индекс (2) – пористому. Применим данную систему для волнового поля, включающего падающую Р-волну и отраженную Р-волну в упругом слое и проходящие быструю и медленную Р-волны в пористом. Тогда получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} 1 + R &= T_1 + T_2, Z^{(1)}(1 - R) = Z_1^{(2)}T_1 + Z_2^{(2)}T_2, \\ \gamma_{11}^{(2)}T_1 + \gamma_{12}^{(2)}T_2 &= 0, \gamma_{21}^{(2)}T_1 + \gamma_{22}^{(2)}T_2 = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где R - коэффициент отражения, T_1 и T_2 - коэффициенты прохождения быстрой и медленной волн, $Z^{(1)} = \rho^{(1)}c^{(1)}$ – импеданс упругой среды,

$$\gamma_{ij}^{(2)} = \frac{W_i^{(j)}}{V^{(j)}} = K \left(\frac{1}{\rho_i^{(2)}} - \frac{1}{\rho_3^{(2)}} \right) / \left(c_j^{(2)2} - A \right),$$

$$Z_j^{(2)} = \left(K^{(2)} + K_1'^{(2)}\gamma_{1j}^{(2)} + K_2'^{(2)}\gamma_{2j}^{(2)} + \frac{4\mu^{(2)}}{3c_j^{(2)}} \right) / c_j^{(2)}.$$

Таким образом, коэффициенты выражаются как:

$$R = \frac{Z^{(1)} - Z^{(2)}}{Z^{(1)} + Z^{(2)}}, \quad T_1 = \frac{2Z^{(1)}}{Z^{(1)} + Z^{(2)}} \frac{\gamma_{12}^{(2)}}{\gamma_{12}^{(2)} - \gamma_{11}^{(2)}}, \quad T_2 = \frac{2Z^{(1)}}{Z^{(1)} + Z^{(2)}} \frac{\gamma_{11}^{(2)}}{\gamma_{11}^{(2)} - \gamma_{12}^{(2)}},$$

где эффективный импеданс пористой среды выражается в виде:

$$Z^{(2)} = \left(Z_1^{(2)} - \left(\gamma_{11}^{(2)} / \gamma_{12}^{(2)} \right) Z_2^{(2)} \right) / \left(1 - \gamma_{11}^{(2)} / \gamma_{12}^{(2)} \right).$$

Аналогично получим коэффициенты для случая наклонного падения. Рассмотрим условия на границе между средами в виде $V_x^{(1)} = V_x^{(2)}$, $V_z^{(1)} = V_z^{(2)}$, $W_z^{(1)} = 0$, $W_z^{(2)} = 0$, $\sigma_{zz}^{(1)} = \sigma_{zz}^{(2)}$, $\sigma_{xz}^{(1)} = \sigma_{xz}^{(2)}$. Для каждой волны зависимость от координат и времени имеет вид $e^{i\omega(t - px \mp qz)}$, где знак при z зависит от направления волны. Параметр p выражает отношение синуса угла распространения волны и ее скорости. Согласно закону Снеллиуса, данный параметр одинаков для всех

волн, возникающих на границе. Параметр q - вертикальная медленность. p и q выражаются следующим образом: $p = \sin \theta_{inc} / c_{p1}^{(1)}$, $q_j^{(m)} = \sqrt{1 / c_j^{(m)2} - p^2}$.

Применим систему условий для волнового поля, включающего падающую Р-волну и отраженные Р-волну и S-волну в упругом слое и проходящие быструю и медленную Р-волны и S-волну в пористом. Тогда получим систему уравнений:

$$\begin{aligned}
c_p^{(1)} p (1 + R_{PP}) + c_s^{(1)} q_s^{(1)} R_{PS} &= p (c_{p1}^{(2)} + c_{p2}^{(2)} k_T) T_{PP1} - c_s^{(2)} q_s^{(2)} T_{PS}, \\
c_p^{(1)} q_p^{(1)} (1 - R_{PP}) + c_s^{(1)} p R_{PS} &= (c_{p1}^{(2)} q_{p1}^{(2)} + c_{p2}^{(2)} q_{p2}^{(2)} k_T) T_{PP1} + c_s^{(2)} p T_{PS}, \\
2c_p^{(1)} p q_p^{(1)} \mu^{(1)} (1 - R_{PP}) + c_s^{(1)} \mu^{(1)} (p^2 - q_s^{(1)2}) R_{PS} &= \\
(2c_{p1}^{(2)} p q_{p1}^{(2)} \mu^{(2)} + 2c_{p2}^{(2)} p q_{p2}^{(2)} \mu^{(2)} k_T) T_{PP1} + c_s^{(2)} \mu^{(2)} (p^2 - q_s^{(2)2}) T_{PS} & \\
(Z^{(1)} - 2c_p^{(1)} p^2 \mu^{(1)}) (1 + R_{PP}) - 2c_s^{(1)} p q_s^{(1)} \mu^{(1)} R_{PS} &= \\
\left(\left(\beta_{p1}^{(2)} + c_{p1}^{(2)} \mu^{(2)} \left(\frac{4q_{p1}^{(2)2}}{3} - \frac{2p^2}{3} \right) \right) + \left(\beta_{p2}^{(2)} + c_{p2}^{(2)} \mu^{(2)} \left(\frac{4q_{p2}^{(2)2}}{3} - \frac{2p^2}{3} \right) \right) k_T \right) T_{PP1} + & \\
2c_s^{(2)} p q_s^{(2)} \mu^{(2)} T_{PS}, & \\
T_{PP2} = -\frac{\gamma_{11}^{(2)}}{\gamma_{12}^{(2)}} T_{PP1} \equiv k_T T_{PP1}, &
\end{aligned} \tag{5}$$

где R_{PP} , R_{PS} – коэффициенты отражения волн, T_{PP1} , T_{PP2} , T_{PS} – коэффициенты прохождения. Также $\beta_j^{(2)} = (K^{(2)} + K_1'^{(2)} \gamma_{1j}^{(2)} + K_2'^{(2)} \gamma_{2j}^{(2)}) / c_j^{(2)}$.

Результаты

Рассмотрим зависимость скоростей волн в пористой среде относительно объемной доли флюида. Пусть параметры скелета - $V_P = 3800$ м/с, $V_S = 2400$ м/с, $\rho = 2500$ кг/м³, а параметры флюида - $V_P = 1500$ м/с, $V_S = 0$ м/с, $\rho = 1400$ кг/м³. Графики для скоростей изображены на (рис. 2). Скорость быстрой продольной волны в граничных случаях соответствует упругим параметрам фаз, а скорость медленной волны равна нулю (отсутствие медленной волны).

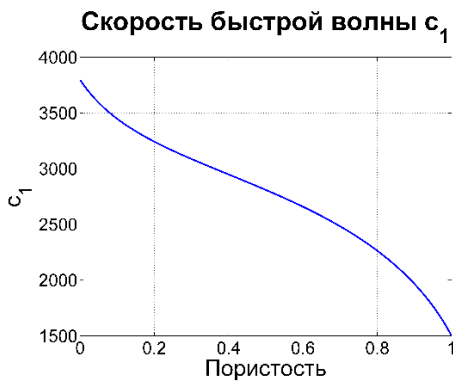


Рис. 2.1. Скорость быстрой волны

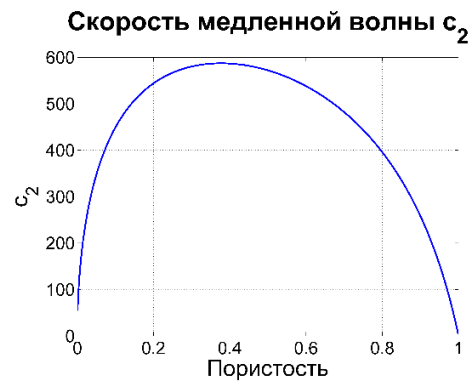


Рис. 2.2. Скорость медленной волны

Рис. 2. Зависимость скоростей волн от пористости

На (рис. 3) изображены графики зависимости коэффициентов отражения и прохождения для двух двухслойных сред с различным контрастом. В обоих случаях упругий слой имеет параметры $V_P = 1800 \text{ м/с}$, $V_S = 900 \text{ м/с}$, $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$, а флюид пористого слоя – $V_P = 1500 \text{ м/с}$, $V_S = 0 \text{ м/с}$, $\rho = 1040 \text{ кг/м}^3$. В случае среды с высоким контрастом параметры скелета – $V_P = 3800 \text{ м/с}$, $V_S = 2400 \text{ м/с}$, $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$, а в случае среды с низким – $V_P = 1800 \text{ м/с}$, $V_S = 900 \text{ м/с}$, $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$. Параметры коэффициентов в граничных случаях соответствуют таковым для соответствующих упругих сред.

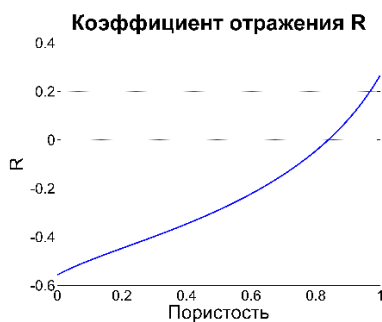


Рис. 3.1. Коэффициент отражения для среды с высоким контрастом

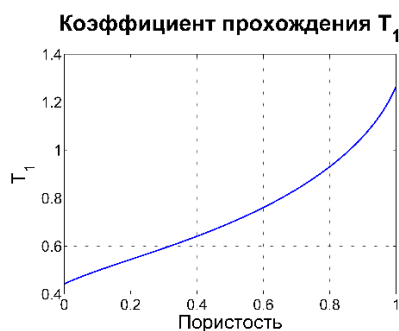


Рис. 3.2. Коэффициент прохождения медленной волны для среды с высоким контрастом

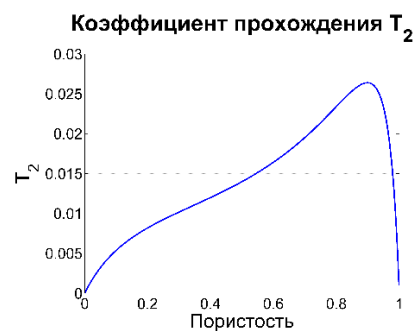


Рис. 3.3. Коэффициент прохождения быстрой волны для среды с высоким контрастом

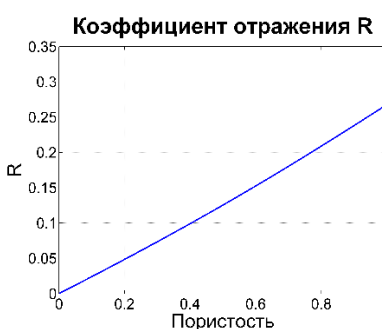


Рис. 3.4. Коэффициент отражения для среды без контраста

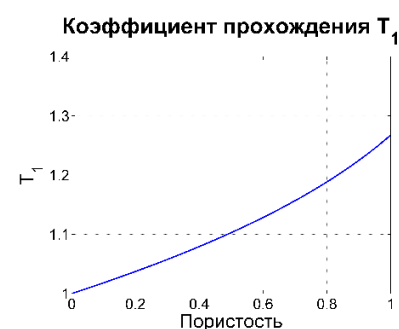


Рис. 3.5. Коэффициент прохождения медленной волны для среды без контраста

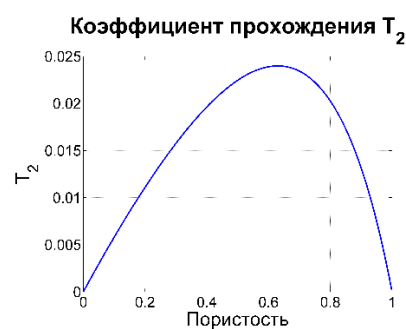


Рис. 3.6. Коэффициент прохождения быстрой волны для среды без контраста

Рис. 3. Зависимость коэффициентов отражения и прохождения от пористости для среды с высоким контрастом (вверху) и с низким (внизу)

Исследуем зависимость коэффициентов отражения и прохождения от угла падения при различных значениях пористости. Рассмотрим случай среды с высоким контрастом (параметры указаны выше). Графики зависимостей изображены на (рис. 4). Заметим, что пористость существенно влияет на характер зависимости коэффициентов от угла падения и на величину критического угла.

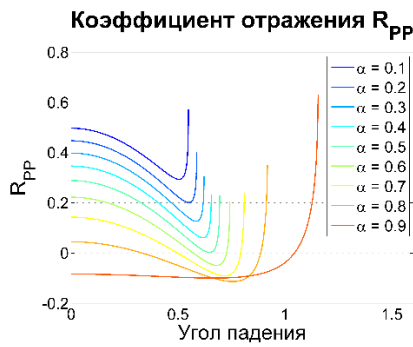


Рис. 4. 1. Коэффициент отражения продольной волны

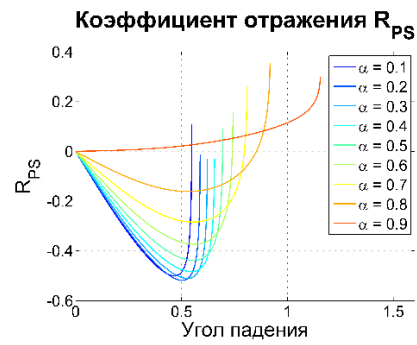


Рис. 4. 2. Коэффициент отражения поперечной волны

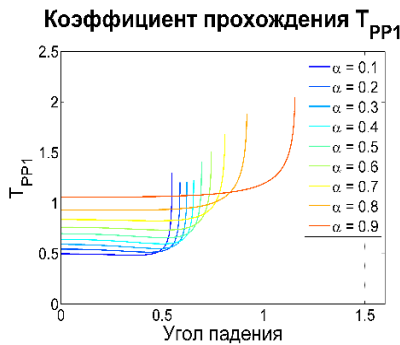


Рис. 4. 3. Коэффициент прохождения быстрой продольной волны

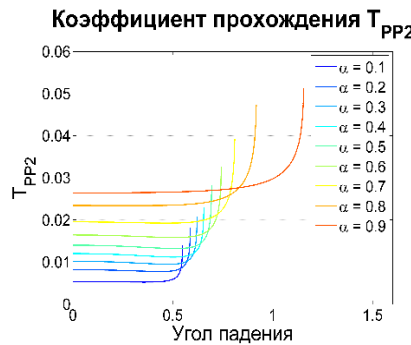


Рис. 4. 4. Коэффициент прохождения медленной продольной волны

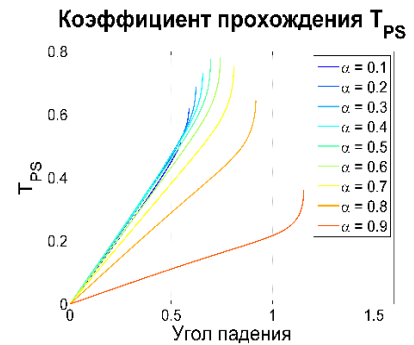


Рис. 4. 5. Коэффициент прохождения поперечной волны

Рис. 4. Зависимость коэффициентов отражения и прохождения от угла падения

Обсуждение

Проверим согласованность полученных формул с известными выражениями для упругой среды. Рассмотрим краевые случаи, когда объемная доля флюида равна нулю. Пусть объемные доли флюидов равны 0, а объемная доля скелета равна единице. Тогда имеем упругую среду. Подставим данные значения в формулу (3) и получим выражение:

$$c_1^2 = \frac{K_3 + \frac{4}{3}\mu}{\rho}; \quad c_2 = 0. \quad (6)$$

Выражение для c_1 соответствует известной формуле скорости продольной волны в пористой среде. Значение c_2 равно нулю, что соответствует отсутствию медленной волны в среде.

Далее рассмотрим границу между упругой средой с параметрами $V_P = 1800$ м/с, $V_S = 900$ м/с, $\rho = 1500$ кг/м³ и пористой средой с параметрами фаз $V_P = 1500$

м/с, $V_S = 0$ м/с, $\rho = 1040$ кг/м³ и $V_P = 3800$ м/с, $V_S = 2400$ м/с, $\rho = 2500$ кг/м³. Известны выражения для коэффициентов отражения и прохождения для границы между двумя упругими средами:

$$R = \frac{Z^{(1)} - Z^{(2)}}{Z^{(1)} + Z^{(2)}}; \quad T = \frac{2Z^{(1)}}{Z^{(1)} + Z^{(2)}}, \quad (7)$$

где $Z^{(i)}$ - акустический импеданс упругой среды i . Устремим параметр пористости к нулю. Пусть $\alpha = 10^{-6}$. Тогда в коэффициенты в пористой среде имеют значения $R = -0.5574$, $T_1 = 0.4426$, $T_2 = 7.9529 \cdot 10^{-8}$. Согласно формулам (7), коэффициенты для соответствующей упругой среды имеют значения $R = -0.5574$, $T = 0.4426$. Таким образом, при пористости $\alpha \rightarrow 0$ в пористой среде коэффициенты R и T_1 стремятся к значениям R и T в упругой среде, а $T_2 \rightarrow 0$, что указывает на отсутствие проходящей медленной волны.

Проверим согласованность формул, полученных для нормального падения волны и падения под углом. При $\theta = 0$ система уравнений (5) вырождается в систему (4). Таким образом решения для нормального падения и падения под углом согласуются.

Возможно применение вышеуказанных формул для совершенствования метода наименьших квадратов при решении обратной задачи, а также разработке новых методов. Полученные коэффициенты объясняют влияние упругих параметров среды на поведение невязки. Используя вариации амплитуд и формулу скоростей в пористой среде, возможно восстановление пористости нижнего слоя. Глубину упругого слоя же можно восстановить по первым вступлениям на сейсмотрассах.

Заключение

В работе представлен вывод формул для нахождения коэффициентов отражения и прохождения между упругим и трехфазным пористым слоем. В дальнейшем планируется разработка двухэтапного метода решения обратной задачи с применением полученных результатов.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института математики им. С.Л. Соболева СО РАН, проект FWNF-2024-0002.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Romenski E., Reshetova G., Peshkov I. Thermodynamically compatible hyperbolic model of a compressible multiphase flow in a deformable porous medium and its application to wavefields modeling // AIP Conf. Proc. 2021. Vol. 2448. P. 020019.
2. Reshetova G., Shiyapov K., Zakharov V., Cheverda V. Parallel Implementation of HTC Model for Wave Propagation in Multiphase Poroelastic Media // Parallel Computing Technologies. 2025. P. 247–259.

3. Biot, M. A.: Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range. *Journal of the Acoustical Society of America* 28(2), 168–178 (1956)
4. Romenski, E., Reshetova, G., Peshkov, I., Dumbser, M.: Modeling wavefields in saturated elastic porous media based on thermodynamically compatible system theory for two-phase solid-fluid mixtures. *Computers and Fluids* 206, 104587 (2020)
5. Reshetova, G., Romenski, E.: Diffuse interface approach to modeling wavefields in a saturated porous medium. *Applied Mathematics and Computation* 398(C) (2021)
6. Romenski E., Reshetova G., Peshkov I.: Computational model for compressible two-phase flow in deformed porous medium. *Lecture Notes in Computer Science*. In: Gervasi, O., et al. (eds.) *Computational Science and Its Applications– ICCSA 2021*, LNCS, vol. 12949, pp. 224– 236. Springer, Cham. (2021)
7. Romenski E., Reshetova G., Peshkov I.: Two-phase hyperbolic model for porous media saturated with a viscous fluid and its application to wavefield simulation. *Applied Mathematical Modelling* 106, 567–600 (2022)
8. Reshetova, G., Romenski, E. Modeling the variability of seismic properties of frozen multiphase media depending on temperature. *Siberian Electronic Mathematical Reports*, Vol. 21, No. 2, pp. B202 B230 (2024) <https://doi.org/10.33048/semi.2024.21.B11>
9. J. Virieux, “P-SV wave propagation in heterogeneous media; velocity-stress finite-difference method,” *Geophysics* 51, 889–901 (1986).

© B. C. Захаров, 2026

А. П. Золоторенко¹✉, В. В. Лапковский^{1,2}

Разработка алгоритма построения 3D моделей геологических объектов с использованием адаптивной реструктуризации сеток

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: a.zolotorenko@g.nsu.ru

Аннотация. Детальные трехмерные модели осадочных комплексов позволяют существенно повысить эффективность поисков, разведки и освоения месторождений углеводородов. Существует большое количество методов создания таких моделей на основе данных бурения и сейсморазведки. Одним из передовых подходов является метод потенциального поля, в котором пластопересечения различных стратиграфических границ представляются как точки с известными значениями потенциала трехмерного поля. Эти данные аппроксимируются трехмерной функцией и геологические границы представляются как набор изоповерхностей аппроксимирующей функции. Для сложных геологических объектов возникают трудности, прежде всего, связанные с необходимостью учитывать существующие разрывные нарушения. Решению задачи эффективного включения в модель разрывных нарушений посвящено данное исследование. Предлагается усовершенствование методов потенциального поля, а именно, изменить способ вычисления расстояния между точками пространства, которые находятся по разные стороны от разрывов. Это решение можно использовать для модификации процедуры трехмерного кригинга. В статье представлен алгоритм реструктуризации трехмерной сетки для моделирования разломов. Алгоритм может быть интегрирован в программное обеспечение интерпретации сейсмических и скважинных данных, позволяя повысить точность моделирования недр.

Ключевые слова: трехмерное моделирование, геологические модели, метод потенциального поля, кригинг, реструктуризация сетки, разлом

A. P. Zolotorenko¹✉, V. V. Lapkovskiy^{1,2}

Development of an algorithm for constructing 3D models of geological objects using adaptive grid restructuring

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

²Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: a.zolotorenko@g.nsu.ru

Abstract. Detailed three-dimensional models of sedimentary complexes can significantly improve the efficiency of hydrocarbon exploration, development, and production. There are various methods for creating such models based on drilling and seismic data. One of the advanced approaches is the potential field method, where the intersection points of different stratigraphic boundaries are represented as points with known values of the three-dimensional potential field. These data are approximated by a three-dimensional function, and the geological boundaries are represented as a set of isosurfaces of the approximating function. However, there are challenges associated with complex geological structures, particularly when it comes to incorporating existing faults into the model. This study aims to address the issue of effectively incorporating faults into the model. The proposed

solution involves improving the potential field method by modifying the way the distance between points in space is calculated. This solution can be used to modify the three-dimensional kriging procedure. The article presents an algorithm for restructuring the three-dimensional grid to model faults. This algorithm can be integrated into seismic and well data interpretation software, enhancing the accuracy of subsurface modeling.

Keywords: three-dimensional modeling, geological models, potential field method, kriging, grid restructuring, fault

Введение

Современное освоение недр базируется на точных трёхмерных геологических моделях, которые служат основой для понимания строения недр, оценки ресурсов, прогнозирования рисков и оптимизации инженерных решений. Перспективным инструментом их построения является метод потенциального поля, представляющий геологическое пространство как непрерывное скалярное поле, где границы тел соответствуют изоповерхностям [1]. Однако стандартный метод не позволяет моделировать разломы - нарушения сплошности пород со смещением блоков, что критически важно для создания качественных моделей сложных объектов. Цель работы - разработать и апробировать модифицированный метод потенциального поля с реструктуризацией сетки для автоматизированной генерации разломов в 2D и 3D моделях. В статье представлены теоретические основы, алгоритм (включающий динамическую сетку и модификацию кригинга с добавлением расстояния обхода разлома), представлены результаты 2D и 3D случаев.

Методы и материалы

Согласно методу потенциального поля, геологическое пространство моделируется непрерывным трёхмерным скалярным полем. Потенциальное поле известно лишь по дискретным или бесконечно малым приращениям. В связи с этим для интерполяции данных фиксируется произвольное начало отсчета x_0 , и в любой точке x выполняется кригинг приращения потенциала $T^*(x) - T^*(x_0)$:

$$T^*(x) - T^*(x_0) = \sum_{\alpha=1}^M \mu_{\alpha} (T(x_{\alpha}) - T(x'_{\alpha})) + \sum_{\beta=1}^N v_{\beta} \frac{dT}{du_{\beta}}(x_{\beta}) \quad (1)$$

где веса μ_{α} и v_{β} , являющиеся решением системы кригинга, по сути, представляют собой функции от x и x_0 .

Для моделирования разлома предлагается модифицировать кригинг путём введения дополнительного расстояния обхода разлома в метрику пространства. Идея заключается в том, чтобы существенно ослабить взаимное влияние данных, лежащих по разные стороны от разлома.

Пусть x_a и x_b - две точки, между которыми вычисляется расстояние. Если отрезок (x_a, x_b) пересекает поверхность разлома, то вместо евклидова расстояния используется модифицированное расстояние:

$$d_{\text{mod}}(\mathbf{x}_a, \mathbf{x}_b) = \|\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_b\| + \lambda \cdot d_{\text{bypass}}(\mathbf{x}_a, \mathbf{x}_b) \quad (2)$$

где λ - коэффициент, управляющий степенью разрыва; d_{bypass} - дополнительное расстояние обхода, например, путь вдоль поверхности разлома.

Тогда в системе кригинга вместо стандартной ковариационной функции $C(h)$ используется функция $C_{\text{mod}}(d_{\text{mod}})$. В результате кригинг остаётся формально тем же самым, но веса μ_α и ν_β вычисляются с учётом модифицированных расстояний, что автоматически создаёт разрыв поля вдоль поверхности разлома без нефизичного сглаживания. Работу алгоритма генерации разломов можно представить в виде схемы (рис. 1).

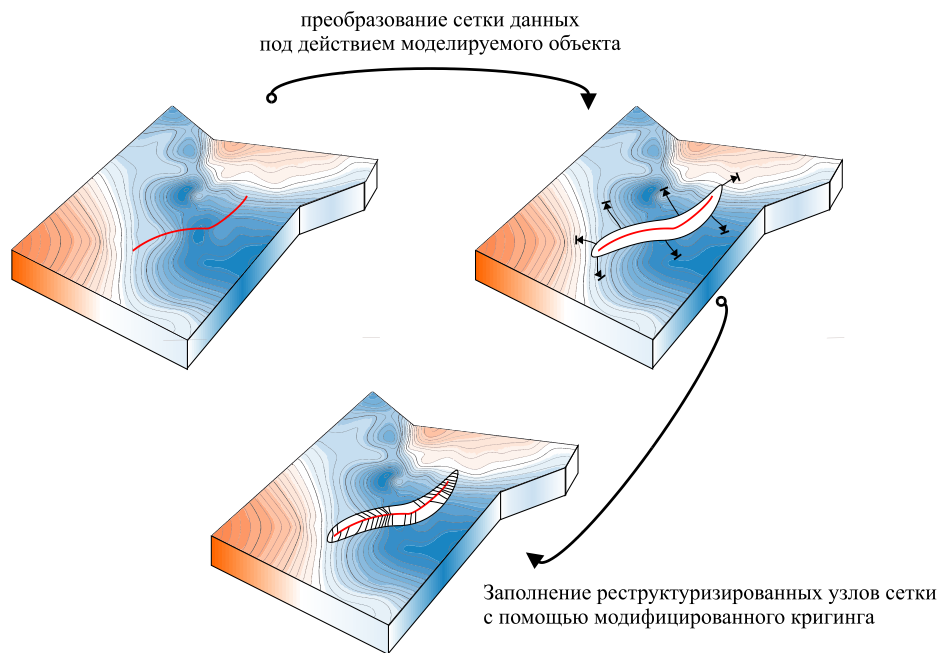


Рис. 1. Схема работы алгоритма генерации сложных структур

Результаты

Алгоритм был реализован для 2D и 3D сеток. В 2D случае разлом вносится в существующую сетку путём раздвигания узлов сетки по контуру [2]. Алгоритм проверяет пересечение отрезка между двумя точками с линией разлома и при наличии пересечения добавляет дополнительное расстояние до границы разлома. В результате поле разрывается вдоль линии разлома без нефизичного сглаживания (рис. 2).

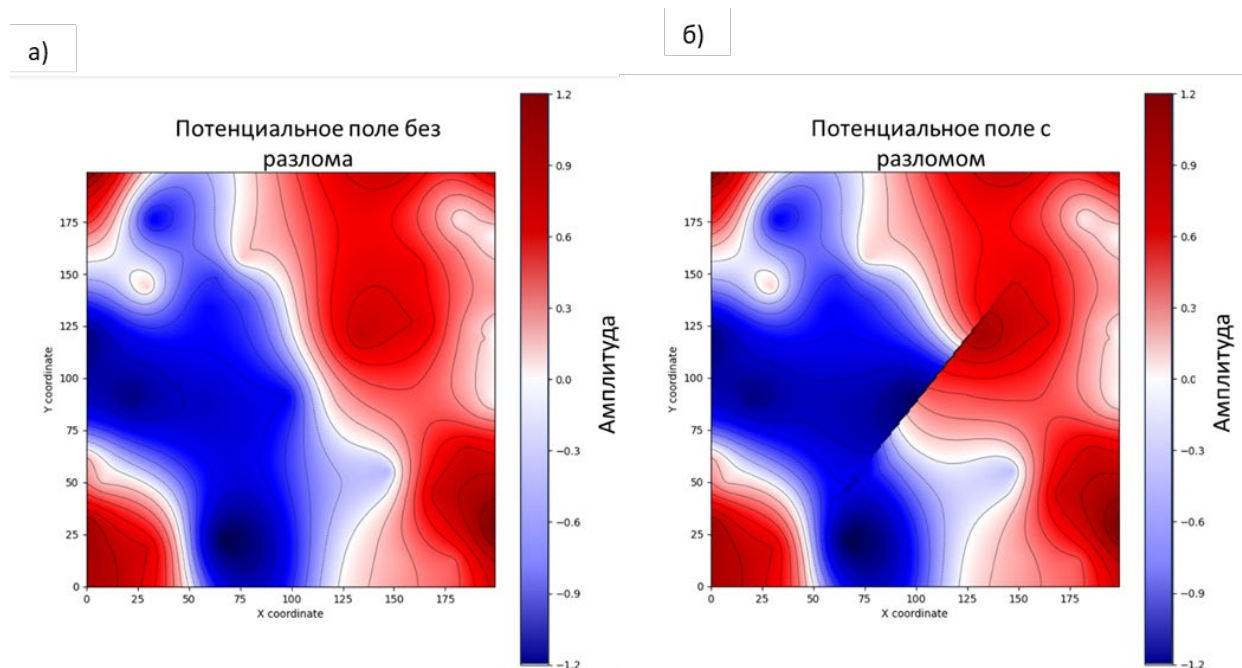


Рис. 2. а) Сетка без разлома, б) Сетка с разломом

В 3D случае разлом задаётся плоскостью, алгоритм проверяет пересечение отрезка с плоскостью разлома и добавляет дополнительное расстояние обхода вдоль плоскости, что обеспечивает корректный разрыв поля в трёхмерном пространстве (рис. 3).

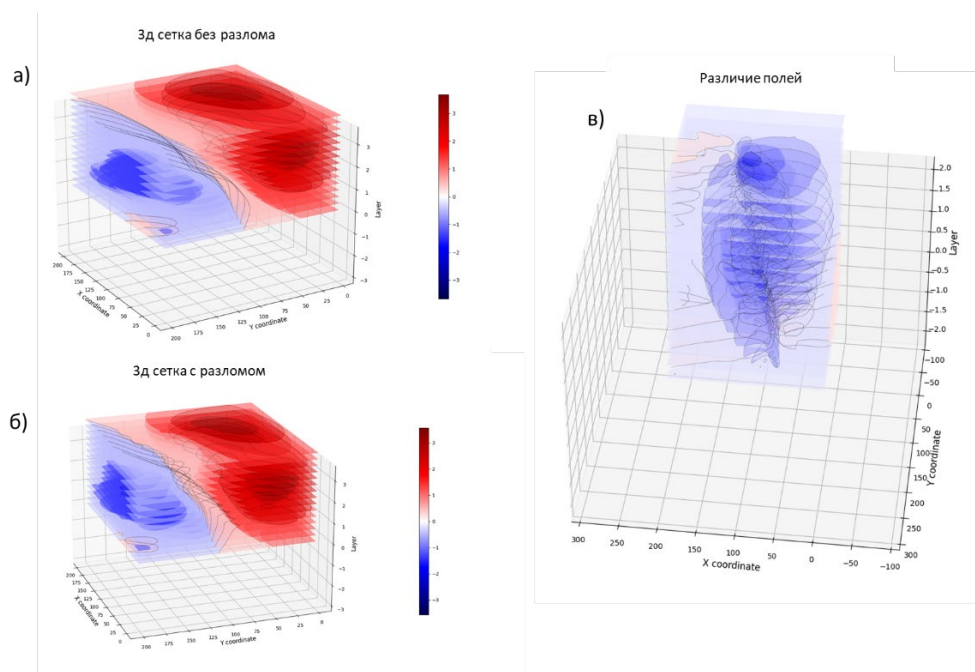


Рис. 3. а) 3D сетка без разлома, б) 3D сетка с разломом, в) Разница между модифицированным полем (с разломом) и изначальным полем (без разлома)

Обсуждение

Модифицированный метод потенциального поля с реструктуризацией сетки успешно решает задачу автоматизированной генерации разломов в 2D и 3D. Ключевым результатом является то, что введение дополнительного расстояния обхода разлома в кригинг позволяет создавать разрыв поля строго вдоль заданной линии (2D) или плоскости (3D) без нефизичного сглаживания. При этом вдали от разлома поле остаётся неизменным (разница близка к нулю). Это подтверждает, что алгоритм вносит искажения исключительно там, где это необходимо, и не нарушает общую структуру поля.

Заключение

В ходе выполнения данной работы были реализованы 2D и 3D прототипы модифицированного метода потенциального поля с реструктуризацией сетки для автоматизированной генерации разломов. На текущем этапе алгоритм успешно работает для простых видов разломов: отрезка в 2D и прямоугольной плоскости в 3D. Было показано, что введение дополнительного расстояния обхода разлома в кригинг позволяет создавать корректный разрыв поля вдоль заданной линии или плоскости без нефизичного сглаживания и без искажений в удалённых от разлома областях. В дальнейшем планируется расширить работу алгоритма для криволинейных поверхностей разломов. Кроме того, планируется интегрировать разработанный алгоритм в промышленное программное обеспечение для интерпретации сейсмических и скважинных данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chilès J. P. et al. Modelling the geometry of geological units and its uncertainty in 3D from structural data: the potential-field method : Proceedings of international symposium on orebody modelling and strategic mine planning, Perth, Australia, 2004. – Т. 22. – С. 24.
2. Lie K. A. An introduction to reservoir simulation using MATLAB/GNU Octave: User guide for the MATLAB Reservoir Simulation Toolbox (MRST). – Cambridge University Press, 2019.

© А. П. Золоторенко, В. В. Лапковский, 2026

П. И. Зувев¹✉

Исследование современной геодинамики методом радонометрии

¹Институт горного дела Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация
e-mail: zuev@igduran.ru

Аннотация. В статье представлены результаты комплексных геофизических исследований, направленных на оценку эффективности радонометрии для мониторинга современной геодинамической активности и идентификации структурно-геодинамических зон в пределах территорий, подверженных горным работам. Полевые работы выполнены на участке Берёзовского золоторудного месторождения, расположенном над ликвидированной подземной выработкой, контуры которой были предварительно установлены методами электротомографии и сейсморазведки. Анализ эманиционных данных позволил выявить устойчивые корреляции между радонометрическими параметрами растяжения и сжатия горного массива и уровнем его геодинамической напряжённости. На основе полученных зависимостей разработана методика пространственного выявления и классификации деформационных зон, что расширяет возможности прогноза геодинамических рисков на подработанных территориях.

Ключевые слова: радон, торон, сжатие, растяжение, геодинамика

P. I. Zuev¹✉

Study of present-day geodynamics using radonometry

¹Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russian Federation
e-mail: zuev@igduran.ru

Abstract. This paper presents the results of comprehensive geophysical studies aimed at evaluating the effectiveness of radonometry for monitoring present-day geodynamic activity and identifying structural-geodynamic zones within areas affected by mining operations. Fieldwork was conducted at a test site within the Berezovskoye gold deposit, located directly above a backfilled underground mine working, whose boundaries were previously delineated using electrical resistivity tomography and seismic survey methods. Analysis of emanation data revealed consistent correlations between radonometric parameters indicating tension and compression in the rock mass and the level of its geodynamic stress. Based on these established relationships, a methodology for spatial detection and classification of deformation zones has been developed, enhancing the capability to predict geodynamic hazards in mined areas.

Keywords: radon, thoron, compression, tension, geodynamics

Введение

Комплексное инженерно-геофизическое обследование подработанных массивов горных пород является необходимым условием обеспечения промышленной безопасности и устойчивости ответственных объектов недропользования.

Объектом исследований выступил участок в пределах Берёзовского золоторудного месторождения, здесь велась активная подземная разработка с XVIII до

начала XX века, характеризовалась отработкой на глубинах до 50 м. Было заложено свыше тысячи мелких шахтных стволов, так же осуществлялась нелегальная добыча, место таких выработок не зафиксировано [1,2,3].

Для локализации потенциально опасных зон сначала применялась электро-томография. На одном из профилей на глубине около 10 м была зафиксирована чёткая геоэлектрическая аномалия, интерпретированная как зона разуплотнения массива, связанная с погашенной горизонтальной выработки. Для верификации полученных данных были проведены сейсморазведочные работы. Анализ разреза коэффициента Пуассона подтвердил наличие локального участка с пониженными упругими характеристиками грунтов на глубине ~ 10 м, что пространственно коррелирует с результатами электротомографии.

Несмотря на успешную локализацию неоднородностей, для оценки геодинамических процессов были проведены радонометрические исследования, в том числе для выявления и пространственного оконтуривания деформационных зон в плане, что и составляет предмет настоящего исследования. Материал статьи представляет собой продолжение предыдущих геофизических исследований лаборатории.

Методы и материалы

Измерения объёмной активности радона (ОАР, Бк/м³) в почвенном воздухе выполнялись радиометром альфа-активных газов РГА-500 по профильным линиям. Отбор проб осуществлялся из шпуров глубиной 0,8 м.

Для выделения геодинамической составляющей в формировании радонового поля проводилось нормирование измеренных значений ОАР. С этой целью данные группировались по однородным геохимическим и гидрогеологическим условиям [4,5,6,7]. Рассчитываются нормированные значения ОАР для каждой точки измерения:

$$N_i = Q_i / Q_{\text{ср. группы}} \quad (1)$$

где N_i – нормированная объёмная активность радона точки измерения; i – безразмерная величина; Q_i – значение объёмной активности радона в почвенном воздухе точки измерения на профильной линии, Бк/м³; $Q_{\text{ср. группы}}$ – среднеарифметическое значение объёмной активности радона в почвенном воздухе группы значений, Бк/м³.

Составляется карта распределения нормированных значений объёмной активности радона в почвенном воздухе, далее осуществляется геодинамическое районирование. Определялось суммарное и раздельное содержание объёмной активности почвенного радона (^{222}Rn) и торона (^{220}Tn): $Q^{222}\text{Rn} + Q^{220}\text{Rn}$, $Q^{222}\text{Rn}$ и $Q^{220}\text{Rn}$ [8,9].

Для картирования деформационных зон растяжения (A_p) и сжатия (A_c) применялись расчётные соотношения:

$$A_p = Q^{222}\text{Rn} / Q^{220}\text{Rn} \quad (2)$$

$$A_c = Q^{220}Rn / Q^{222}Rn \quad (3)$$

где $Q^{222}Rn$ – объёмная активность ^{222}Rn , Бк/м³; $Q^{220}Rn$ – объёмная активность ^{220}Rn , Бк/м³.

После отбора проба почвенного воздуха выдерживалась в измерительной камере в течение 300с для полного распада короткоживущего ^{220}Rn (период полураспада ~55с). Повторное измерение позволяло определить объёмную активность ^{222}Rn . Исследования проводились на участке размером 20×35 м, над аномалией разуплотнения, выявленной ранее методами электротомографии. Съёмка выполнялась по регулярной сети 5×5 м, в 40 точках.

Результаты

Согласно карте геодинамического районирования, аномалии нормированных значений ОАР в почвенном воздухе пространственно приурочены к местам расположения погашенных вертикальных горных выработок, что подтверждает эффективность предложенного подхода для локализации скрытых деформационных зон [10,11] (рис.1,2,3).

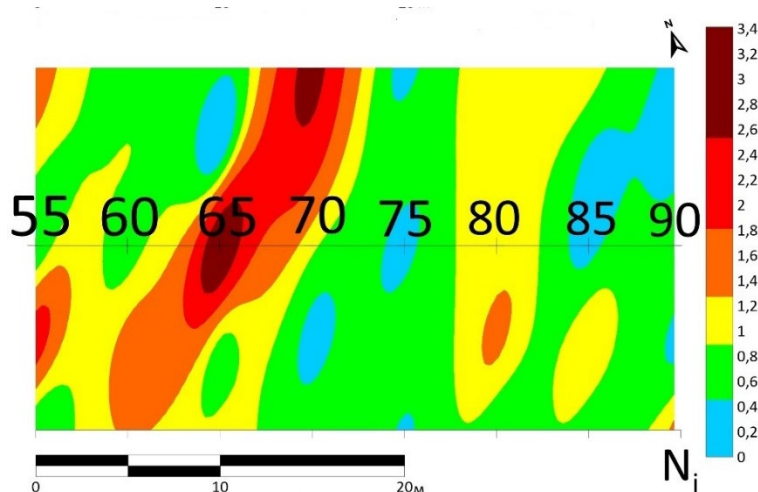


Рис. 1. Карта относительной современной геодинамической активности N_i .

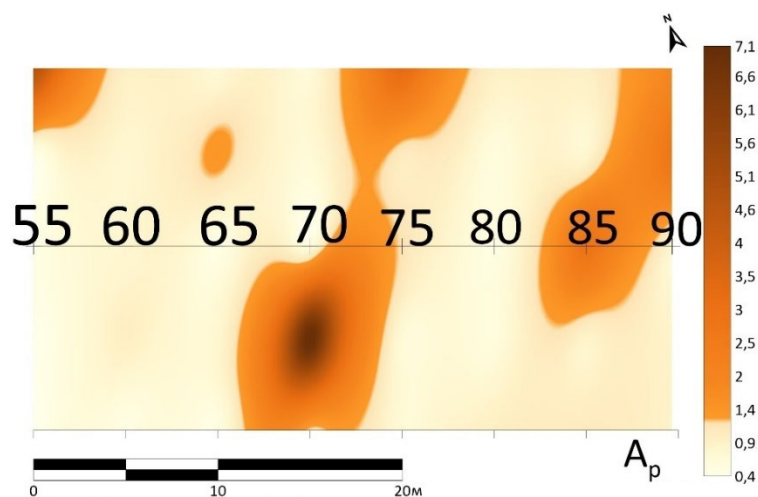


Рис. 2. Карта распределения показателя деформаций растяжения A_p .

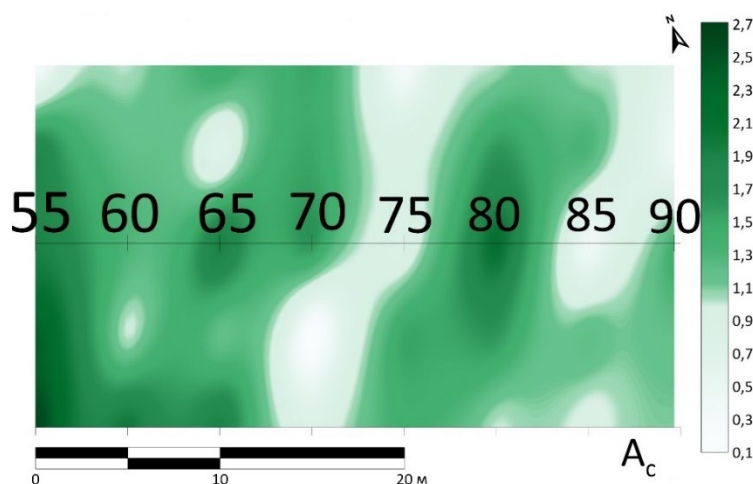


Рис. 3. Карта распределения показателя деформаций сжатия A_c .

Обсуждение

Интерпретация полученных данных проведена с учётом современных представлений о механизмах формирования почвенного радона (^{222}Rn) [12,13,14,15,16]:

1. Аномальные значения показателя A_p приурочены к зонам, где нарушен естественный канал поступления ^{222}Rn . Разуплотнение пород, вызванное неглубоким техногенным объектом, формирует приповерхностный слой с повышенной пористостью. В таких условиях миграция ^{222}Rn к поверхности осуществляется преимущественно диффузионным, конвективным и эффузионным путями, что приводит к снижению его концентрации. При этом сохраняется исходное соотношение $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$, что указывает на неизменность генетических процессов изотопного образования. Следовательно, отклонения показателя A_p могут служить надёжным индикатором зон разуплотнения [17,18].

2. К западу и востоку от выявленной зоны разуплотнения прослеживаются субмеридиональные участки с повышенными значениями показателя A_c . Увеличение концентрации почвенного радона здесь обусловлено вибрационным воздейст-

вием, сопровождающим процессы сжатия и деформирования горного массива, что повышает газопроницаемость пород и способствует локальной аккумуляции радона.

3. В северо-западной части исследуемой территории зафиксирована аномалия A_p , пространственно сопряжённая с зоной активного дизъюнктивного нарушения. Преобладание растягивающих деформаций в данной зоне создаёт условия для интенсивной миграции газообразных флюидов, что и отражается в изменении показателя A_p [19,20].

Заключение

На основе современных теоретических представлений о формировании почвенного радонового поля экспериментально подтверждена устойчивая корреляция между радонометрическими показателями и характером геодинамических напряжений в горном массиве. Установленные закономерности позволили надёжно идентифицировать и классифицировать типы деформационных структур по характеру радоновых аномалий на: – малоглубинные зоны разуплотнения; – активные дизъюнктивные нарушения; – участки деформаций сжатия.

Практическая апробация радонометрии на локальном участке подработанной территории подтвердила её высокую информативность для оперативной оценки современной геодинамической активности. Полученные результаты свидетельствуют о значительном потенциале метода для решения прикладных задач инженерной геологии, мониторинга устойчивости горных массивов и прогнозирования деформационных процессов в зонах техногенного воздействия.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00408-26-00. № гос. рег. 123012300007-7. Тема 3 (2025-2027). Выявление закономерностей развития геодинамических процессов в условиях техногенного преобразования недр и разработка мер по повышению безопасности горного производства (FUWE-2025-0003).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zuev P., Vedernikov A., Grigoriev D. Using the method of electrical imaging for obtaining the modulus of elasticity in open cast mining // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 192. Art. 01030. DOI: 10.1051/e3sconf/202019201030.
2. Electric resistivity and seismic refraction tomography: a challenging joint underwater survey at Äspö Hard Rock Laboratory / M. Ronczka, K. Hellman, T. Günther, R. Wisén, T. Dahlin, // Solid Earth. 2017. V. 8. 671 – 682. doi.org/10.5194/se-8—671—2017.
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000: объясн. записка к листу О-41-XXV / Р. Д. Калугина, В. Ф. Копанев, Е. В. Стороженко [и др.]; Роснедра, ОАО «Уральская ГСЭ». 2-е изд. М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2017. 156 с.
4. Уткин В.И. Юрков А.К. Радон как индикатор геодинамических процессов // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 2. С. 277 – 286.
5. Далатказин Т.Ш. Методические вопросы геодинамического районирования массива горных пород с использованием радонометрии // Проблемы недропользования. 2023. № 1. С. 64 – 69.

6. Методы мониторинга радоновыделения для изучения геодинамически активных зон горного массива / Е.А. Ялпута, Р.П. Базеева, Э.В. Донченко, О.Л. Шалованов, С.Г. Салий, Д.С. Бородин // Журнал теоретической и прикладной механики. 2020. № 3 (72). С. 57 – 64
7. Уткин В. И., Юрков А. К., Козлова И. А. Выделение радона из горных пород при воздействии на них упругих колебаний различного диапазона // Геофизика XXI столетия: сб. тр. девярых геофизических чтений им. В. В. Федынского. Тверь: ГЕРС, 2008. С. 317–320.
8. Bossew P. The radon emanation power of building materials, soils and rocks. Appl. Radiat. Isot. 2003. V. 59. 389 – 392.
9. Ульянов В.Ю. Организация и методика проведения мониторинга радона на площадках АЭС в асейсмичных регионах // Проблемы гедропользования. 2015. № 1. С. 103 – 107.
10. Далатказин Т. Ш., Зуев П. И. Способ выявления, определения характера и причин образования деформаций в массиве горных пород: пат. 2849486 Рос. Федерация, МПК G01V 9/00; заявл. 14.02.2025; опубл. 27.10.2025.
11. Далатказин Т. Ш., Зуев П. И. Способ геодинамического районирования горного массива с использованием радонометрии: пат. 2793085 Рос. Федерация, МПК G01V 9/00; заявл. 25.05.2022; опубл. 28.03.2023.
12. Сердюкова А. С., Капитонов Ю.Т. Изотопы радона и короткоживущие продукты их распада в природе. М.: Атомиздат, 1969. 312 с.
13. Исследования по модернизации использования эманационной съемки в качестве экспресс-метода при геодинамической диагностике / Т.Ш. Далатказин, Ю.П. Коновалова, В.И. Ручкин, П.И. Зуев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. Вып. 4. С.206 – 220
14. A universal laboratory method for determining physical parameters of radon migration in dry granulated porous media / Y.J. Ye, Y.F. Zhang, X.T. Dai, D.X. Ding // J. Environ. Radioact. 2017. V. 177. 135 – 141.
15. Семинский К.Ж., Бобров А.А., Дэмбэрэл С. Радоновая и тектоническая активность разломов земной коры (на примере Центральной Монголии) // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 2. С. 243 – 255
16. Спивак А.А. Объемная активность подпочвенного радона в зонах тектонических нарушений. Геофизика межгеосферных взаимодействий. М.: ГЕОС, 2008. С. 235 – 247.
17. Уткин В. И., Юрков А. К., Козлова И. А. Выделение радона из горных пород при воздействии на них упругих колебаний различного диапазона // Геофизика XXI столетия: сб. тр. девярых геофизических чтений им. В.В. Федынского. Тверь: ООО Изд-во «ГЕРС», 2008. С. 317 – 320.
18. Behaviour of radon in the geological environment: a review / Т.К. Ball, D.G. Cameron, Т.В. Colman, P.D. Roberts // Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol. 1991. V. 24. P. 169 – 182.
19. Резонансные особенности эсхалиции природного радона / В. В. Адушкин [и др.] // ДАН. 2005. Т. 400. № 3. С. 369 – 371.
20. Селюков Е.И., Стигнеева Л.Т. Краткие очерки практической микрогеодинамики. СПб.: Питер, 2010. 176 с.

© П. И. Зуев, 2026

Н. Н. Семаков¹, А. Ф. Павлов², С. А. Казанцев²✉

Феррозондовый нуль-индикатор магнитной индукции

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: kazantsevsa@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Представлен опыт разработки однокомпонентного магнитометра на базе миниатюрного феррозондового датчика для измерения магнитной индукции. Феррозондовый датчик используется как нуль-индикатор для определения направления вектора магнитного поля. Описан опыт изготовления феррозондового датчика и принцип его работы.

Ключевые слова: датчик, ферромагнитный сердечник, магнитное поле

N. N. Semakov¹, A. F. Pavlov², S. A. Kazantsev²✉

Fluxgate magnetic induction zero-indicator

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

²Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: kazantsevsa@ipgg.sbras.ru

Abstract. This paper presents the development of a single-component magnetometer based on a miniature fluxgate sensor for measuring magnetic induction. The fluxgate sensor is used as a zero-indicator to determine the direction of the magnetic field vector. The fabrication of the fluxgate sensor and its operating principle are described.

Keywords: sensor, ferromagnetic core, magnetic field

Измерения магнитного поля земли (МПЗ) проводятся в большинстве случаев с помощью протонно-прецессионного магнитометра. Такой прибор измеряет абсолютную величину напряженности магнитного поля, но не его направление. Создание высокочувствительного Феррозондового Индикатора Направлений Ортогональных Магнитной Индукции (ФИНОМИНа) актуально как для обсерваторских и полевых магнитных работ, так и для исследований в тех областях, где нужна информация о точном направлении лабораторного магнитного поля в конкретной точке. Проблема разработки комплекса "размагниченный теодолит - ФИНОМИН" по своему решается единичными производителями в Европе и Северной Америке. В России известен портативный феррозондовый инклинометр-деклинометр на немагнитном теодолите LEMI-204 производства Львовского центра Института космических исследований Украины. В настоящее время доступен ограниченно.

В полевых условиях для получения ориентации вектора напряженности магнитного поля используется феррозондовый магнитометр. Один из вариантов

такого магнитометра, не уступающий зарубежным образцам по чувствительности и превосходящий их по потребляемой энергоемкости, был разработан и изготовлен в Институте нефтегазовой геологии и геофизики.

Фиксации указанных ортогональных положений магнитной оси датчика-индикатора в горизонтальной и вертикальной плоскостях для измерения углов склонения и наклонения осуществляется немагнитным теодолитом, к трубе которого крепится датчик. Размагничивание теодолитов с немагнитными вертикальными осями особой проблемой не является.

Несколько экземпляров феррозондовых магнитометров успешно применяется как в полевых работах, так и в процессе обучения студентов университета.

Феррозондовый магнитометр состоит из двух основных частей это феррозондовый датчик и блок измерения и индикации. Феррозондовый магнитометрический датчик построен по классической схеме [1] (рис 1).

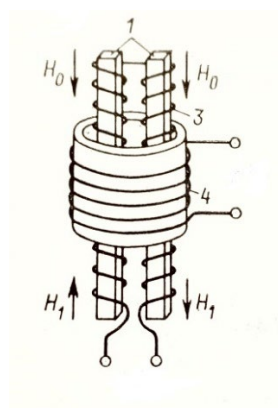


Рис. 1. Конструкция феррозондового датчика

Датчик содержит два магнитопроводящих сердечника 1 на основе плоской магнитной пленки из аморфного ферромагнитного сплава. На них расположены две, включенных встречно, катушки возбуждения 3 и третья измерительная катушка 4.

Применение сердечников из ленточного магнитопровода, на основе плоской магнитной пленки из аморфного ферромагнитного сплава обеспечивает повышение частоты возбуждения до десятков килогерц, что в свою очередь обеспечивает снижение внутренних шумов датчика.

Блок измерения и индикации (рис. 2) в свою очередь состоит из опорного генератора, усилителя и формирователя сигнала, катушки возбуждения, приемной катушки, селективного усилителя, фазового детектора, усилителя и индикатора. Блок питания батарейный.



Рис. 2. Блок схема феррозондового индикатора.

Работает устройство следующим образом. С генератора сигнал частотой порядка 10 кГц усиливается и подается на катушки возбуждения. Колебательный контур этой катушки переменными электронными компонентами настраивается в резонанс на частоту генератора по максимуму выходного сигнала. Так как катушки возбуждения включены встречно, то при подаче на них тока сердечник переманичивается до насыщения, возникающие магнитные поля направлены встречно (H_1 рис. 1) и при отсутствии внешнего магнитного поля, ЭДС в измерительной катушке будет равна нулю. Сердечники переманичиваются по предельной петле гистерезиса. Внешнее поле (H_0 рис. 1) нарушает симметрию переманичивания, индуцируя в приемной обмотке сигнал, пропорциональный величине внешнего поля. В определенный момент времени один из сердечников окажется намагничен до насыщения, и его магнитная проницаемость резко уменьшится, а второй сердечник еще не достигнет насыщения, так как внешнее и внутреннее магнитные поля будут для него в этот момент встречными. Магнитная проницаемость этого сердечника будет достаточно велика. Через половину периода уже в первом сердечнике магнитные поля будут вычитаться, а во втором складываться. Таким образом в измерительной обмотке будет возникать ЭДС с удвоенной частотой, примерно 20 кГц. Приемная катушка в свою очередь настраивается в резонанс по максимальному сигналу на удвоенной частоте генератора. Затем сигнал усиливается селективным усилителем, детектируется по фазе и поступает на выходной усилитель. Выходной усилитель выдает сигнал на индикатор. Наиболее простым индикатором может служить миллиамперметр с нулевой точкой отсчета посередине шкалы. Величина тока и отклонение стрелки будут пропорциональны величине внешнего магнитного поля.

Диаграмма направления чувствительности приемной катушки имеет вид восьмерки. В зависимости от направления внешнего магнитного поля и продольной оси датчика, фаза сигнала в одной половине диаграммы будет отличаться от фазы сигнала в другой половине диаграммы на 180 град. С минимальной чувствительностью

при случае ортогональности наружного магнитного поля и продольной оси приемной катушки.

В качестве индикатора выходного сигнала используется стрелочный микроамперметр. При проведении полевых абсолютных геомагнитных измерений стрелочный прибор имеет ряд технологических преимуществ. Земное магнитное поле все время меняется, при этом стрелка микроамперметра колеблется, но глаз наблюдателя как бы «интегрирует» ее положение, определяя нулевое положение, соответствующее перпендикуляру оси датчика к вектору магнитной индукции в данный момент и данном месте.

Чувствительность измерителя составляет 0,1 нТл при соотношении сигнал/шум = 1 (в полосе частот 0-20 гц).

Датчик крепится на немагнитный теодолит так, чтобы ось его магнитной чувствительности максимально совпадала с оптической осью теодолита. Устанавливая датчик перпендикулярно направлению магнитного поля можно определить направление магнитного меридиана, а также угол наклона магнитной индукции в данном месте.

В данном случае феррозондовый датчик выполняет только функцию нуль-индикатора для определения вектора направления магнитного поля.

В Институте ведется постоянная работа по модернизации прибора и перевод его на современную элементную базу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы. Энергоатомиздат, 1986 г.

© Н. Н. Семаков, А. Ф. Павлов, С. А. Казанцев, 2026

В. А. Какуля¹✉, М. Н. Балдин¹, В. В. Федотов¹

Устранение явления «пробоя» при анализе сорберов для задач поисковой геохимии

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: kakulyav@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В настоящей работе в рамках развития технологии поисковой геохимии с помощью газодинамической изоляции устранен «пробой» – преждевременное попадание части пробы из камеры ввода в газохроматографическую колонку хроматографа «ЭХО-В-ФИД». Установлен сбросовый поток, исключающий возникновение «пробоя». Количественно определены концентрации аналитов, проникающих в колонку при «пробое», в зависимости от величины сбросового потока.

Ключевые слова: газодинамическая изоляция, сбросовый поток, поисковая геохимия, искусственные сорберы, анализ БТК

V. A. Kakulya¹✉, M. N. Baldin¹, V. V. Fedotov¹

Eliminating the “breakthrough” phenomenon in the analysis of sorbents for exploration geochemistry

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: kakulyav@ipgg.sbras.ru

Abstract. In this study, the "breakthrough" – the premature entry of part of the sample from the sample introduction chamber into the gas chromatograph "ECHO-V-PID" gas chromatography column – was eliminated using gas-dynamic isolation technology. A discharge flow was established that prevents the occurrence of a "breakthrough". The concentrations of analytes that penetrate the column during a "breakthrough" were quantitatively determined as a function of the discharge flow rate.

Keywords: gas-dynamic isolation, discharge flow, exploration geochemistry, artificial sorbents, BTK analysis

Введение

В рамках развития полевой экспрессной геохимической съемки с применением портативного газохроматографического комплекса «ЭХО» и пассивного концентрирования на основе искусственных сорберов проводится совершенствование приборной аналитической базы. Комплекс «ЭХО» применяется для количественного и качественного анализа следовых концентраций углеводородов в экспресс-режиме и в полевых условиях для задач поисковой геохимии. Пробоотбор происходит с использованием искусственных сорберов (концентраторов), которые после насыщения в грунте анализируются на газовом хроматографе «ЭХО-В-ФИД» в режиме анализа с концентрационным инжектором.

В режиме анализа с концентрационным инжектором после помещения сорбера в камеру ввода наблюдалось негативное явление – преждевременное попадание части пробы, отобранной на сорбер, из камеры устройства ввода (УВ) в газохроматографическую колонку (ГХК), или «пробой» газа из УВ в ГХК. «Пробой» вызывает появление дополнительных «ложных» пиков на хроматограмме, что вносит неопределенность в интерпретацию результатов.

Устранение «пробоя» проводилось с помощью газодинамической изоляции согласно [1], т. е. посредством добавления малого сбросового потока газа-носителя от ГХК в УВ (рис. 1). Такой сбросовой поток препятствует возникновению «пробоя», с одной стороны, но уменьшает количество введенной пробы – с другой. В связи с этим возникла необходимость не только определить оптимальный сбросовой поток газодинамической изоляции, но и потери введенных аналитов.

Цель исследований: устранить преждевременное попадание аналитов из камеры ввода в газохроматографическую колонку.

Экспериментальная часть

Аналиты. В качестве источников эталонных концентраций бензола, толуола и ксилолов использовались ампулы-источники микропотоков производства ООО «Мониторинг» [2].

Приборы и аналитическое оборудование:

- портативный поликапиллярный газовый хроматограф ЭХО-В-ФИД (далее ГХ) с воздухом в качестве газа-носителя [3-5];
- эталон 1-го разряда «Микрогаз-ФМ40» (далее «ФМ40») производства ООО «СКБ-хроманалитик» с размещенными в нем ампулами-источниками БТК применялся для генерации эталонных концентраций аренов [6];
- искусственные сорберы на основе гидрофобного сорбента полидиметилсилоксана SE-30 [7];
- термостатированная камера для насыщения сорберов.

С постоянным потоком очищенного воздуха $N \approx 1000 \text{ см}^3/\text{мин}$ в термостатированную камеру с заранее размещенными сорберами подавались концентрации ($\times 10^{-12} \text{ г/см}^3/\text{мин}$): бензола $C_B = 84$; толуола $C_T = 99$; м-ксилола $C_{\text{М-кси}} = 31,3$; о-ксилола $C_{\text{О-кси}} = 48$ согласно схеме [7]. Совокупная погрешность прибора и ампул-источников производства ООО «Мониторинг» $\pm 11,0\%$ [2, 6].

Схема анализа искусственных сорберов (концентраторов) с газодинамической изоляцией представлена на рисунке 1. Согласно схеме, сорбер 1 помещают в камеру ввода 3, нагретую до 200°C , и выдерживают его (термодесорбируют) 30 секунд при закрытом клапане 5 и открытом клапане 4. После нагрева клапан 4 закрывается и открывагазается клапан 5. Проба в течение 3,5 секунд вводится в колонку (ГХК) 6 через тонкий капилляр 7 с потоком газа-носителя (ГН) около $40 \text{ см}^3/\text{мин}$. По окончании ввода пробы клапан 5 закрывается, а клапан 4 открывается, и ГН поступает в ГХК 6 и транспортирует пробу через колонку до детектора. Для устранения «пробоя» на этапе термодесорбции в камеру ввода через открытый клапан 4 и тонкий капилляр 7 поступает обратный сбросовой поток 2.

Одной из задач было экспериментально установить его величину. Величина обратного сбросового потока регулируется дросселем 8 [1].

Время нагрева в 30 секунд было ранее определено экспериментально [7]. Время инъекции было выбрано равным 3,5 секунд исходя из оптимального соотношения высот пиков и эффективности разделения.

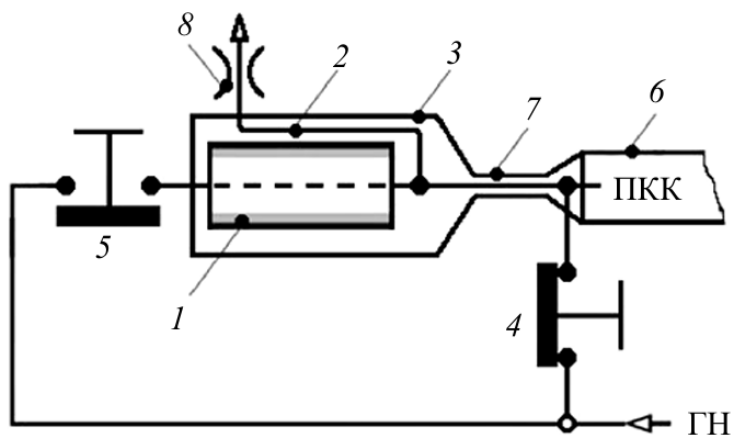


Рис. 1. Схема ввода углеводородов с сорбера с газодинамической изоляцией камеры ввода от колонки
(1 – сорбер; 2 – сбросовой поток; 3 – камера ввода термостатирована при 200 °С; 4, 5 – электромагнитные клапаны; 6 – поликапиллярная колонка (ГХК); 7 – тонкий капилляр, соединяющий камеру ввода и колонку; 8 – ограничитель потока или дроссель; ГН – газ-носитель) [1]

Результаты и их обсуждение

Определение и устранение «пробоя». В режиме анализа с концентрационным инжектором при нулевом времени нагрева и нулевом времени инъекции были проведены измерения насыщенных сорберов с постепенным увеличением сбросового потока каждый раз на 0,25 мл/мин. Время инъекции устанавливается равным нулю, т.е. инъекция отключается вовсе, для того чтобы зарегистрировать «пробой». В отсутствии инъекции проба не должна попадать в колонку (ГХК). Однако при установке инжектора с концентратором в камеру ввода из-за перепада давления, а также в результате расширения газа в процессе нагрева при термодесорбции, часть пробы проникает в ГХК, т.е. происходит «пробой». Для его устранения вводится запирающий сбросовой поток от ГХК в камеру ввода (рис. 1). С увеличением сбросового потока «пробой» должен снижаться вплоть до исчезновения.

Количественный анализ «пробоя» на примере бензола и о-ксилола показал, что максимальные концентрации бензола и о-ксилола, преждевременно проникающие в колонку в отсутствии сбросового потока, составляют: 95,6 и 23,8 ($\times 10^{-12}$ г/см³), соответственно (рис. 1). При сбросовом потоке 1,25 мл/мин «пробой» прекращается полностью, а концентрации аренов, проникающих в ГХК, становятся на уровне пороговых значений.

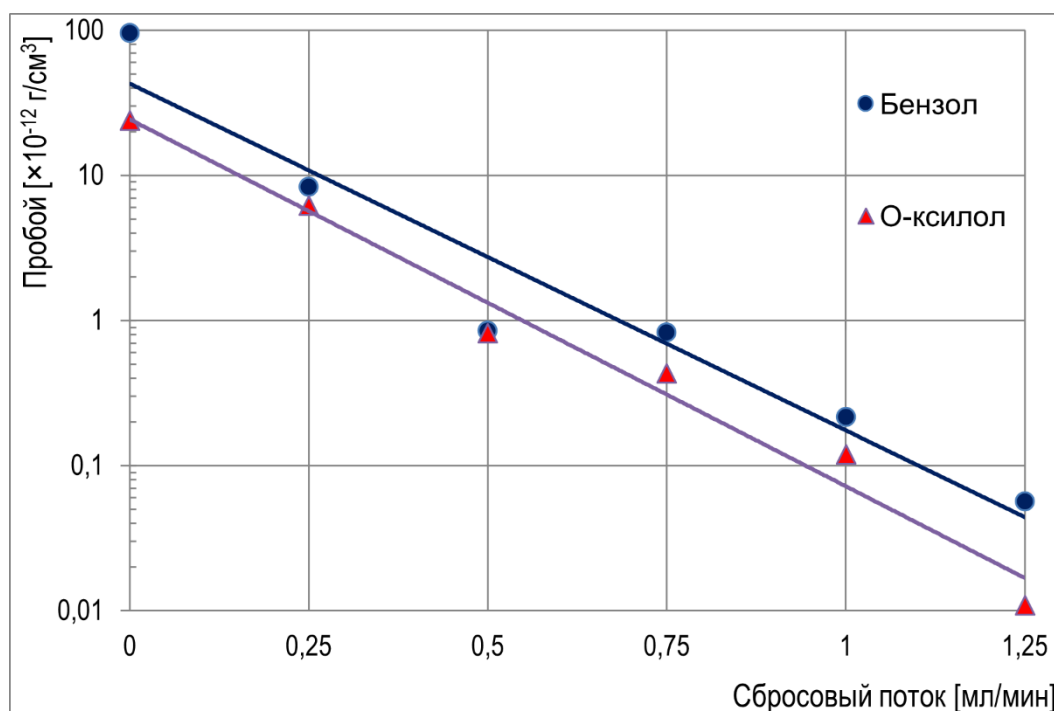


Рис. 2. Количественный анализ «пробоя»; концентрации аренов, преждевременно попадающих в колонку в зависимости от сбросового потока (концентрации определялись по площади пиков)

Процентное соотношение концентраций аренов, регистрируемых при «пробое», к количеству аренов, определенных при анализе со стандартными параметрами, представлено в таблице 1.

Таблица 1. Процентное соотношение бензола и о-ксилола, преждевременно проникающих в колонку при «пробое», от их измеренного количества при стандартных параметрах в режиме анализа с концентрационным инжектором

Сбросовой поток мл/мин	Бензол, %	О-ксилол, %
0	114.1	41.1
0.25	9.9	10.7
0.5	1.0	1.4
0.75	1.0	0.7
1	0.3	0.2
1.25	0.07	0.02

В отсутствии сбросового потока бензола попадает в колонку на 14,1 % больше, чем при стандартных параметрах анализа сорберов. При потоке в 1 мл/мин забрасывается примерно 0,2-0,3 % относительно концентраций аренов при стандартном анализе.

Благодарности

Авторы выражают большую благодарность за помощь и обсуждение работы В. М. Грузнову.

Работа выполнена в рамках ПФНИ РФ, проект FWZZ-2026-0053 (ИНГТ СО РАН).

Заключение

Наблюдался «пробой» – преждевременное проникание части отобранной газовой пробы из устройства ввода в хроматографическую колонку. На примере бензола и о-ксилола было определено, что в отсутствие газодинамической изоляции происходит их максимальное проникновение в ГХК, которое составило: 95,6 и 23,8 ($\times 10^{-12}$ г/см³), соответственно. Экспериментально установлен сбросовый поток равный 1,25 мл/мин, при котором «пробой» устраняется.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балдин М.Н., Грузнов В.М., Федотов В.В. Принципы ввода органических веществ в газохроматографическую колонку методом термической десорбции в зависимости от летучести компонентов смеси // Журнал аналитической химии. – 2025. – Т. 80, № 1. – С. 22-31.
2. Источники микропотоков газов и паров ИМ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ooo-monitoring.ru>, свободный. – (дата обращения: 18.03.2026).
3. Грузнов В.М., Филоненко В. Г., Балдин М. Н., Шишмарёв А. Т. Портативные экспрессные газоаналитические приборы для определения следовых количеств веществ // Российский химический журнал. – 2002. – Т. 46, № 4. – С. 100-108.
4. Лукьянов Э.Е., Каюров К.Н., Эпов М.И., Балдин М.Н., Грузнов В.М. О создании экспресс-анализатора ароматических углеводородов для нефтяных технологий // Каротажник. – 2002. – № 95. – С. 13-24.
5. Балдин М.Н., Грузнов В.М., Наumenко И.И. Портативные газовые хроматографы «Эхо» // Наука и технологии Сибири. – 2025. – Т.19, № 4. – С. 86-91.
6. Установки динамические «Микрогаз-ФМ» – рабочие эталоны 1-го разряда: руководство по эксплуатации СКБД. 229655.016 РЭ. – Кирово-Чепецк, 2016. – 51 с.
7. Грузнов В.М., Балдин М.Н., Малышева А.О. Ввод пробы ароматических соединений с концентраторов в поликапиллярную колонку методом термической десорбции // Аналитика и контроль. – 2019. – Т. 23, № 3. – С. 370-376.

© В. А. Какуля, М. Н. Балдин, В. В. Федотов, 2026

В. В. Карстен^{1✉}

Итерационное определение наклона отражающей границы по данным ВСП

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: karstenvv@ipgg.sbras.ru

Аннотация Обоснована сходимость итерационного алгоритма уточнения углов наклона отражающих границ по данным ВСП при построении изображения с контролем угла отражателя. На каждом шаге методом простой итерации угол, определяемый по изображению, задаётся в качестве значения для построения изображения на следующем шаге. Критерием остановки является совпадение заданного и полученного угла. Выбор одного из двух эквивалентных решений определяется начальным приближением. Тестирование на синтетической 5-слойной модели показало работоспособность алгоритма.

Ключевые слова: непродольное ВСП, сейсмическое изображение

V. V. Karsten^{1✉}

Iterative reflector dip angle resolving from offset VSP data

¹Trofimuk Institute for Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: karstenvv@ipgg.sbras.ru

Abstract. Convergence is established for the iterative algorithm for adjusting the reflector dip angle from VSP data using the imaging algorithm with controlled dip angle. On each simple iteration step, the angle, determined from the image, is specified for imaging on the next iteration. The stopping criterion is coincidence of the settled and the determined angles. Selection of one of the two equivalent solutions is determined by the initial estimate. Testing with synthetic 5-layer model demonstrated the algorithm operability.

Keywords: offset VSP, seismic imaging

Введение

Построение изображения околоскважинного пространства остаётся одной из важных задач ВСП с выносными источниками [5]. При решении этой задачи в условиях наблюдений на суше, когда число источников ограничено, применение разработанных для метода ОГТ миграционных преобразований даёт весьма интенсивные артефакты, связанные с размытием энергии по эллипсам равных времен [1;6].

Для устранения таких артефактов в алгоритме, разработанном в ИНГГ СО РАН и реализованном в обрабатывающей системе ВСП, производится ограничение апертуры суммирования путём задания диапазона допустимых углов наклона отражающих элементов [1]. При уменьшении этого диапазона до отказа от суммирования, эта

процедура сводится к взаимно-однозначному отображению разреза околоскважинного пространства на сейсмограмму ВСП.

Изображение в этом алгоритме строится последовательно во всех точках двумерной сетки, и в каждом узле сетки задаётся значение угла наклона отражателя. Построение изображения включает в себя трассировку луча через горизонтально-слоистую скоростную модель до точки отражения методом пристрелки [3], отражение, соответствующее отражению от наклонной границы с нормалью, лежащей в заданном ограниченном диапазоне, и трассировку отражённого луча. Такой алгоритм уже в течение многих лет используется в ИНГТ при обработке полевых данных ВСП.

Поскольку при отсутствии суммирования существует взаимно-однозначное соответствие разреза околоскважинного пространства и сейсмограммы ВСП, можно предположить, что получится совместить построение изображения с уточнением скоростной модели, а именно, поставить задачу определить наклон отражающей границы по данным ВСП. Однако, проведённый анализ алгоритма построения изображения [2] показывает, что решение задачи определения наклона неоднозначно: для каждого наклона отражающей границы всегда существует другой наклон, при котором годографы отражённой волны совпадают, и эти два наклона при построении изображения не различимы. Целью настоящей работы является разработка способа определения наклона границы с учётом этой неоднозначности.

Анализ алгоритма построения изображения

Для анализа алгоритма рассмотрим ту же, что и в предыдущей работе [2], модель с одной наклонной границей, в которой проведены наблюдения ВСП с выносным источником в вертикальной скважине (рис. 1).

Начало координат находится на устье скважины, ось x направлена на ПВ, ось z вниз. По анализу падающих волн определена глубина границы в скважине z_0 и установлена однородность вышележащего слоя со скоростью v . Удаление источника составляет x_s , глубина приёмника z_g лежит в интервале от нуля до глубины границы. Наклон границы α отсчитывается от горизонтали по часовой стрелке.

В системе координат, в которой ось x' параллельна границе, источник имеет координаты $x'_s = x_s \cos \alpha$ и $z'_s = -x_s \sin \alpha$, приёмник координаты $x'_g = z_g \sin \alpha$ и $z'_g = z_g \cos \alpha$, а граница горизонтальна и имеет глубину $z'_0 = z_0 \cos \alpha$.

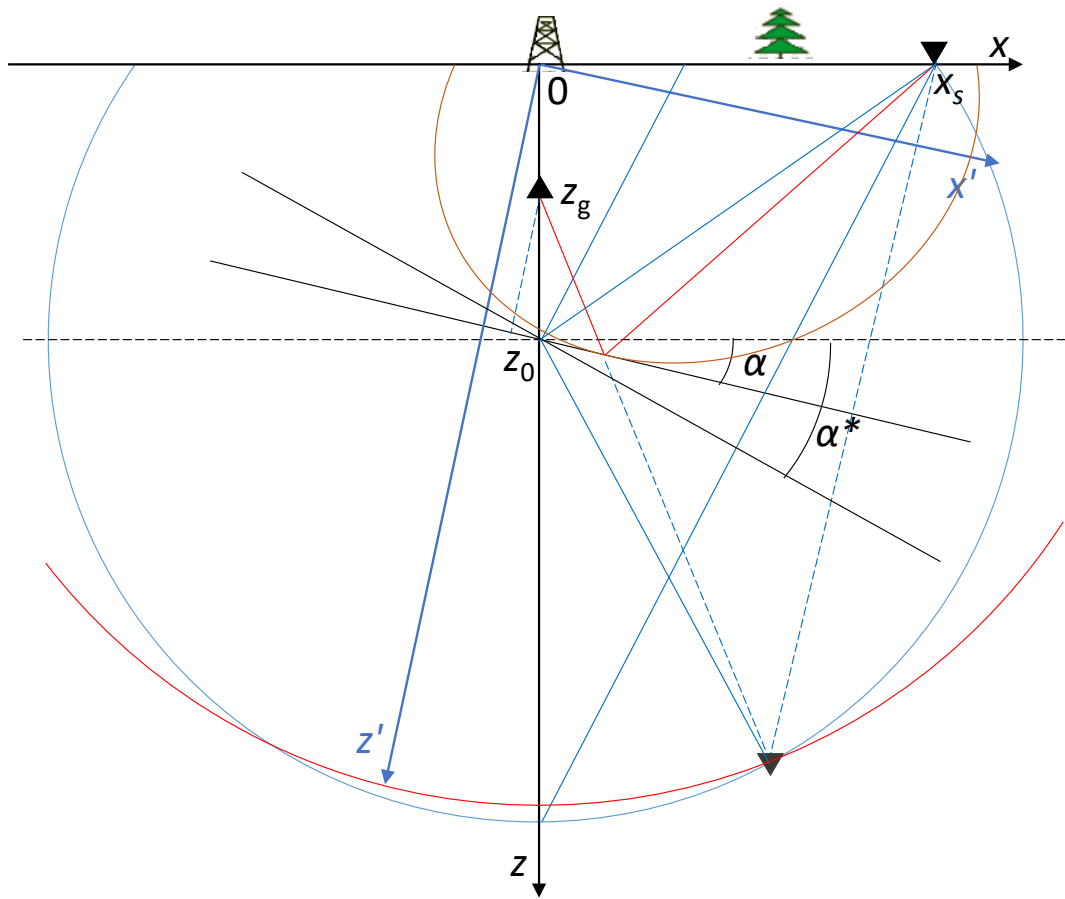


Рис. 1. Анализ геометрии построения изображения.

В этой системе мнимый источник имеет координаты

$$x_s^{*'} = x_s'; \quad z_s^{*'} = 2z_0' - z_s'. \quad (1)$$

Время пробега t отражённой волны в этой системе координат составляет

$$v^2 t^2 = (x_s' - x_g')^2 + (2z_0' - z_g' - z_s')^2. \quad (2)$$

Соответственно, в исходной системе координат положение мнимого источника описывается координатами

$$\begin{aligned} x_s^* &= x_s \cos 2\alpha - z_0 \sin 2\alpha; \\ z_s^* &= x_s \sin 2\alpha + z_0 \cos 2\alpha + z_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Это и показывает, что мнимые источники при различных углах наклона отражающей границы располагаются на окружности, центр которой находится в точке пересечения границы скважиной, а радиус равен расстоянию этой точки до источника $x_s^2 + z_0^2$.

Время пробега t отражённой волны в исходной системе координат тогда составляет

$$v^2 t^2 = \left((2z_0 - z_g) \cos \alpha + x_s \sin \alpha \right)^2 + \left(x_s \cos \alpha - z_g \sin \alpha \right)^2. \quad (4)$$

После преобразований это время можно записать как

$$v^2 t^2 = x_s^2 + z_0^2 + (z_0 - z_g)^2 + 2(z_0 - z_g)(z_0 \cos 2\alpha + x_s \sin 2\alpha). \quad (5)$$

Следует отметить, что эта формула приведена в предыдущей работе [2] с ошибкой. Критический угол наклона α^* характеризуется тем, что мнимый источник расположен точно под скважиной, то есть имеет x -координату 0. Это означает, что

$$\cos 2\alpha^* = \frac{z_0}{\sqrt{x_s^2 + z_0^2}}; \quad \sin 2\alpha^* = \frac{x_s}{\sqrt{x_s^2 + z_0^2}}. \quad (6)$$

С учётом этого можно записать:

$$v^2 t^2 = x_s^2 + z_0^2 + (z_0 - z_g)^2 + 2(z_0 - z_g)\sqrt{x_s^2 + z_0^2} \cos(2\alpha - 2\alpha^*). \quad (7)$$

Выражение (5) показывает, что время отражённой волны при любом угле наклона отражающей границы будет монотонно возрастать при увеличении её глубины. Формула (7) демонстрирует, что при двух наклонах, составляющих равные по величине и противоположные по знаку разности с критическим углом, времена в любой точке приёма будут равны. Эти наклоны составляют взаимно сопряжённую пару α и $\bar{\alpha}$.

Точка отражения будет удалена от скважины вдоль по границе на расстояние

$$l = (z_0 - z_g) \frac{\sin(2\alpha^* - 2\alpha) \sqrt{x_s^2 + z_0^2}}{x_s \sin \alpha + (2z_0 - z_g) \cos \alpha}. \quad (8)$$

Координаты точки отражения будут

$$x = l \cos \alpha; \quad z = z_0 + l \sin \alpha. \quad (9)$$

Формула (8) показывает, что изображение будет строиться между скважиной и источником, если угол наклона границы меньше критического, и с другой стороны скважины, если угол больше критического. При приближении угла к критическому размер изображения будет уменьшаться до нуля.

Анализ алгоритма определения угла наклона

Теперь пусть при существующем угле наклона отражающей границы α изображение строится при другом угле $\hat{\alpha}$. В соответствии с формулой (5) время отражённой волны должно при угле $\hat{\alpha}$ быть больше истинного, если он лежит между истинным и сопряжённым углами, и меньше истинного в противном случае. Но время отражения задано на сейсмограмме и фиксировано. Значит, отражение будет строиться с некоторой кажущейся глубиной отражающей границы $\hat{z}_0$, которая будет, в соответствии с (5) и (7) меньше истинной z_0 , когда угол $\hat{\alpha}$ лежит между истинным и сопряжённым углами, и больше истинной в противном случае. При приближении заданного угла к истинному или к сопряжённому кажущаяся глубина будет приближаться к истинной. Эту глубину можно найти, обратив формулу (4):

$$\hat{z}_0 = \frac{\sqrt{v^2 t^2 - (z_g \sin \hat{\alpha} - x_s \cos \hat{\alpha})^2} + (z_g \cos \hat{\alpha} - x_s \sin \hat{\alpha})}{2 \cos \hat{\alpha}}. \quad (10)$$

В соответствии с этим, будет получена кажущаяся оценка критического угла как $\hat{\alpha}^* = \frac{1}{2} \arctg \frac{x_s}{\hat{z}_0}$. Эта оценка будет больше истинного значения, когда заданный угол лежит между истинным и сопряжённым, и меньше истинного в противном случае. При приближении угла к заданному или сопряжённому, оценка критического угла приближается к истинному значению.

Точка построенного изображения при этом будет удалена от скважины вдоль границы на расстояние

$$\hat{l} = (\hat{z}_0 - z_g) \frac{\sin(2\hat{\alpha}^* - 2\hat{\alpha}) \sqrt{x_s^2 + \hat{z}_0^2}}{x_s \sin \hat{\alpha} + (2\hat{z}_0 - z_g) \cos \hat{\alpha}}. \quad (11)$$

Координаты точки отражения будут

$$\hat{x} = \hat{l} \cos \hat{\alpha}; \quad \hat{z} = \hat{z}_0 + \hat{l} \sin \hat{\alpha}. \quad (12)$$

Согласно формуле (12), изображение в этом случае, независимо от истинного угла наклона границы, будет построено в сторону, определяемую заданным углом: если этот заданный угол меньше оценки критического, в сторону источника, если больше – в противоположную.

Точки отражения при всех возможных углах $\hat{\alpha}$ лежат на эллипсе с фокусами в точках источника и приёмника и касающегося истинной границы в точке истинного отражения (рис.1). В системе координат $x'z'$ истинная точка отражения будет лежать на горизонтальной касательной к эллипсу, и все возможные точки отражения будут находиться выше неё.

Таким образом, угол наклона границы на построенном изображении, определяемый как $\hat{\alpha}_1 = \arctg \frac{\hat{z} - z_0}{\hat{x}}$, будет:

– Если заданный угол $\hat{\alpha}$ лежит между истинным и сопряжённым, оценка $\hat{z}_0$ будет меньше истинной. Если заданный угол меньше критического, изображение строится в сторону источника, и найденный угол будет меньше заданного, а поскольку найденная точка отражения лежит выше истинной границы, найденный угол будет также меньше истинного. Если же заданный угол больше критического, изображение строится за скважиной, и найденный угол будет больше и заданного и сопряжённого истинному.

– Если же заданный угол $\hat{\alpha}$ меньше истинного, оценка $\hat{z}_0$ будет больше истинной. Изображение строится в сторону источника, и найденный угол будет, соответственно, больше заданного, и поскольку найденная точка отражения лежит выше истинной границы, – меньше истинного.

– Если заданный угол больше сопряжённого, оценка $\hat{z}_0$ также будет больше истинной, но изображение строится за скважиной, и найденный угол будет меньше заданного, но больше сопряжённого.

Значит, ни при каких значениях заданного угла $\hat{\alpha}$ невозможно получить изображение с углом в интервале между истинным и сопряжённым. Вне этого интервала отображение заданного угла в новый – сжимающее: новое значение всегда больше (на обратной ветви меньше) заданного, но меньше предела, равного истинному значению (на обратной ветви больше предела, равного сопряжённому значению). Это иллюстрирует расчёт угла полученного изображения (рис. 2) при глубине границы z_0 3 км, выносе источника x_s 1 км и глубине приёмника z_g 2 км. Критический угол при этом составляет $\alpha^* \approx 9,22^\circ$. Истинный угол наклона $\alpha = 5^\circ$, сопряжённый ему $\bar{\alpha} \approx 13,43^\circ$.

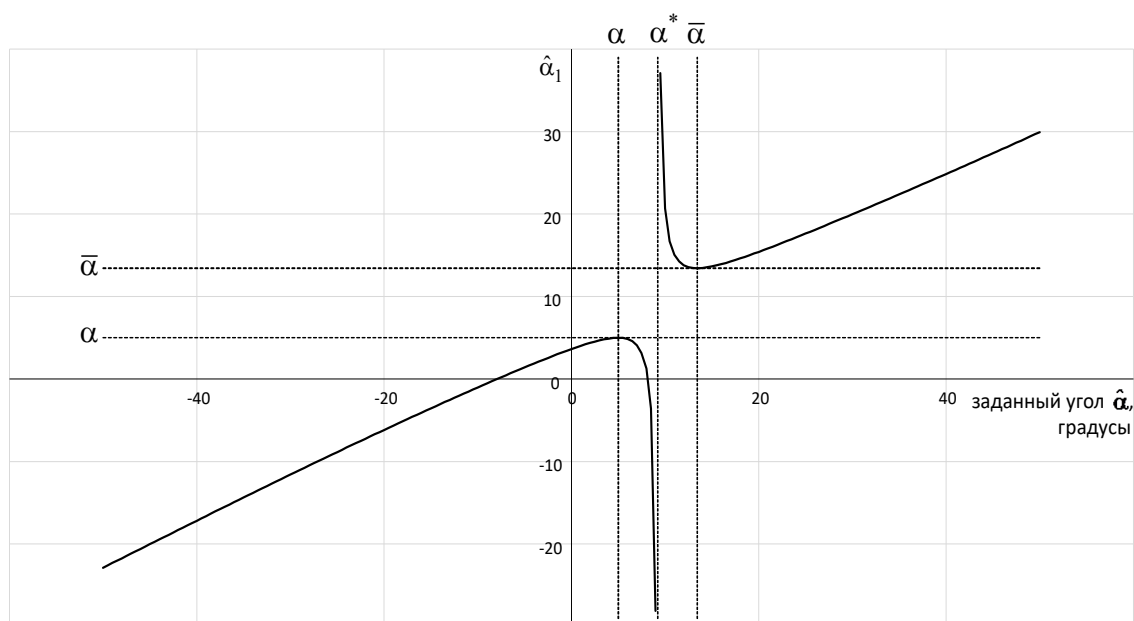


Рис. 2. Угол наклона построенной на изображении границы в зависимости от заданного угла наклона. Отмечены истинный, сопряженный и критический углы.

Это позволяет реализовать процесс уточнения угла наклона границы методом простой итерации, задавая угол, определённый по построенному изображению, для построения на следующем шаге. Критерием остановки будет совпадение заданного и полученного углов. Сжимающее отображение обеспечивает сходимость процесса. Если начальное приближение будет вне сжимающей области, первый шаг приведёт в эту область. Вообще же, начальное приближение определяет, будет ли процесс сходиться к истинному или сопряжённому решению.

Тестирование на данных численного моделирования

Для тестирования такого подхода в модели, приведённой в таблице 1, лучевым методом [4] было рассчитано поле отражённых продольных волн от источника с выносом 600 м. В начальном приближении все углы были заданы нулевыми, и получено изображение (рис. 3а), где границы отклоняются от истинного положения.

Таблица 1. Модель для тестирования итерационного алгоритма.

глубина, м	305	605	1005	1705	2305
скорость, м/с	2000	2500	3000	3500	4000
угол наклона, градусы	0	0	-10	+5	0
критический угол, градусы	31,5	22,4	15,4	9,7	7,3

Для построения изображения на каждом шаге использовался быстрый алгоритм, проводящий лучевое трассирование в горизонтально-слоистой среде, что привело к погрешностям изображения. Несмотря на это, после четырёх итераций процесс уточнения углов сошёлся к заданным в модели значениям с точностью $0,15^\circ$, и получено изображение (рис. 3б) с более корректным изображением границ.

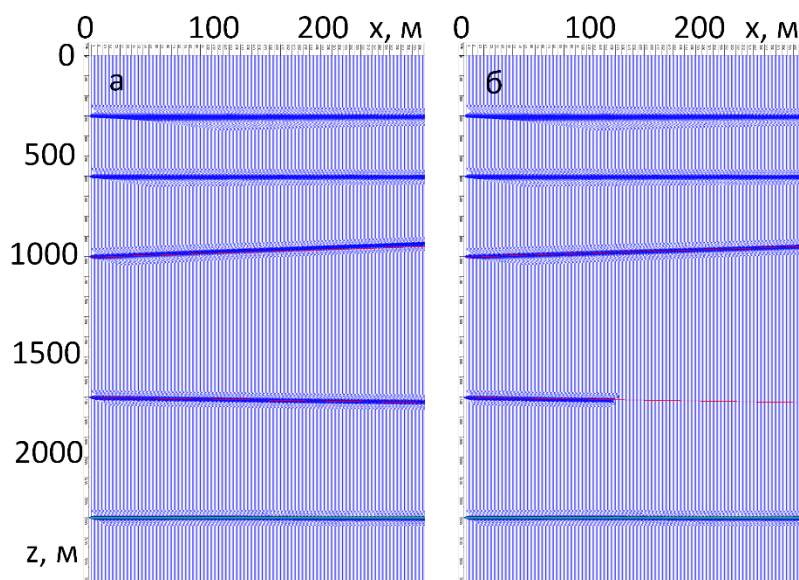


Рис. 3. Изображение а) в начальном приближении углов, б) после итерационного уточнения. Красными линиями нанесено модельное положение границ.

Заключение

Таким образом, обоснован итерационный алгоритм уточнения углов наклона отражающих границ по данным ВСП при построении изображения с контролем угла отражателя. На каждом шаге методом простой итерации угол, определяемый по изображению, задаётся в качестве значения для построения изображения на следующем шаге. Критерием остановки является совпадение заданного и полученного угла. В зависимости от начального приближения, алгоритм всегда сходится либо к истинному углу наклона границы, либо к сопряжённому ему. Тестирование на синтетической 5-слойной модели показало работоспособность алгоритма несмотря на погрешности построения изображения, связанные с неточной трассировкой лучей при итерациях.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ FWZZ-2026-0050.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карстен В.В., Черноиванов А.И. Построение изображения по данным ВСП путём Кирхгофской миграции с контролем угла отражателя. // Карстен В.В., Черноиванов А.И. –

Материалы международной конференции геофизиков и геологов “К эффективности через сотрудничество”, г. Тюмень. – 2007.

2. Карстен В.В. Быстрое решение двухточечной задачи для горизонтально-слоистой среды / Карстен В.В. Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XV Международный научный конгресс: Сборник материалов в 9 т. – СГУГиТ – Новосибирск – т. 2 – № 3 – с. 131–134 – 2019.

3. Карстен В.В. Неоднозначности при определении наклона отражающих границ по данным непродольного ВСП / Карстен В.В. Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XXI Международный научный конгресс: Сборник материалов в 8 т. – СГУГиТ – Новосибирск – т. 2 – с. 215–220 – 2025.

4. Оболенцева И.Р., Гречка В.Ю. Лучевой метод в анизотропной среде (алгоритмы, программы). – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1989. – 225 с.

5. Шехтман Г.А. Вертикальное сейсмическое профилирование / Шехтман Г.А. – М: EAGE Геомодель, 2017. – 286 с.

6. Grech M.G.K. Integrated prestack depth migration of vertical seismic profile and surface seismic data from the Rocky Mountain Foothills of southern Alberta, Canada / M.G.K.Grech, D.C.Lawton, S.Cheadle – Geophysics, 2003, v.68 – p1782–1791.

© В. В. Карстен, 2026

*В. Л. Янчуковский¹✉, А. Ю. Белинская¹, А. А. Ковалев¹, М. А. Калюжная¹, В. С. Кузьменко¹,
Р. З. Хисамов¹*

Процессы на Солнце и возмущения в атмосфере Земли в ноябре 2025 года

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: kovalevaa@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе представлены результаты комплексного исследования влияния космической погоды в период повышенной солнечной активности в ноябре 2025 года, основанного на данных непрерывных наблюдений космических лучей, геомагнитного поля и ионосферы, проведенных в Новосибирске, а также с привлечением данных мировой сети станций космических лучей и ионосферного мониторинга. В рассматриваемый период активная область Солнца AR4274 породила серию мощных вспышек классов М и X, что повлекло значительное усиление солнечного ветра со скоростью от 400 до 900 км/с и ростом плотности потока. В результате анализа выявлены существенные вариации космических лучей спорадического характера, включая два Форбуш-понижения и событие GLE77, зарегистрированное 11 ноября 2025 года. Исследование показало тесную взаимосвязь между солнечными событиями и геофизическими процессами в околоземном пространстве. Выявлены значительные изменения в параметрах геомагнитного поля, включая экстремальную магнитную бурю уровня G4, а также существенные возмущения в ионосфере. Обсуждаются вопросы влияния космических лучей на метеорологические процессы и опосредованно на вариации параметров ионосферы во время экстремальных событий космической погоды. Полученные результаты демонстрируют комплексный характер влияния солнечной активности на различные оболочки Земли и могут быть использованы для совершенствования методов прогнозирования космической погоды.

Ключевые слова: космическая погода, солнечные вспышки, космические лучи, геомагнитные возмущения, ионосфера

*V. L. Yanchukovsky¹✉, A. Yu. Belinskaya¹, A. A. Kovalev¹, M. A. Kalyuzhnaya¹, V. S. Kuzmenko¹,
R. Z. Khisamov¹*

Processes on the sun and disturbances in the Earth's atmosphere in november 2025

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation
e-mail: kovalevaa@ipgg.sbras.ru

Abstract. The paper presents the results of a comprehensive study of the influence of space weather during the period of increased solar activity in November 2025. The research is based on continuous observations of cosmic rays, geomagnetic field, and ionosphere conducted in Novosibirsk, as well as data from the global network of cosmic ray and ionospheric monitoring stations. During this period, the active region of the Sun AR4274 generated a series of powerful flares of classes M and X, which caused a significant intensification of the solar wind with speeds ranging from 400 to 900 km/s and an increase in flow density. The analysis revealed significant sporadic variations in cosmic rays, including two Forbush decreases and the GLE77 event recorded on November 11, 2025. The study

demonstrated a close relationship between solar events and geophysical processes in near-Earth space. Significant changes were identified in geomagnetic field parameters, including an extreme magnetic storm of G4 level, as well as substantial disturbances in the ionosphere. The paper discusses the impact of cosmic rays on meteorological processes and their indirect influence on ionospheric parameter variations during extreme space weather events. The obtained results demonstrate the complex nature of solar activity's influence on various layers of the Earth and can be used to improve space weather forecasting methods.

Keywords: space weather, solar flares, cosmic rays, geomagnetic disturbances, ionosphere

Введение

Понятие «космическая погода» заключается в состоянии околоземного космического пространства за какой-либо временной интервал или в какой-то момент времени. При этом рассматриваются вопросы, связанные с воздействием космической погоды на окружающую среду (обитания), на системы жизнеобеспечения и здоровье человека. Основные факторы космической погоды: солнечные космические лучи, образовавшиеся в солнечных вспышках и при корональных выбросах массы (КВМ), магнитосферные бури и суббури (из-за корональных выбросов массы и солнечного ветра), ионизирующее электромагнитное излучение от солнечных вспышек, рост релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе Земли. Ниже рассматривается состояние околоземного пространства (космической погоды) в период возрастания солнечной активности (СА) в ноябре 2025г. по данным непрерывных наблюдений космических лучей, геомагнитного поля и ионосферы в Новосибирске.

Процессы на Солнце, спорадические вариации интенсивности космических лучей и изменения атмосферных параметров

Источником мощных солнечных вспышек в ноябре 2025 года явилась активная область AR4274 [1], которая находилась в районе центрального меридиана Солнца, в зоне наибольшего влияния на Землю. В результате выбросов энергии этой областью в течение нескольких дней наблюдались крупные вспышки класса M и X (X – наивысший класс мощности). В табл. 1 представлены крупные вспышки, которые произошли в это время.

Таблица 1. Крупные солнечные вспышки первой половины ноября 2025 года

Дата	04.11.	04.11.	05.11.	06.11.	07.11.	09.11.	10.11.	11.11.
Время, UT	17:34	22:01	22:06	04:34	07:18	07:36	09:22	10:04
Вспышка	X1.8	X1.1	M8.6	M1.1	M1.7	X1.79	X.1.21	X5.16

Скорость солнечного ветра (СВ) за этот период возрастала от 400 до 900 км/с, а плотность СВ увеличивалась с 3 см^{-3} до 30 см^{-3} [2; 3]. Область AR4274 генерировала крупные вспышки, которые привели к росту потока (плотности) протонов СВ более высоких энергий (более 10 МэВ). Выброс высокоскоростной корональной массы (КВМ) был связан с вспышкой X5.16 (11.11.2025 г.).

Изменения космической погоды вызвали значительные вариации космических лучей (КЛ) спорадического характера. На рис. 1 представлены результаты наблюдений нейтронной, общей ионизирующей и жесткой мюонной компонент космических лучей за период с 5 по 20 ноября 2025 г. в Новосибирске (рис. 1а), а также результаты наблюдений КЛ с помощью нейтронных мониторов среднеширотных станций КЛ мировой сети с жесткостями геомагнитного обрезания от 0,7 ГВ до 8,5 ГВ (рис. 1б).

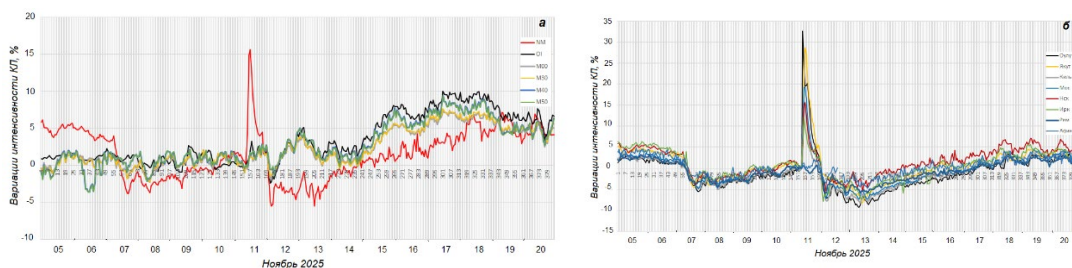


Рис. 1. Вариации интенсивности КЛ с 5 по 20 ноября 2025 г. в Новосибирске (рис. 1а) для нейтронной компоненты (кривая NM), общей ионизирующей компоненты под углом к зениту 0° (кривая OI) и жесткой мюонной компоненты под углами к зениту 0, 30, 40 и 50 градусов (кривые M00 – M50, соответственно); а также вариации интенсивности КЛ (рис. 1б), зарегистрированные нейтронными мониторами средних широт (коды станций см. табл. 2)

Нейтронным монитором 24NM-64 в Новосибирске зарегистрированы вспышка солнечных космических лучей (СКЛ) и два Форбуш-понижения галактических космических лучей (ГКЛ) (рис. 1а, красная линия) 7 и 12 ноября [4]. Солнечная вспышка X5.16 с выбросом высокоскоростной корональной массы привела к росту потока протонов с релятивистскими энергиями. Обычно энергия частиц в этих потоках не велика (порядка сотен МэВ) и они не регистрируются у земной поверхности. Это, так называемые солнечные протонные события (СПС). Реакция атмосферы на такие СПС наблюдается, в основном, на высоких широтах [5]. Часть СПС, содержащая частицы с энергией 1 ГэВ и более, будут наблюдаться у земной поверхности, так называемые, возрастания солнечных космических лучей (Ground Level Enhancement – GLE). За время наблюдений с 1940 г. зафиксировано 77 GLE; последнее (№ 77) – 11 ноября 2025 г. [6]. На широте Новосибирска это событие наблюдалось как вспышка солнечных космических лучей (СКЛ) на фоне галактических космических лучей (ГКЛ). Амплитуда события превышала 15%. Это свидетельствует о жесткости солнечных протонов в СКЛ, которая превышает 2,34 ГВ (порог геомагнитного обрезания новосибирского нейтронного монитора). После вспышки СКЛ 12 ноября происходит Форбуш-понижение галактических КЛ.

Все данные, представленные на рис. 1, нормированы к моменту начала вспышки СКЛ. Отклика на вспышку СКЛ в каналах мюонных телескопов (рис. 1а) не наблюдается. Максимумы энергетической чувствительности (коэффициентов

связи) к первичному потоку КЛ каналов телескопа находятся в области от десятков до сотен ГэВ [7]. Это свидетельствует о том, что энергия протонов солнечных космических лучей более 2,34 ГэВ, но не превышает 10 ГэВ. С помощью данных нейтронных мониторов мировой сети был уточнен верхний предел энергии солнечных протонов для этого события. Во время GLE увеличение интенсивности солнечных космических лучей на фоне ГКЛ у земной поверхности составило несколько десятков процентов (рис. 1б). Стоит отметить, что на высоте 10 км (коридор гражданской авиации) во время GLE возрастают потоки радиации, и соответственно эквивалентная доза облучения может превысить норму в несколько раз [8]. В табл. 2 приведены основные показатели представленных нейтронных мониторов. Информацию о станциях можно получить на сайте Базы данных нейтронных мониторов [9].

Таблица 2. Основные показатели среднеширотных нейтронных мониторов

Код станции КЛ	Расположение	Координаты, °	Высота, м	R_c (2025 г.), ГВ	Амплитуда GLE, %
ATHN	Афины, Греция	37,58N 23,47E	260	8,45	1,16
ROME	Рим, Италия	41,86N 12,47E	0	6,25	1,34
IRK1	Иркутск, Россия	52,1N 104,0E	475	3,29	12,13
NVBK	Новосибирск, Россия	54,84N 83,00E	163	2,34	15,63
KIEL	Киль, Германия	54,34N 10,12E	54	2,25	16,06
MOSC	Москва, Россия	55,47N 37,32E	200	2,07	19,31
YKTK	Якутск, Россия	62,01N 129,4E	105	1,35	28,67
OULU	Оулу, Финляндия	65,05N 25,47E	15	0,7	32,62

Станции КЛ расположены в табл. 2 в порядке уменьшения жесткости геомагнитного обрезания (R_c) с ростом широты. Жесткости геомагнитного обрезания для данной группы станций КЛ [10] вычислены для одной эпохи (2025 г.) без привлечения калькулятора [11]. Распределение амплитуд GLE в зависимости от R_c (от 32,62% до 1,34%), приведенных в табл. 2, указывает на то, что жесткостной спектр солнечных КЛ достаточно крутой, солнечные протоны наблюдались с жесткостью до 6 ГВ (статистически значимые возрастания). Вариации КЛ на средних широтах (усредненные по 8-ми пунктам наблюдений) и изменения атмосферного давления (также усредненные по 8-ми пунктам наблюдений) представлены на рис. 2а. На рис. 2б показаны вариации КЛ, изменения атмосферного давления и температуры в Новосибирске в этот период.

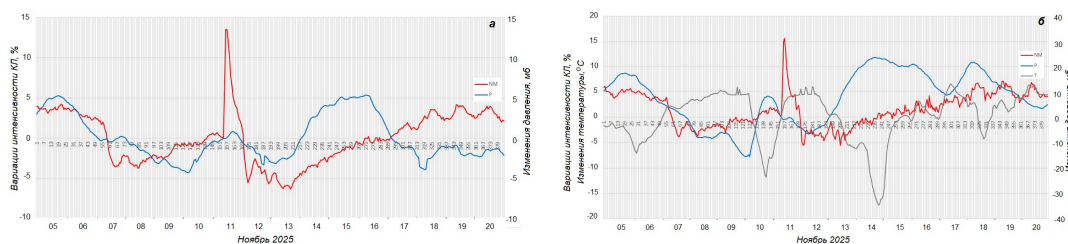


Рис. 2. Вариации интенсивности КЛ на средних широтах (кривая NM), усредненные по восьми пунктам наблюдений (рис. 2а), и в Новосибирске (рис. 2б); изменения атмосферного давления (кривая P), усредненные по восьми пунктам наблюдений (рис. 2а) и в Новосибирске (рис. 2б); изменения температуры (кривая T, рис. 2б)

Во время GLE и сразу после него 11-12 ноября происходит резкий спад атмосферного давления, а затем при Форбуш-понижении ГКЛ с 13 по 16 ноября наблюдается рост давления. Это характерно для всех среднеширотных станций с R_c от 0,7 GV (Oulu) до 8,45 GV (Athens). Для группы станций КЛ, включающих Якутск, Иркутск, Новосибирск и Москву, изменения атмосферного давления Δh составили, в среднем, около 30 мб. В этой связи в период с ноября 2025 г по январь 2026 года наблюдалось возрастание интенсивность образования и распространения циклонов и антициклонов [12].

Магнитосферные возмущения

В качестве характеристик возмущения магнитного поля Земли (МПЗ) были выбраны H-, D- и Z-компоненты, представляющие собой основные элементы геомагнитного поля, регистрируемые сетью наземных обсерваторий. Горизонтальная H-компонента является базовой для расчета индексов геомагнитной активности (K_p , Dst), вертикальная Z-компонента чувствительна к локальным ионосферным возмущениям, а вариации склонения D позволяют оценить асимметрию токовых систем в магнитосфере. Анализ выполнен по минутным данным.

В период с 5 по 20 ноября 2025 года (см. рис. 3) было зарегистрировано 6 магнитных бурь, из которых пять малых и одна очень большая. Внезапное начало (SSC) имела только экстремальная буря 12 ноября, остальные события характеризовались постепенным началом.

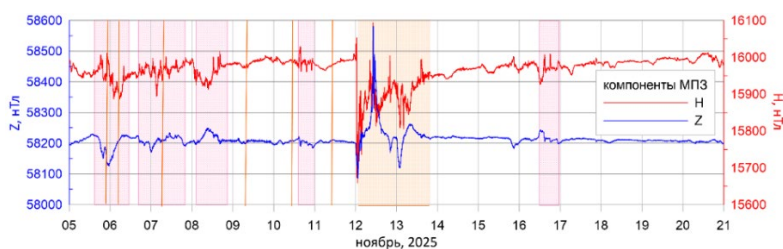


Рис. 3. Изменения в МПЗ за период 05.11.2025 – 20.11.2025 г. Моменты солнечных вспышек обозначены оранжевыми линиям; магнитные бури, зафиксированные в Новосибирске, отмечены прямоугольными областями: розовые - малые, оранжевым - очень большая

Анализ данных на магнитной обсерватории в Новосибирске за 12 ноября 2025 года показал внезапное начало очень большой магнитной бури в 00:10 UT. Продолжительность главной фазы составила 39 минут, а фазы восстановления - около 42 часов. Амплитуды вариаций геомагнитного поля достигли следующих значений: для горизонтальной компоненты H- ~ 405 нТл, для вертикальной компоненты Z- ~ 151 нТл, а для магнитного склонения D- $\sim 1.86^\circ$. Индекс Dst достиг -200 нТл [13]. Полученные значения соответствуют экстремальной магнитной буре уровня G4 по классификации NOAA [14].

Возмущения в ионосфере

Для среднеширотных станций из базы данных Lowell DIDBase [15] и ионосферной станции в Новосибирске [16], информация о которых приведена в табл. 3 (группировка для западного и восточного полушарий), были рассчитаны отклонения в процентном выражении параметров слоя F2 ионосферы от среднего за 5 магнитоспокойных дней этого месяца [17]. Затем вычислялись скользящие средние для момента времени t (час) за временной промежуток от $(t-12)$ до $(t+12)$. На рис. 4 приведены результаты расчетов. Станции сгруппированы по широтному признаку (слева на каждом графике указаны широтные диапазоны).

Таблица 3. Список ионосферных станций

Код станции	Расположение	Координаты	Код станции	Расположение	Координаты
EA653	Эарексон (США)	52,73N 174,08W	NV355	Новосибирск (Россия)	54,85N 83,23E
FF051	Фэрфорд (Англия)	51,7N 1,5W	JR055	Юлиусрух (Германия)	54,6N 13,4E
AL945	Алпена (США)	45,07N 83,56W	DB049	Дурбес (Бельгия)	50,1N 4,6E
IF843	Национальная Лаборатория Айдахо (США)	43,81N 112,68W	PQ052	Прухонице (Чехия)	50N 14,6E
MNJ45	Миллстоун-Хилл (США)	42,6N 71,5W	SO148	Шопрон (Венгрия)	47,63N 16,72E
EA036	Эль-Ареносильо (Испания)	37,1N 6,7W	RM041	Рим (Италия)	41,8N 12,5E

Окончание табл. 3

Код станции	Расположение	Координаты	Код станции	Расположение	Координаты
PA836	Пойнт Аргуэлло (США)	34,8N 120,5W	EB040	Рокетес (Испания)	40,8N 0,5E
EG931	Эглин AFB (США)	30,5N 86,5W	VT139	Сан-Вито (Италия)	40,6N 17,8E
AU930	Остин (США)	30,4N 97,7W	AT138	Афины (Греция)	38N 23,5E
			GM037	Джибилманна (Италия)	37,9N 14E
			IC437	Ичхон (Южная Корея)	37,14N 127,54E
			NI135	Никосия (Кипр)	35,03N 33,16E
			JJ433	Чеджу (Южная Корея)	33,43N 126,3E

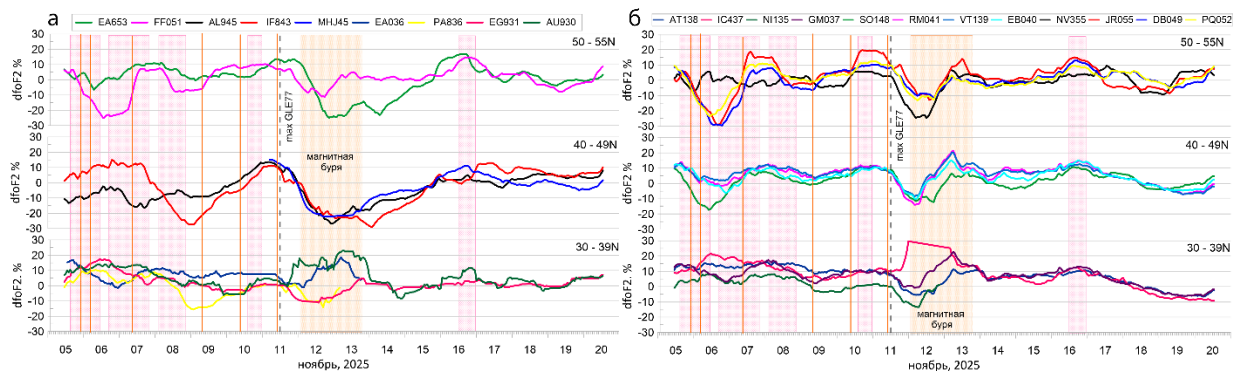


Рис. 4. Вариации критической частоты слоя F2 для среднеширотных станций а) западного и б) восточного полушарий в период 05.11.2025 – 20.11.2025 г. Обозначения соответствуют рис. 3; GLE77 отмечен пунктирной линией

На всех ионосферных станциях отмечаются пониженные значения критической частоты. На станциях севернее 55N в момент магнитной бури наблюдалось явление блэкаута, поэтому графики для них не приведены на рисунке. В главную и восстановительную фазы бури длительное отрицательное ионосферное возмущение наблюдалось практически на всех среднеширотных станциях. Отклонения достигали в отдельные часы до 60%. Отмечается повышение критической частоты на двух близко расположенных станциях Южной Кореи в восточном полушарии, и на двух станциях в западном полушарии Остин (США) и Эль-Ареносильо (Испания), которые достаточно удалены друг от друга. Скачки foF2 происходили 12.11.25 12:00UT, что соответствует максимуму магнитной бури. Ионограммы станций Остин и Эль-Ареносильо были просмотрены вручную, и высокие значения foF2 в эти часы подтверждаются.

Минимальная высота слоя F2 в период магнитной бури практически на всех станциях возросла. Исключение составляют вышеупомянутые станции, где наблюдались высоты, практически не отличающиеся от спокойных условий. Это вызывает интерес, так как получается, что возрастание критической частоты, в данном случае, не зависит от изменения высоты слоя F2.

Обсуждение

Процессы на Солнце в ноябре 2025 г. вызвали значительные вариации космических лучей спорадического характера: ФП ГКЛ (07 ноября и 11-12 ноября) и вспышка СКЛ (зарегистрированная как GLE77). Спектр солнечных КЛ был крутым, максимальная жесткость солнечных протонов, зарегистрированных НМ, найдена равной около 6 ГВ. Резкие перепады интенсивности КЛ достигали более 17%. КЛ являются основным, практически, единственным ионизирующим агентом в нижней атмосфере (тропосфере) [18]. Вариации интенсивности КЛ вызывают изменения скорости ионизации в атмосфере, что приводит к изменениям химического и аэрозольного состава атмосферы [19]. Химический состав атмосферы (концентрации малых составляющих атмосферы H_2O , O_3 , NO_2 и др.), а также концентрация и размеры аэрозольных частиц, определяют прозрачность атмосферы и состояние ее облачного покрова [20 - 22]. При вариациях интенсивности КЛ происходит изменения скорости ионизации атмосферы и, в результате, изменения прозрачности и облачности, которые определяют поток солнечной энергии, поступающей в нижнюю атмосферу и к земной поверхности. Возникающие при этом изменения температуры и давления [23] вызывают изменения атмосферной циркуляции, с помощью которой полученная тепловая энергия распределяется в атмосфере. Изменения давления на ряде рассмотренных в данном случае среднеширотных станций КЛ во время спорадических вариаций КЛ достигала 30 мб. Это один из возможных механизмов влияния солнечной активности на погоду и климат.

Магнитные бури характеризуются сильными (сотни нТл) изменениями горизонтальной составляющей геомагнитного поля, измеренного на поверхности Земли на средних и низких широтах.

Длительные отрицательные ионосферные возмущения, выражающиеся в значительном уменьшении критических частот слоя F2, наблюдались в период главной фазы и фазы восстановления магнитной бури практически на всех ионосферных станциях средних широт Северного полушария. Отрицательные ионосферные бури являются откликом на усиление геомагнитной активности, но в тоже время последние исследования показывают, что снижение концентрации электронов может быть обусловлено вариациями состава нейтрального газа термосферы [24 - 27]. Изменения атмосферной циркуляции вызывают значительные изменения атмосферных процессов. Изменчивые процессы в нижней атмосфере оказывают влияние на верхнюю атмосферу [29]. Метеорологическое воздействие на ионосферу снизу может зависеть от уровня солнечной активности, вариаций параметров геомагнитного поля, параметров волновых возмущений в нижней и средней атмосфере [30; 31]. Также ранее указывалось на существование связи вариаций интенсивности КЛ и параметров ионосферы [28]. В данном исследовании отчетливо видно, что рассматриваемые события в КЛ сопровождаются значительными изменениями атмосферного давления и температуры. Поэтому можно предположить, что формирование ионосферного отклика над среднеширотной областью в условиях развития экстремальной магнитной бури

12 ноября 2025 г. частично обусловлено распространением возмущений, вызванных спорадическими вариациями космических лучей в нижней нейтральной атмосфере, до ионосферных высот.

Заключение

Рассмотрены вариации интенсивности КЛ, изменения параметров геомагнитного поля, нижней (тропосфера) и верхней (ионосфера) атмосферы в их совокупности в ноябре 2025 г. Были использованы результаты комплексных наблюдений в Новосибирске с привлечением данных мировой сети станций (КЛ и ионосферы).

Установлено, что все возмущения (характерные для различных оболочек Земли), наблюдавшиеся в этот период, имеют общую причину, они обусловлены резким увеличением солнечной активности, вызванной появлением в этот период активной области AR4272 в районе центрального меридиана Солнца (в зоне наибольшего влияния на Землю).

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект FWZZ-2026-0051) и с использованием оборудования УНУ-85 «Российская национальная сеть станций космических лучей» [<http://www.ckprf.ru/usu/433536>].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dobrijevic D. Sun unleashes strongest solar flare of 2025, sparking radio blackouts across Africa and Europe [Электронный ресурс] // Space.com. – 11.11.2025. – URL: <https://www.space.com/astronomy/sun/sun-unleashes-strongest-solar-flare-of-2025-sparking-radio-blackouts-across-africa-and-europe> (дата обращения: 16.04.2026).
2. На Солнце произошла вспышка X5.16 — самая сильная с октября 2024 года [Электронный ресурс] // Лаборатория рентгеновской астрономии Солнца ФИАН. – 11.11.2025. – URL: https://xras.ru/project_diary.html?post_id=3160 (дата обращения: 16.04.2026).
3. Another X flare from Active Region 4274 [Электронный ресурс] // NOAA Space Weather Prediction Center. – 13.11.2025. – URL: <https://www.swpc.noaa.gov/news/another-x-flare-active-region-4274> (дата обращения: 16.04.2026).
4. Наблюдения и вспышки на Солнце. Баллы вспышечной активности [Электронный ресурс] // ФГБУ «Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова». – URL: <http://193.232.24.200/nvbk/main.htm> (дата обращения: 16.04.2026).
5. Веретененко С.В., Тайл П. Солнечные протонные события и эволюция циклонов в Северной Атлантике // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – Т. 48. – № 4. – С. 542–552.
6. International GLE Database (IGLED) [Электронный ресурс] // University of Oulu. – URL: <http://gle.oulu.fi> (дата обращения: 16.04.2026).
7. Янчуковский В.Л., Григорьев В.Г., Крымский Г.Ф. и др. Приёмные векторы мюонного телескопа станции космических лучей «Новосибирск» // Солнечно-земная физика. – 2016. – Т. 2, № 1. – С. 76–87. – DOI: 10.12737/16762.
8. Маурчев Е.А., Михалко Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. Оценка эквивалентной дозы излучения на разных высотах от протонов космических лучей // Солнечно-земная физика. – 2022. – Т. 8, № 3. – С. 29–34. – DOI: 10.12737/szf-83202204.
9. Neutron Monitor Database (NMDB) [Электронный ресурс] // NMDB. – URL: <http://www.nmdb.eu> (дата обращения: 16.04.2026).
10. Кручинин П.А., Сирук С.А., Майоров А.Г., Малахов В.В., Александрин С.Ю.

- Жесткость геомагнитного обрезания в местах расположения нейтронных мониторов // Солнечно-земная физика. – 2025. – Т. 11, № 2. – С. 132–138. – DOI: 10.12737/szf-112202512.
11. Расчет жесткости геомагнитного обрезания космических лучей [Электронный ресурс] // ИЗМИРАН. – URL: <https://tools.izmiran.ru/cutoff/> (дата обращения: 16.04.2026).
12. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.meteorf.gov.ru> (дата обращения: 16.04.2026).
13. Real-time (Quicklook) Dst Index Monthly Plot and Table for November, 2025 [Электронный ресурс] // WDC for Geomagnetism, Kyoto. – URL: https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/202511/index.html (дата обращения: 16.04.2026).
14. NOAA Space Weather Scales [Электронный ресурс] // NOAA Space Weather Prediction Center. – URL: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation> (дата обращения: 16.04.2026).
15. Global Ionosphere Radio Observatory (GIRO) [Электронный ресурс] // University of Massachusetts Lowell. – URL: <https://giro.uml.edu> (дата обращения: 16.04.2026).
16. Ionosphere and Magnetic Data - Klyuchi (IMD-K) [Электронный ресурс] // ИНГГ СО РАН. – URL: <http://im.ipgg.sbras.ru> (дата обращения: 16.04.2026).
17. Kp Index Data Download [Электронный ресурс] // GFZ German Research Centre for Geosciences. – URL: <https://kp.gfz.de/en/data> (дата обращения: 16.04.2026).
18. Usoskin I.G., Kovaltsov G.A. Cosmic ray induced ionization in the atmosphere: Full modeling and practical applications // J. Geophys. Res. – 2006. – Vol. 111. – D21206. – DOI: 10.1029/2006JD007150.
19. Пудовкин М.И., Распопов О.М. Физический механизм воздействия солнечной активности и других геофизических факторов на состояние нижней атмосферы, метеопараметры и климат // Успехи физических наук. – 1993. – Т. 163, № 7. – С. 113–116.
20. Lee S.H., Reeves J.M., Wilson J.C., et al. Particle formation by ion nucleation in the upper troposphere and lower stratosphere // Science. – 2003. – Vol. 301. – P. 1886–1889. – DOI: 10.1126/science.1087236.
21. Лушников А.А., Загайнов В.А., Любовцева Ю.С., Гвишиани А.Д. Образование наноаэрозолей в тропосфере под действием космического излучения // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 50, № 2. – С. 175–184. – DOI: 10.7868/S0002351514020072.
22. Кудрявцев И.В., Юнгер Х. Вариации прозрачности атмосферы под действием галактических космических лучей как возможная причина их влияния на формирование облачности // Геомагнетизм и аэрономия. – 2011. – Т. 51, № 5. – С. 668–676.
23. Янчуковский В.Л. Реакция среднеширотной атмосферы на спорадические вариации космических лучей в регионе Западной Сибири // Солнечно-земная физика. – 2024. – Т. 10, № 4. – С. 65–71. – DOI: 10.12737/szf-104202407.
24. Laštovička J. Monitoring and forecasting of ionospheric space weather effects of geomagnetic storms // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2002. – Vol. 64. – P. 697–705. – DOI: 10.1016/S1364-6826(02)00031-7.
25. Prölss G.W., Werner S. Vibrationally excited nitrogen and oxygen and the origin of negative ionospheric storms // J. Geophys. Res. – 2002. – Vol. 107, No A2. – P. 1016. – DOI: 10.1029/2001JA900126.
26. Клименко М.В., Клименко В.В., Бессараб Ф.С., Ратовский К.Г., Захаренкова И.Е., Носиков И.А., Степанов А.Е., Котова Д.С., Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Влияние геомагнитных бурь 26–30 сентября 2011 года на ионосферу и распространение радиоволн КВ диапазона. I – Ионосферные эффекты // Геомагнетизм и аэрономия. – 2015. – Т. 55, № 6. – С. 769.
27. Черниговская М.А., Ратовский К.Г., Сетов А.Г., Хабитуев Д.С., Калишин А.С., Степанов А.Е., Белинская А.Ю., Бычков В.В., Григорьева С.А., Панченко В.А. Отклик ионосферы над регионами высоких и средних широт Евразии по данным ионозондов во время экстремальной магнитной бури в марте 2015 г. // Солнечно-земная физика. – 2024. – Т. 10, № 4. – С. 51–64. – DOI: 10.12737/szf-104202406.

28. Янчуковский В.Л., Белинская А.Ю. Полугодовая вариация космических лучей и ионосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17, № 5. – С. 286–290. – DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-286-290.

29. Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 268 с.

30. Rishbeth H., Sedgemore-Schulthess K.J.F., Ulich T. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II. Physical discussion // Ann. Geophysicae. – 2000. – Vol. 18. – P. 945–956.

31. Данилов А.А., Крымский Г.Ф., Макаров Г.А. Геомагнитная активность как отражение процессов в магнитосферном хвосте. 1. Источник суточной и полугодовой вариаций геомагнитной активности // Геомагнетизм и аэрономия. – 2013. – Т. 53, № 4. – С. 469–475.

© В. Л. Янчуковский, А. Ю. Белинская, А. А. Ковалев, М. А. Калюжная, В. С. Кузьменко,
Р. З. Хисамов, 2026

Н. О. Кожевников¹✉

Суслики и археогеофизика: к истории открытия памятников древней металлургии железа в Приольхонье

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Статья рассказывает об истории открытия памятников древней металлургии железа в пади Барун-Хал (Приольхонье). При их оконтуривании и изучении структуры большую помощь оказали съемки магнитного поля. Однако в том, что касается открытия памятников, решающую роль сыграли суслики. Они выбрасывают из норок почву с глубины, достигающей нескольких десятков сантиметров. При осмотре местности в устье пади были обнаружены норки, среди выбросов из которых находились древесный уголь и металлургические шлаки. Это указывало на то, что в местах, где были обнаружены норки, в древности осуществлялось производство железа. Открытие памятников древней металлургии в пади Барун-Хал инициировало систематические поиски и изучение подобных памятников в Приольхонье.

Ключевые слова: Приольхонье, археометаллургия, магнитная съемка, суслики

N. O. Kozhevnikov¹✉

Ground squirrels and archaeogeophysics: on the history of the ancient iron production sites discovery in the Olkhon region

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Abstract. The article discusses the discovery of ancient iron production sites in the Barun-Khal valley (Olkhon region). Magnetic surveys were efficient in outlining the sites and studying their structure. However, as for the sites' discovery, these were ground squirrels who played a decisive role. They excavate soil from burrows, reaching depths of about 0.5 m. Examination of the valley's mouth revealed burrows with charcoal and metallurgical slag. This indicated that ground squirrels revealed buried ancient iron production sites. This discovery initiated a systematic search for and study of ancient iron production sites throughout the Olkhon region.

Keywords: Olkhon region, archaeometallurgy, magnetic survey, ground squirrels

Введение

В 1997 г. в Приольхонье (рис. 1), в пади Барун-Хал открыт памятник древней металлургии железа Барун-Хал II [1], а в 1999 г. – памятник Барун-Хал III [2].

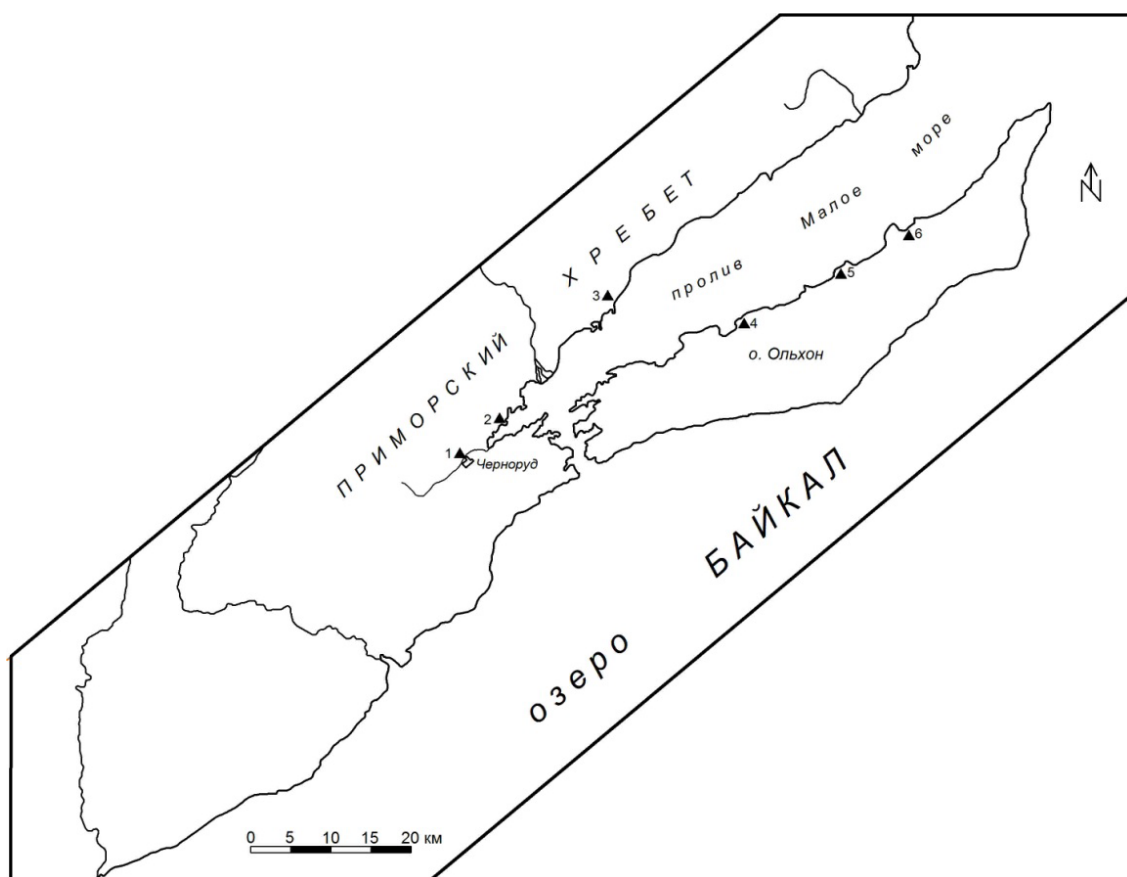


Рис. 1. Приольхонье и остров Ольхон. Треугольниками отмечены памятники древней металлургии железа:
1 – Барун-Хал; 2 – Шида; 3 – Курма; 4 – Хунгай; 5 – Харанцы; 6 – Улан-Хушин.

В работах [1,2,6,4] показано, что при открытии и изучении памятников древнего производства железа в пади Барун-Хал важную роль сыграли археогеофизические исследования (в первую очередь, магнитная съемка). Однако в упомянутых публикациях не нашел должного отражения один принципиальный момент. Речь идет о том, что выбор того или иного участка, рассматриваемого в качестве перспективного для проведения магнитных съемок, основывался на результатах своеобразного опробования поверхностных отложений. Оно осуществлялось сусликами, которые населяют приустьевую часть пади. Как оказалось, в некоторых местах в почве, которую они выбрасывают на поверхность, когда роют норки, встречаются материальные свидетельства осуществлявшегося здесь в древности производства железа.

Падь Барун-Хал

Падь Барун-Хал находится недалеко от деревни Черноруд Ольхонского района Иркутской области. На расстоянии около одного километра к северо-западу от устья пади расположен поселок базы учебных геолого-геофизических практик ИрННТУ (рис. 1).



Рис. 2. Падь Барун-Хал:

1 – археометаллургический памятник; 2 – «пустая» норка; 3 – норка с выбросами шлака, расположенная рядом с комплексом Барун-Хал II; 4 – норка с выбросами шлака, маркирующая место для проведения геофизических съемок и археологических раскопок.

Борта пади сложены породами Ольхонского метаморфического комплекса: мраморами, кальцифирами, гнейсами, пироксеново-карбонатными кристаллическими сланцами, кварцитами, амфиболитами и мигматитами [3, 4]. Падь представляет собой долину с плоским дном, образованным современными отложениями толщиной от единиц до первых десятков метров. На юго-востоке падь соединяется с долиной реки Кучулги.

В пади Барун-Хал известны несколько археологических объектов [7]. Первый из них – Барун-Хал I обнаружен А.В. Харинским в 1994 г. вблизи устья пади. Он включал 16 каменных поминальных кладок. В 1997 г. в приустьевой части пади Н.О. Кожевниковым открыт памятник древней металлургии железа Барун-Хал II, а в 1999 г. – археометаллургический комплекс Барун-Хал III. В 2001 г. у левого борта пади, А.В. Харинским, найдено несколько бурятских захоронений XVIII-XIX вв. Им присвоено название Барун-Хал IV.

Как были открыты археометаллургические памятники в пади Барун-Хал

Открытию памятника Барун-Хал II предшествовало обнаружение в верхней части приповерхностных отложений суперпарамагнитных частиц [1, 6]. В поисках ответа на вопрос, какой именно материал содержит эти частицы, в качестве наиболее вероятного кандидата рассматривались шлаковидные образования, или фрагменты, которые иногда встречались на поверхности в донной части и на

правом водоразделе пади. На это указывали их индукционные переходные характеристики и результаты петромагнитного анализа. О происхождения этих образований высказывались различные соображения, однако изучение их вещественного состава показало, что они являются металлургическими шлаками, которые в качестве побочного продукта образуются в процессе сыродутного производства железа [1, 6].

Дальнейшие усилия были направлены на оконтуривание площади распространения шлаков и поисках других материальных свидетельств металлургической деятельности. Осматривая приустьевую часть пади, Н.О. Кожевников обнаружил норку суслика, рядом с которой находились выброшенные из нее шлаки и древесный уголь. Радиоуглеродное датирование показало, что календарный возраст угля соответствует второй половине II в. до н. э. Это был интригующий результат [1]. и в падь вместе с автором выехали археологи Иркутского государственного университета. На месте, где располагалась норка суслика, А.В. Харинский выкопал шурф глубиной более полуметра, который вскрыл пологозалегающие слои древесного угля, большое количество шлаков и обожженной глины (рис. 3а).



Рис. 3. Стадии раскопок памятника Барун-Хал II: шурф, выкопанный на месте, где были обнаружены выброшенные из норки суслика шлаки и древесный уголь (а); сыродутный горн на северо-западном фланге раскопа (б).

Как известно [8, 9], эффективным геофизическим методом поисков и изучения памятников древней металлургии железа является магниторазведка. После того, как в верхнем слое рыхлых отложений обнаружили свидетельства древней металлургической активности, Н.О. Кожевников выполнил рекогносцировочную съемку модуля (Т) магнитного поля. Измерения проводились по двум профилям, один из которых был ориентирован вдоль (рис. 4а), а другой – поперек (рис. 4б) долины. Шаг наблюдений составлял 1м, пересечение профилей находилось над шурфом.

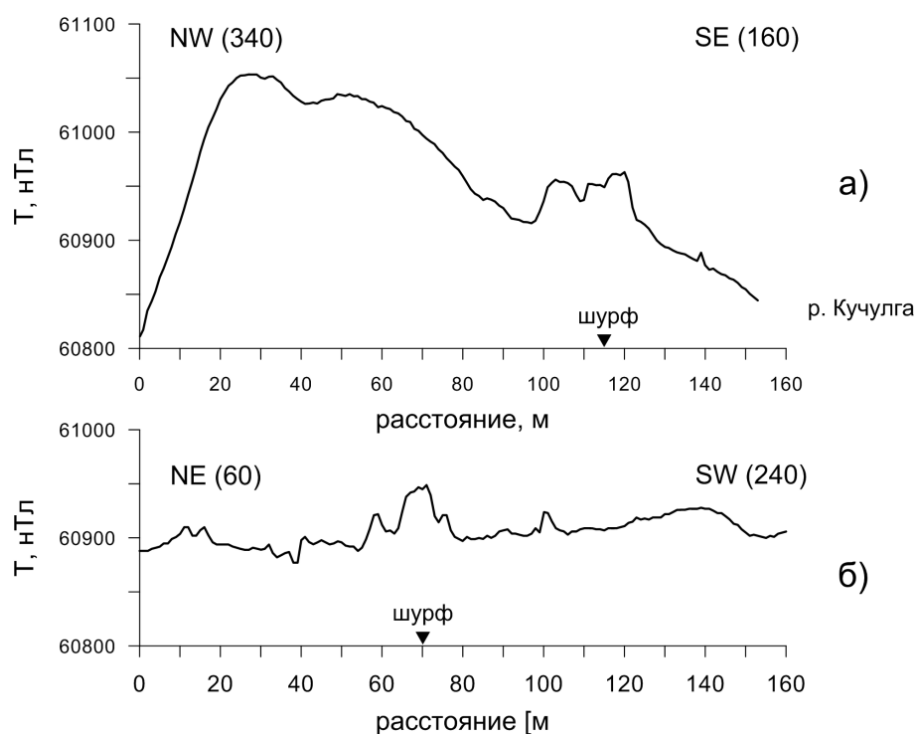


Рис. 4. Магнитное поле вдоль субмеридионального (а) и субширотного (б) профилей, на пересечении которых находился шурф.

На рис. 4 видно, что наряду с региональными изменениями магнитного поля наблюдается локальная аномалия с амплитудой около 50 нТл и поперечными размерами не менее 25м x 25м. Таким образом, шурф оказался расположенным в эпицентре комплекса намагниченных объектов общей площадью порядка 500 – 1000 квадратных метров. Это мотивировало проведение здесь археологических раскопок, в результате которых была обнаружена большая пригорновая яма, окруженная сыродутными горнами. Один из них, в северо-западной части раскопа, показан на рис. 3б. Впоследствии территория вокруг раскопа была изучена комплексом геофизических методов [7].

Открытие археометаллургического комплекса Барун-Хал III произошло по тому же сценарию, что и в случае памятника Барун-Хал II. При осмотре территории в месте, где располагается памятник, Н.О. Кожевников обнаружил норку суслика, рядом с корой находились выброшенные из нее шлаки. После этого с помощью детальной магнитной съемки была изучена структура памятника (рис. 5), что позволило наметить место для рекогносцировочного шурфа и оконтурить участок, где впоследствии производились систематические раскопки [2, 7].

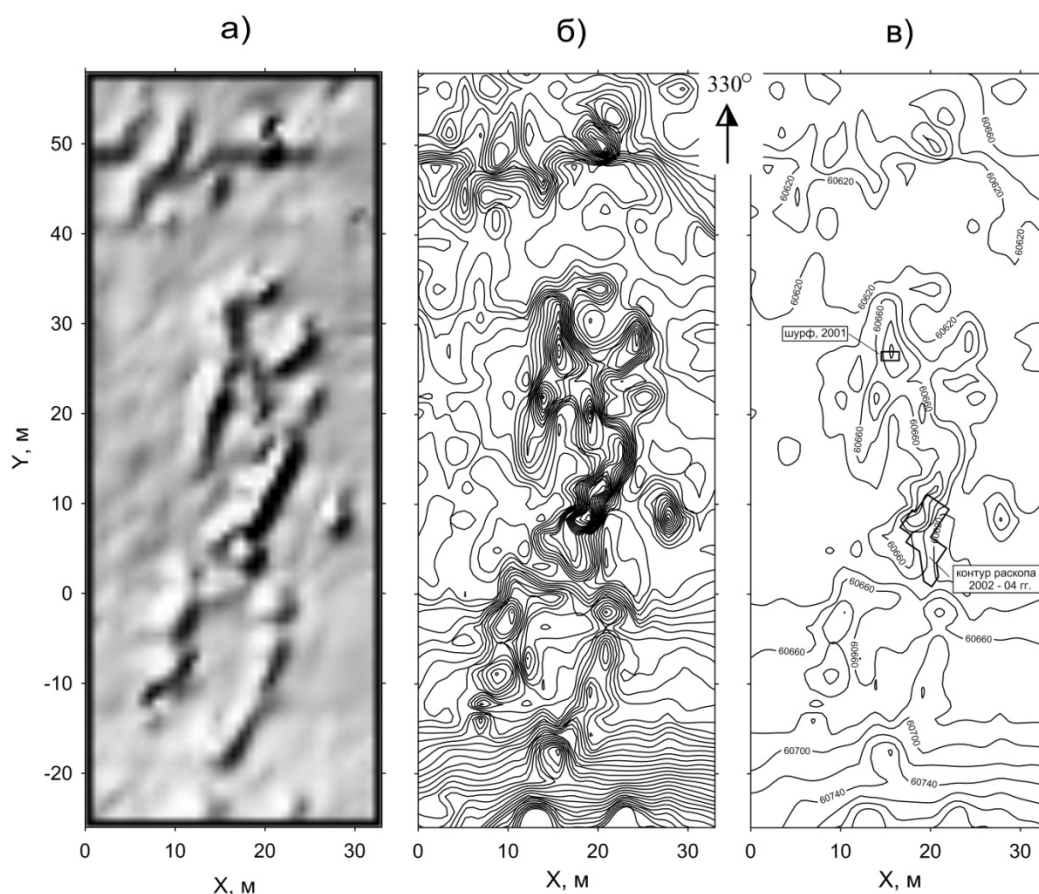


Рис. 5. Археометаллургический комплекс Барун-Хал III. Результаты детальной магнитной съемки показаны в виде карты «затененного рельефа» (а) и планов изолиний магнитного поля с сечением 5 нТл (б) и 20 нТл (в).

Обсуждение результатов

В обоих рассмотренных выше случаях поисковым признаком при обнаружении памятников древней металлургии являлись норки сусликов, рядом с которыми находились шлаки и древесный уголь. Это указывало на то, что здесь когда-то осуществлялось производство железа. Поэтому представлялось логичным провести на территории между рекой Кучулгой и базой практик поисковые работы с тем, чтобы выяснить, есть ли на этой территории другие места, где обнаруживаются прямые указания на присутствие археометаллургических памятников.

Такая съемка, в которой участвовали студенты-геофизики ИрННТУ, была проведена в 2009 г. Всего было найдено 89 норок. На рис. 1 они отмечены маленькими кружками. Большинство из них оказались «пустыми», однако восемь норок свидетельствовали о том, что в местах их расположения осуществлялось производство железа. Пять норок располагались вблизи (не далее 10 м) от раскопа и, скорее всего, оказались в пределах комплекса Барун-Хал II. Вместе с тем они подтверждали результаты детальной магнитной съемки, согласно которым раскопки вскрыли лишь небольшую часть памятника [7]. Однако три норки указывали на вероятное присутствие неизвестных объектов древней металлургии.

Одна из них располагается на расстоянии примерно 60 метров к северу от раскопа, две другие – в отложениях делювия у левого борта пади (на удалении около 260м от раскопа). Они отмечают места, перспективнее для проведения детальных магнитных съемок и – по их результатам – раскопок. Координаты «перспективных» норк: N53 00.399 E106 42.359; N53 00.505 E106 42.328; N53 00.508 E106 42.346.

Заключение

Согласно результатам археогеофизических и археологических исследований, 2200 – 1400 лет назад в пади Барун-Хал осуществлялось масштабное производство железа сыродутным способом [1, 2, 6, 7].

К открытию памятника Барун-Хал II привели поиски ответа на вопрос, почему в верхнем слое почвы наблюдается высокая концентрация суперпарамагнитных частиц. Как правило, археогеофизические съемки проводят на участках, где ранее археологи уже изучали археологические объекты или ожидают, что такие объекты могут быть обнаружены. Что касается памятников древней металлургии в пади Барун-Хал, они были найдены в результате поисков решения сугубо геофизической проблемы, после чего к их изучению подключились археологи. Поэтому история открытия памятников не вполне обычна, а возможно, уникальна.

Как показала история открытия памятников древней металлургии железа в Приольхонье, главным поисковым признаком при их обнаружении являются шлаки. До открытия памятников в пади Барун-Хал на них редко обращали внимания, и никто не предполагал, что они являются свидетельствами древней металлургической активности. В последующие годы, используя шлаки в качестве поискового признака, археологи обнаружили в Приольхонье и на острове Ольхон другие памятники древней металлургии железа (см. рис. 1).

Вероятно, не будет преувеличением сказать, что открытие и изучение памятников древней металлургии в пади Барун-Хал может рассматриваться как начало нового этапа в изучении железного века в Приольхонье. Подводя итоги, следует еще раз отметить неоценимый вклад, который в открытие памятников внесли суслики. Они умные и предпочитают рыть норки там, где в прошлом проводились земляные работы, а грунт более рыхлый, чем в других местах. Благодаря сусликам впервые в Приольхонье удалось найти погребенные археометаллургические объекты и определить участки для проведения археогеофизических съемок и раскопок.

Несколько норк, из числа обнаруженных в результате поисковых работ на территории между рекой Кучулгой и базой практик ИрННТУ, указывают на участки, где целесообразно провести археогеофизические съемки и по их результатам наметить места для раскопок. Напомним, что карта на рис. 2, показывает норки, обнаруженные в 2009 г. Поскольку суслики трудятся неустанно, и каждый год появляются новые норки, целесообразно периодически повторять съемку и обновлять карту.

Представленные в статье результаты частично получены при поддержке программы фундаментальных научных исследований № FWZZ-2026-0049.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кожевников Н.О., Кожевников О.К., Харинский А.В. Как поиски решения геофизической проблемы привели к открытию археологического памятника // Геофизика, 1998, №6, с. 48 – 60.
2. Кожевников Н.О., Харинский А.В. Памятник древней металлургии железа Барун-Хал III // Социогенез Северной Азии: прошлое, настоящее, будущее / Материалы региональной научно-практической конференции. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2003, с. 81 – 86.
3. Кочнев А.П. Ольхонский кристаллический комплекс. Проблемы геологии и минерогенеза Приольхонья: монография. Иркутск: ИрГТУ, 2007. – 252 с.
4. Кочнев А.П., Смолянский Е.Н., Мац В.Д. Байкальский полигон учебных геологических практик // Геофизика на пороге третьего тысячелетия. Труды первой Байкальской молодежной школы-семинара. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1999, с. 5 – 19.
5. Crew P. Magnetic mapping and dating of prehistoric and medieval iron-working sites in northwest Wales // Archaeological Prospection, 9 – 2002 – 163–182.
6. Kozhevnikov N.O., Kharinsky A.V., Kozhevnikov O.K. An accidental geophysical discovery of an Iron Age archaeological site on the western shore of Lake Baikal // Journal of Applied Geophysics, 47 – 2001 – Pp. 107–122.
7. Kozhevnikov N.O., Kharinsky A.V., Snopkov S.V. Geophysical prospection and archaeological excavation of ancient iron smelting sites in the Barun-Khal valley on the western shore of Lake Baikal (Olkhon region, Siberia) // Archaeological Prospection, 26 – 2019 – Pp. 103–119.
8. Linford, N. The application of geophysical methods to archaeological prospection // Rep. Prog. Phys., 69 – 2006 – Pp. 2205–2257.
9. Wynn, J. C. Archaeological prospection: An introduction to the Special Issue // Geophysics, 51 – 1986 – Pp. 533–537.

© Н. О. Кожевников, 2026

Е. М. Лобастова¹✉

Геоэлектрическая модель осадочного чехла Мирнинского кимберлитового поля

¹Новосибирский национальный исследовательский университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: e.lobastova@g.nsu.ru

Аннотация. Мирнинское кимберлитовое поле – уникальное алмазоносное месторождение, включающее трубки «Мир», «Интернациональная», «Дачная», «Амакинская» и «XXIII Съезда КПСС», которое локализуется в узлах пересечения субмеридиональных разломов Вилуйско-Мархинской зоны с Укугутской ветвью Джункун-Хампинской зоны разломов северо-восточного простираения [5]. По результатам магнитотеллурических исследований (38 пунктов зондирования) построены геоэлектрические модели верхней части земной коры и глубинный разрез до 15 км. Выделены субвертикальные проводящие неоднородности (п.п. 199–162, 154–152) на фоне высокоомных блоков (до 12000 Ом·м), интерпретируемые как каналы транспорта кимберлитового вещества. На склонах положительных структур, выделенных в интервалах пунктов 200–160 и 154–151, локализуются кимберлитовые трубки «Интернациональная», «XXIII Съезда КПСС», «Амакинская», «Дачная» и «Мир». Между зонами пониженных значений УЭС (1 и 3), выделенных на глубинном геоэлектрическом разрезе, и положительными структурами осадочного чехла и кристаллического фундамента в интервалах п.п. 200–160 и п.п. 154–151 установлена пространственная корреляция.

Ключевые слова: магнитотеллурические исследования, геоэлектрический разрез, удельное электрическое сопротивление, проводящие неоднородности, Мирнинское кимберлитовое поле

Е. М. Lobastova¹✉

Goelectric model of the sedimentary cover of the Mirny kimberlite field

¹Novosibirsk National Research University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: e.lobastova@g.nsu.ru

Abstract. The Mirny Kimberlite Field is a unique diamond-bearing locality, including the "Mir", "Internatsionalnaya", "Dachnaya", "Amakinskaya", and "XXIII Congress of the CPSU" pipes. It is localized at the intersection nodes of the submeridional faults of the Vilyuy-Markha zone with the Ukugut branch of the Dzhunkun-Khamphin fault zone of northeastern strike [5]. Based on the results of magnetotelluric sounding surveys (38 sounding stations), goelectric models of the upper part of the Earth's crust and a deep lithospheric section down to 15 km have been constructed. Subvertical conductive heterogeneities (stations 199–162, 154–152) have been identified against the background of high-resistivity blocks (up to 8000 Ohm·m), interpreted as channels for kimberlite material transport. Kimberlite pipes "Internatsionalnaya", "XXIII Congress of the CPSU", "Amakinskaya", "Dachnaya", and "Mir" are localized on the slopes of positive structures identified in the intervals of stations 200–160 and 154–151. A spatial correlation has been established between low-resistivity zones (1 and 3) identified in the deep goelectric section and the positive structures of the sedimentary cover and crystalline basement in the intervals of stations 200–160 and 154–151.

Keywords: magnetotelluric studies, geoelectric section, electrical resistivity, conductive heterogeneities, Mirny Kimberlite Field

Введение

Коренные месторождения алмазов составляют основу отечественной минерально-сырьевой базы алмазов. Их поиски на территории России ведутся во многих регионах, характеризующихся различным геологическим строением, условиями ведения работ и степенью изученности. Несмотря на результативность уже проведенных исследований в пределах Сибирской кимберлитовой провинции перспективы обнаружения здесь новых месторождений алмазов остаются высокими. Их практическая реализация связывается с расширением геолого-поисковых работ на «закрытых» территориях, в пределах которых объекты поисков перекрыты образованиями различного генезиса. Одним из способов понять особенности глубинной структуры алмазоносных площадей, отличающие их от соседних «пустых», являются геофизические исследования [3].

Прогнозирование и поиски коренных месторождений алмазов основываются на комплексе критериев и признаков, указывающих на возможность обнаружения объектов различных минерагинических рангов – алмазоносных провинций, субпровинций, минерагинических зон (районов), полей и кустов кимберлитовых тел. Среди региональных критериев выделяются: приуроченность кимберлитов к древним кратонам с возрастом фундамента более 1,5 млрд лет («правило Клиффорда») [6], а также к склонам поднятий кристаллического фундамента, граничащих с крупными впадинами. Для проявления кимберлитов благоприятны зоны сочленения крупных структур первого порядка, положительных и отрицательных платформенных структур – антеклиз и синеклиз при мощности осадочного чехла не более 3,5 км. Пространственно кимберлитовый магматизм приурочен к зонам пересечения разноориентированных глубинных разломов.

Геолого-структурные критерии среднемасштабного прогноза: кимберлитовые поля тяготеют к склонам изолированных сводов и валов, обрамляющих отрицательные структуры первого порядка.

Метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ), основанный на изучении переменного электромагнитного поля магнитосферной и ионосферной природы, является одним из самых глубинных методов электроразведки. Метод успешно используется для регионального и среднемасштабного геологического картирования с целью выявления перспективных площадей на различные виды полезных ископаемых, в том числе и проявления кимберлитового магматизма. Результаты применения региональных и среднемасштабных исследований методом МТЗ на Сибирской платформе показали его высокую информативность при прогнозировании разноранговых объектов кимберлитового магматизма [2]. Установлено, что геоэлектрическим критерием прогнозирования кимберлитовых полей служит наличие проводящих субвертикальных неоднородностей на фоне высокоомного разреза земной коры. Кимберлитовые районы, как правило, располагаются в пределах областей повышенных значений УЭС, а поля и кусты

кимберлитовых трубок локализируются в пределах, проводящих субвертикальных зон [2,8].

Методы и материалы

Полевые исследования методом МТЗ в пределах Мирнинского кимберлитового поля проводились на основе технологий V5 System – 2000 аппаратурой «MTU-5» компании «Phoenix Geophysics» (Канада) по стандартной методике. Обработка полученных данных проводилась в программе SSMT-2000, реализующей современные алгоритмы спектрального анализа в режимах одиночных ("local", SS) и при необходимости синхронных зондирований с удаленной базой ("remote reference", RR). Редактирование кривых кажущегося сопротивления и фаз проводилось в ПО WinGLink с применением функции сглаживания «Smooth» (режим D+, невязка не более 5%). Инверсия производилась после проведения процедуры приведения симметричного тензора к его главным осям.

На первом этапе было выполнено построение геоэлектрического разреза осадочного чехла с использованием традиционного подхода, основанного на ручном подборе параметров слоев при помощи электронной палетки [1]. Данный метод, несмотря на развитие компьютерной инверсии, был применен в качестве независимого средства контроля и для учета априорных геологических данных. В результате были определены параметры геоэлектрического разреза – мощность и удельное электрическое сопротивление (УЭС). Результаты ручного подбора были использованы в качестве стартовой модели для последующей компьютерной инверсии. На последующем этапе выполнен подбор параметров разреза в программном комплексе WinGLink, который осуществлялся в рамках 1D - инверсии путем минимизации функционала невязки (1):

$$L(q) = \sum \left[\frac{\rho_{T(Tm)} - \rho_{Tg(Tm)}}{\rho_{T(Tm)}} \right]^2 \quad (1)$$

($\rho_{T(Tm)}$ - значение УЭС экспериментальной кривой, $\rho_{Tg(Tm)}$ - значение УЭС модельной кривой). Функционал невязки характеризует среднеквадратичное отклонение экспериментальной кривой кажущегося сопротивления от модельной. Таким образом, построены детальные геоэлектрические модели осадочного чехла для каждого пункта зондирования. На основе двумерной инверсии продольных кривых МТЗ в программном комплексе WinGLink получен глубинный геоэлектрический разрез, отражающий распределение электропроводности вплоть до 15 км. Результаты интерпретации направлены на картирование потенциально алмазоносных структур и зон, перспективных для поисков кимберлитов.

Результаты

В пределах осадочного чехла по данным МТЗ выделено пять геоэлектрических горизонтов (рис. 1):

Первый горизонт (ρ_1 , 30–40 Ом·м) соответствует юрским отложениям (вакунайкинская, оруктахская и укугутская свиты), представленным песками, песчаниками,

глинами, аргиллитами и конгломератами. Мощность горизонта варьирует от 200 до 375 м.

Второй горизонт (ρ_2 , 20–30 Ом·м) приурочен к отложениям кембрия–ордовика (балыктахская, мирнинская, метегерская, ичерская, чарская и олёмминская свиты). Литологически представлен доломитами, известняками, мергелями, аргиллитами, а также прослоями гипса, ангидрита и каменной соли. Мощность составляет 300–675 м.

Третий горизонт (ρ_3 , 25–55 Ом·м) выделен в центральной части профиля и образован чарской и олёмминской свитами нижнего кембрия. Мощность горизонта — 300–375 м.

Четвёртый горизонт (ρ_4 , 60–80 Ом·м) включает отложения нижнего кембрия (толбачинская, эльгянская, нелбинская, юрегинская и билирская свиты), сложенные доломитами, известняками, мергелями, аргиллитами, а также каменной солью. Мощность достигает 1250–1625 м. В центральной части профиля выделяется обобщённый горизонт ρ_4^* (60–65 Ом·м) мощностью 1125–1250 м.

Пятый горизонт (ρ_5 , 150–600 Ом·м) обнаруживается на глубинах от 2750 м до 1250 м и соответствует кристаллическому фундаменту, представленному вендскими отложениями (сланцы, амфиболитовые гнейсы, гранитоиды, кварциты). Мощность горизонта превышает 1750 м.

В пределах верхней части земной коры картируются 10 субвертикальных зон дробления с пониженными значениями удельного электрического сопротивления (УЭС) 10 Ом·м. В районах п.п. 200-160 и п.п. 154-151 выделяются положительные структуры платформенного чехла и кристаллического фундамента. Границами между поднятиями и сопряжёнными с ними блоками отрицательных структур служат субвертикальные зоны дробления. На склонах поднятий располагаются алмазоносные трубки «Интернациональная», «XXIII Съезда КПСС», «Амакинская», «Дачная», «Мир».

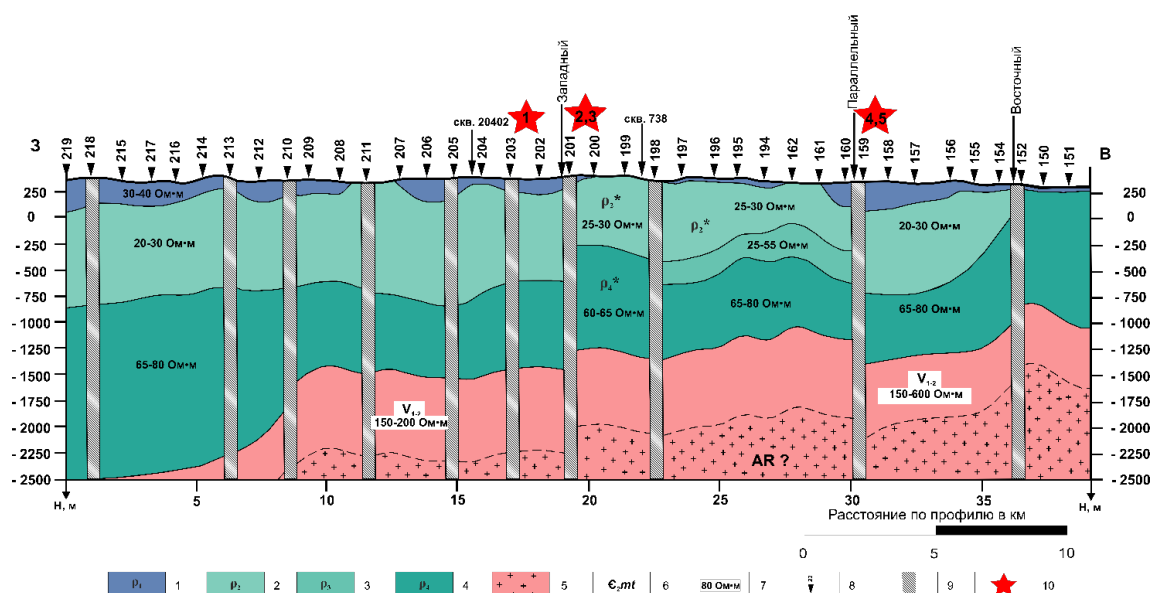


Рис. 1. Геоэлектрический разрез верхней части земной коры Мирнинского кимберлитового поля

(1- первый геоэлектрический горизонт (отложения нижней юры – вакунайкинская (J_{1vk}), оруктахская (J_{1or}) и укугутская (J_{1uk}) свиты): 30-40 Ом·м; 2 – второй геоэлектрический горизонт (отложения кембрия-нижнего ордовика – балыктахская (ϵ_3-O_{1bl}) свита, мирнинская (ϵ_{2mr}), метегерская (ϵ_{2mt}), ичерская (ϵ_{1-2ic}), чарская ($\epsilon_{1\check{c}r}$), олекминская (ϵ_{1ol}) свиты): 20-30 Ом·м; 3 – третий геоэлектрический горизонт (отложения нижнего кембрия – чарская ($\epsilon_{1\check{c}r}$) и олекминская (ϵ_{1ol}) свиты): 25-55 Ом·м; 4 – четвертый геоэлектрический горизонт (отложения нижнего кембрия – толбачинская (ϵ_{1tl}), эльгянская (ϵ_{1el}), нелбинская (ϵ_{1nl}), юрегинская (ϵ_{1jr}), билирская (ϵ_{1bl}) свиты): 65-80 Ом·м; ρ_2^* – отложения кембрия-нижнего ордовика – балыктахская (ϵ_3-O_{1bl}), мирнинская (ϵ_{2mr}), метегерская (ϵ_{2mt}), ичерская (ϵ_{1-2ic}) свиты: 25-30 Ом·м; ρ_4^* – отложения кембрия – чарская ($\epsilon_{1\check{c}r}$), олекминская (ϵ_{1ol}), толбачинская (ϵ_{1tl}), эльгянская (ϵ_{1el}), нелбинская (ϵ_{1nl}), юрегинская (ϵ_{1jr}), билирская (ϵ_{1bl}) свиты: 60-65 Ом·м; 5 – кристаллический фундамент, представленный отложениями венда (V_{1-2}); 6 – индекс геологического возраста отложений; 7 – значения удельного электрического сопротивления в Ом·м; 8 – пункты МТ-зондирований; 9 – зоны дробления; 10 – алмазоносные трубки (1- Интернациональная, 2 -XXIII Съезда КПСС, 3 – Амакинская, 4 – Дачная, 5 - Мир)).

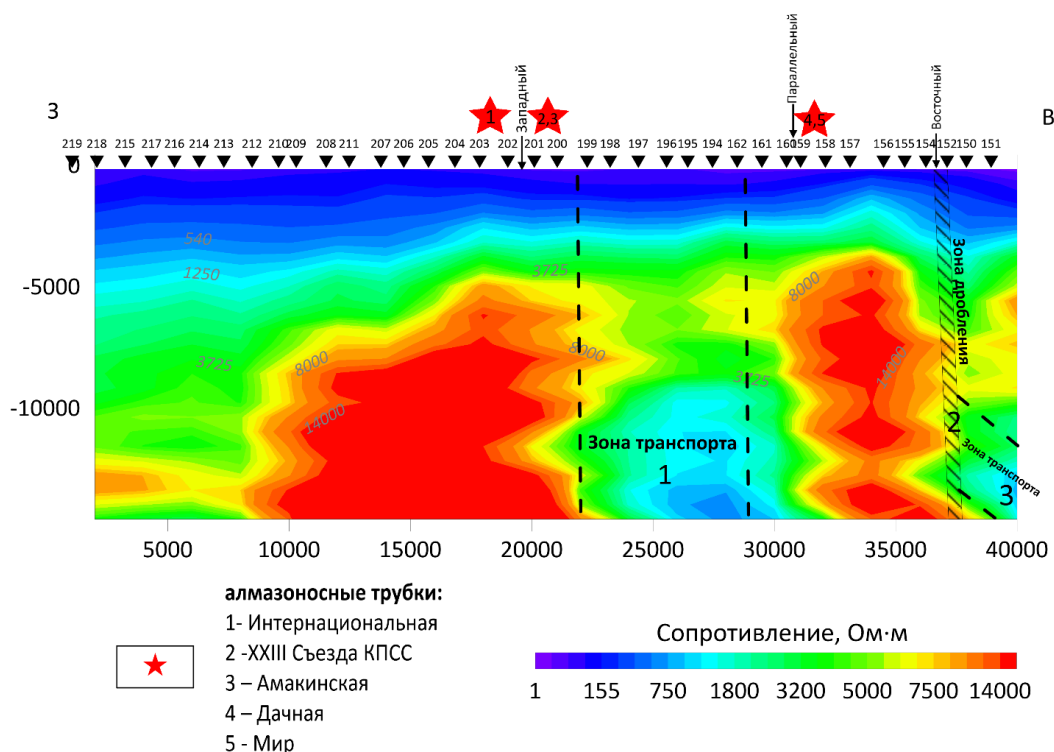


Рис. 2. Глубинный геоэлектрический разрез Мирнинского кимберлитового поля.

Характерной особенностью глубинного строения консолидированной коры Мирнинского поля является наличие высокоомной области со значениями сопротивления порядка 12000 Ом·м, на фоне которых развиты субвертикальные проводящие зоны с низкими значениями УЭС 200 Ом·м (рис. 2). Высокомная неоднородность прослежена на всем разрезе. Глубина ее верхних кромок составляет 5 км соответственно. В верхней части разреза – в осадочном чехле глубинным неоднородностям соответствуют зоны сочленения положительных и отрицательных структур (антиморфных).

Обсуждение

Результаты проведенных исследований выявили пространственную связь между глубинным строением консолидированной коры и осадочного чехла. Показано, что зонам пониженных значений УЭС, установленным в разрезе консолидированной коры, соответствуют области сочленения положительных и отрицательных структур осадочного чехла (антиморфные структуры). Согласно геологическим данным, именно такие структуры наиболее благоприятны для проявления кимберлитового магматизма [7]. Аналогичные геолого-структурные предпосылки выявлены геологами в Алакит-Мархинском кимберлитовом поле [8]. Эти геоэлектрические признаки, вкупе с геолого-тектоническими, петрологическими и минералого-геохимическими предпосылками хорошо зарекомендовали себя при выявлении кимберлитовых тел и могут рассматриваться в качестве дополнительных прогнозных критериев кимберлитового магматизма в районах со сложной геологической обстановкой.

Заключение

Согласно полученным данным построены геоэлектрические модели осадочного чехла и консолидированной части земной коры Мирнинского кимберлитового поля. Их анализ показал:

1. Проводящие зоны (1, 3), выделенные на глубине порядка 10-12 км интерпретируются как транспортные каналы, по которому кимберлитовая магма поступала в верхние горизонты земной коры.

2. В верхней части земной коры выявлены положительные структуры (п.п. 200–160, п.п. 154–151), к склонам которых приурочены алмазоносные кимберлитовые трубки «Интернациональная», «XXIII Съезда КПСС», «Амакинская», «Дачная» и «Мир».

3. Установлена пространственная корреляция между глубинными проводящими геоэлектрическими неоднородностями и зонами сочленения положительных и отрицательных структур осадочного чехла. Проводящая неоднородность 1 (п.п. 199–162) располагается непосредственно в районе поднятия, зафиксированного в интервале пунктов 200–160, зона пониженных значений УЭС - 3 (п.п. 152–151) приурочена к антиформной структуре в интервале пунктов 154–150 верхней части земной коры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. Москва: Науч. мир, 1997 год. – 218 с.
2. Поспеева Е.В. Проводящие неоднородности в литосфере как критерий прогнозной оценки алмазоперспективных площадей (на примере Сибирской кимберлитовой провинции) // Записки Горного института, т. 224, 2017 год. – 170-177 с.
3. Геология, прогнозирование, методика поисков, оценки и разведки месторождений алмазов. Книга 1. Коренные месторождения /В.М. Подчасов, В.Е. Минорин, И.Я. Богатых. ЯФ ГУ «Издательство» СО РАН. 2004. 547 с.
4. Кутинов Ю.Г. Тектонические критерии выделения таксонов кимберлитового магматизма Архангельской алмазоносной провинции / Ю.Г.Кутинов, З.Б.Чистова // Геодинамика, магматизм, седиментогенез и минералогия Северо-Запада России. Петрозаводск: Институт геологии КарНЦ РАН, 2007. С. 226-230.
5. Горев Н.И., Герасимчук А.В., Проценко Е.В., Толстов А.В. Тектонические аспекты строения Вилуйско-Мархинской зоны, их использование при прогнозировании кимберлитовых полей // Наука и образование. 2011. № 3. С. 5–10.
6. Clifford T.N. Tectono-metallogenic units and metallogenic provinces in Africa // Earth. Planet. Sci. Lett. 1966. Vol. 1. N 6. P. 421–434.
7. Иванов Д.В., Толстов А.В., Иванов В.В. Структурно-тектонические критерии поисков кимберлитовых тел в Алакит-Мархинской поле. //Руды и металлы 2019. № 2. С. 55-60.
8. Поспеева Е.В., Толстов А.В. Новые перспективы Алакит-Мархинского кимберлитового поля на проявление кимберлитового магматизма (по данным магнитотеллурических исследований). //Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2024. №1. С. 1-18.

© Е. М. Лобастова, 2026

О. А. Кучай¹, Е. А. Мельник¹✉

Структурные особенности афтершоковых процессов землетрясений Центральной Азии и Японии ($7.0 \leq M_w \leq 8.2$)

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: MelnikEA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Анализировалось пространственно-временное распределения афтершоковых последовательностей 19 сильнейших ($7.0 \leq M_w \leq 7.9$) коровых внутриплитных землетрясений Центральной Азии ($\varphi = 20^\circ - 50^\circ$ с.ш., $\lambda = 57^\circ - 120^\circ$ в.д.) и 5 землетрясений ($7.0 \leq M_w \leq 8.2$) в зоне субдукции Тихоокеанской плиты в пределах территории Японии ($\varphi = 38^\circ - 44^\circ$ с.ш., $\lambda = 137^\circ - 145^\circ$ в.д.) за период наблюдения 1976–2021 гг. Исследование показало, что повторные сейсмические толчки ($m_{b(isc)} \geq 4.5$) шести главных землетрясений Азии развиваются только в рамках области простира-ния афтершоков, образованной в первые сутки, в остальных случаях зоны афтершоков увеличиваются. Оценка эволюции сейсмического процесса осуществлялась по значениям суммарных скалярных сейсмических моментов афтершоков ($m_{b(isc)} \geq 4.5$), произошедших на участках, полученных при разделении линейной протяженности очага на фрагменты в 0.25° при разных временных периодах: сутки, 10 дней, месяц, год. В результате анализа значений суммарных скалярных сейсмических моментов в фрагментах афтершоковых серий вдоль линейной протяженности разрыва главных очагов наибольшие всплески активности отмечены вблизи эпицентра главного события или на конце афтершоковой области. Выявлены особенности простира-ния некоторых афтершоковых серий сильных землетрясений на востоке Японии.

Ключевые слова: афтершоковые последовательности, скалярная величина сейсмического момента, сильнейшие землетрясения Центральной Азии и Японии, механизмы очагов землетрясений

О. А. Kuchai¹, E. A. Melnik¹✉

Structural features of aftershock processes of earthquakes in Central Asia and Japan ($7.0 \leq M_w \leq 8.2$)

¹Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: MelnikEA@ipgg.sbras.ru

Abstract. The spatiotemporal distribution of aftershock sequences of 19 strongest ($7.0 \leq M_w \leq 7.9$) crustal intraplate earthquakes in Central Asia ($\varphi = 20^\circ - 50^\circ$ N, $\lambda = 57^\circ - 120^\circ$ E) and 5 earthquakes ($7.0 \leq M_w \leq 8.2$) in the subduction zone of the Pacific Plate within the territory of Japan ($\varphi = 38^\circ - 44^\circ$ N, $\lambda = 137^\circ - 145^\circ$ E) were analyzed for the observation period of 1976–2021. The study showed that repeated seismic tremors ($m_{b(isc)} \geq 4.5$) of the six major Asian earthquakes develop only within the aftershock strike zone formed during the first day, while in other cases the aftershock zones increase. The dynamics of the evolution of the seismic process was assessed based on the values of the total scalar seismic moments of aftershocks ($m_{b(isc)} \geq 4.5$) that occurred in areas obtained by dividing the linear extent of the source into fragments of 0.25° for different time periods: day, 10 days, month, year. An analysis of the total scalar seismic moments in fragments of aftershock sequences along the linear extent of the main shock rupture revealed that the largest bursts of activity were observed near the epicenter of the main event or at the end of the aftershock region. Striking features of some aftershock sequences of large earthquakes in eastern Japan were identified.

Keywords: aftershock sequences, scalar magnitude of the seismic moment, the strongest earthquakes in Central Asia and Japan, mechanisms of earthquake foci

Введение

Афтершоки, возникающие после сильнейших землетрясений часто приводят к дополнительным разрушениям уже поврежденных объектов главными событиями. Наибольший вклад в совокупный разрушительный эффект вносят коровые землетрясения и их афтершоки. Поэтому значительный интерес представляет зона распределения сильных афтершоков коровых землетрясений Центральной Азии, а также влияние повторных толчков коровых Японских землетрясений в погружающейся Тихоокеанской плите. Цель настоящего исследования – анализ временной и пространственной структуры афтершоковых серий внутриплитных коровых землетрясений Центральной Азии ($7.0 \leq M_w \leq 7.9$) и Японии ($7.0 \leq M_w \leq 8.2$) в зоне субдукции Тихоокеанской и Охотоморской плиты в областях земной коры для выяснения влияния разных тектонических условий на развитие афтершокового процесса. Для этого, рассмотрена динамика развития сейсмического процесса путем анализа значений суммарных скалярных сейсмических моментов высвободившихся в течение суток, 10 дней, месяца и года при развитии афтершоковых процессов с $m_{b(isc)} \geq 4.5$.

Материалы и методы

В предыдущие годы вышел целый ряд публикаций со всесторонним анализом афтершокового процесса сильных землетрясений [Hartog, Schwartz, 1996; Гольдин и др., 2004; Susan et al., 2007; Лукк, Дещеревский, 2015; Лутиков, Родина, 2013; Лутиков и др., 2017; Родкин, 2020; Завьялов, Зотов, 2021; Guglielmi et al. 2023] и теоретическим анализом поведения повторных толчков [Шебалин и др., 2018; Баранов, Шебалин, 2018]. Ряд статей направлен на исследование напряженно-деформированного состоянию за счет повторных толчков [Ребецкий, Маринин, 2006; Rebetsky, Polets, 2014; Tikhotsky et al., 2023; Kuchay, Bushenkova, 2025].

Для работы использовались материалы каталога Геологической службы США (<https://earthquake.usgs.gov>), были отобраны 19 сильнейших коровых землетрясениях ($7.0 \leq M_w \leq 7.9$) за временной период 1971–2022 гг. на территории Центральной Азии с координатами (20° – 55° с.ш. и 55° – 120° в.д.) (рис. 1А) (из них 9 главных событий подробно рассмотрены в [Кучай, Мельник, 2026]) и 5 землетрясений ($7.0 \leq M_w \leq 8.2$) в Японии ($\varphi=38^\circ$ – 44° с.ш., $\lambda=137^\circ$ – 145° в.д.) (рис. 1Б). Из них три землетрясения зарегистрированы непосредственно в зоне субдукции Тихоокеанской и Охотоморской плит и два вблизи западной границы Охотоморской плиты (рис. 1Б). По каталогам Международного сейсмологического центра ISC (<http://www.isc.ac.uk>) для всех двадцати четырех сильнейших землетрясений отобраны афтершоки с $m_{b(isc)} \geq 4.5$ на площадках $3^\circ \times 3^\circ$ с эпицентром основного события в центре. Выборка повторных событий ограничена одним годом аналогично публикации [Баранов, Шебалин, 2018]. Из каталога (www.globalcmt.org) использовались материалы о моментной магнитуде (M_w), информация о параметрах механизмов очагов и величине скалярного сейсмического момента сильных землетрясений (M_0).

Аналогично публикациям [Кучай, Бушенкова, 2025; Кучай, Мельник, 2026] в настоящем исследовании магнитуды $m_{b(isc)}$ пересчитаны в моментную магнитуду M_w , далее определяется суммарный скалярный сейсмический момент, высвобождаемый в афтершоковых сериях: $M_{osum\ af}$, выраженный в $\text{дин} \times \text{см}$. Все афтершоки с $m_{b(isc)} \geq 4.5$, расположенные вдоль плоскостей разрыва главных землетрясений, разбиваются на части по 0.25° . В пределах этих фрагментов рассчитывались суммарные величины скалярных сейсмических моментов и строились подробные графики распределения значений для каждого элемента за сутки, 10 дней, месяц и год. В случае, если азимут вытянутости облака повторных толчков составлял угол с параллелью меньше 45° , то данные располагались вдоль оси абсцисс, если угол был больше, то вдоль ординат. Афтершоки японских землетрясений рассматривались как вдоль оси ординат в соответствии с простиранием плоскости разрыва, так и вдоль оси абсцисс в соответствии с направлением погружения этой плоскости.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1А показаны эпицентры 19 сильнейших землетрясений Азии с $M_w \geq 7.0$ и решения их фокальных механизмов за период 1976–2021 гг. Из них афтершоки девяти землетрясений уже рассматривались в публикации [Кучай, Мельник, 2026]. В результате выполненных расчетов были построены графики суммарных величин скалярных сейсмических моментов для каждого фрагмента афтершокового облака за сутки, 10 дней, месяц и год, начиная с первого афтершока.

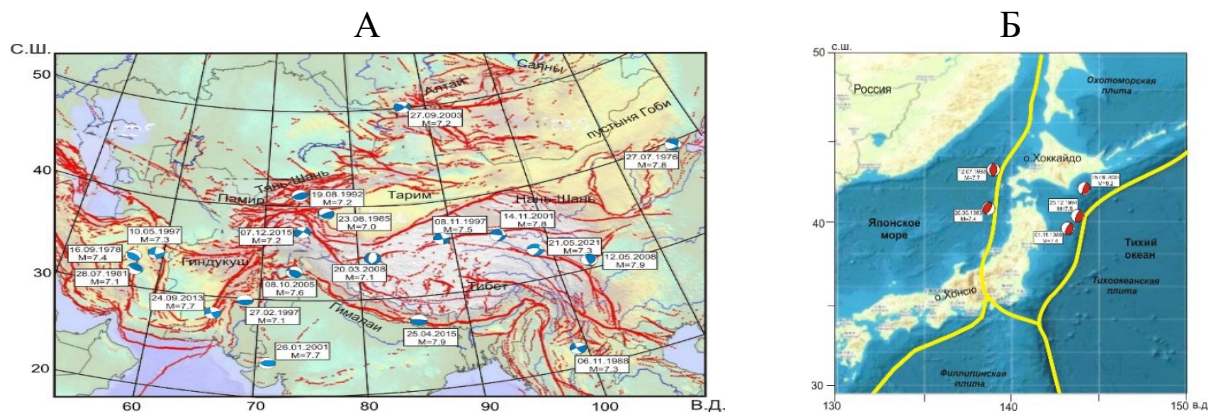


Рис. 1. А – Эпицентры сильнейших землетрясений Азии ($M \leq 7.0$) и решения их фокальных механизмов за период 1976–2021 гг. Голубым цветом закрашены области волн сжатия, белым – растяжения. Решения механизмов очагов (из Global CMT) представлены в верхней полусфере. Красным цветом отмечены линии разломов.

Карта разломов по [Бачманов и др., 2017], разломы: 1 – Чаманский, 2 – Арнимакингский, 3 – Лунмэньшанский разлом, 4 – зона Фронтального разлома Гималаев. Б – Эпицентры сильнейших землетрясений Японии ($M_w \geq 7.0$) и решения их фокальных механизмов за период 1983–2003 гг. Зона конвергентной границы Тихоокеанской плиты с Охотоморской, Амурской плиты и Охотоморской. Красным цветом закрашены области волн сжатия, белым – растяжения. Решения механизмов очагов из (www.globalcmt.org) представлены в верхней полусфере.

В публикации [Кучай, Мельник, 2026] показаны примеры распределения афтершоков наиболее сильных землетрясений Азии, простираание облака которых согласуется с положением плоскости разрыва главного события. На рисунке 2 показано распределение афтершокового процесса для сейсмического события 28.12.1994 г. в зоне конвергентной границы Тихоокеанской и Охотоморской плит. Вытянутость облака афтершоков расположена в крест простираанию обеих нодальных плоскостей главного землетрясения. Фокальный механизм очага показывает субмеридиональное положение нодальных плоскостей (рис. 1Б), в то же время простираание афтершоковой серии близширотное. В течение всех анализируемых периодов максимальная величина суммарных скалярных сейсмических моментов концентрируется в секторе в 0.1° от главного очага, независимо от построения графиков в крест положения нодальных плоскостей или вдоль плоскостей разлома. Форма графиков афтершоковой последовательности не сохраняется в течение следующих временных периодов.

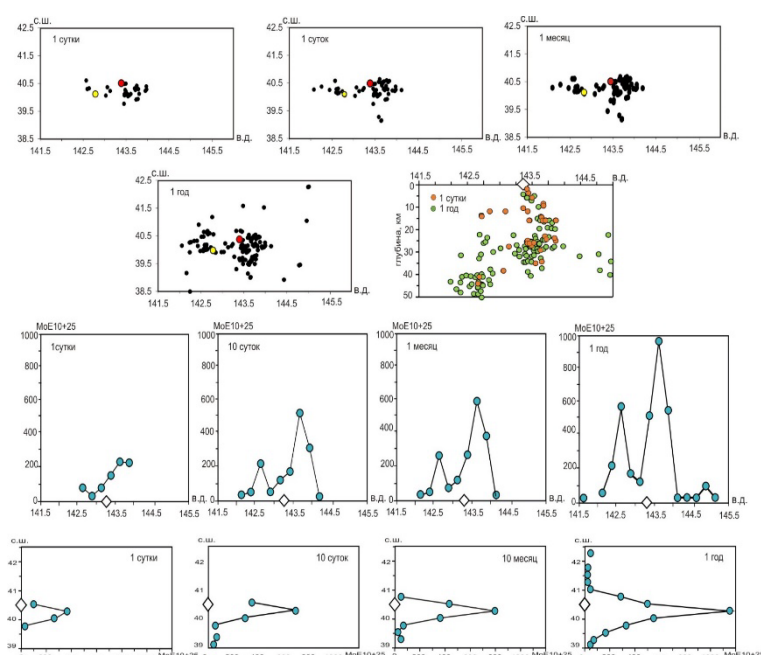


Рис. 2. Распределение афтершоков в районе сильного землетрясения 28.12.1994 г. (M_w (usgs)=7.8), их пространственное расположение по глубине и графики суммарных величин скалярных сейсмических моментов. Красным кружком отмечен эпицентр главного землетрясения, синими точками показаны уровни величин скалярных сейсмических моментов, определенных вдоль плоскости разрыва за сутки, 10 дней, месяца и года. Эпицентр отмечен белым ромбом на осях широт и долгот.

Похожим образом происходит распределение повторных событий при землетрясении 1.11.1989 г. (M_w (usgs)=7.4) и землетрясении 25.09.2003 г. (M_w (usgs)=8.2). В обоих случаях субмеридиональное положение нодальных плоскостей фокальных механизмов не согласуется с субширотной вытянутостью облака афтершоков (рис.1Б). Максимальная величина суммарных скалярных сейсмических моментов

концентрируется по отношению к главному событию в пределах участка в 0.65° (при втором землетрясении в 0.75°) при расположении повторных событий вкрест простирания плоскости разрыва и в 0.25° при распределении их вдоль субмеридиональной нодальной плоскости (при втором землетрясении в 0.1°) (рис. 3).

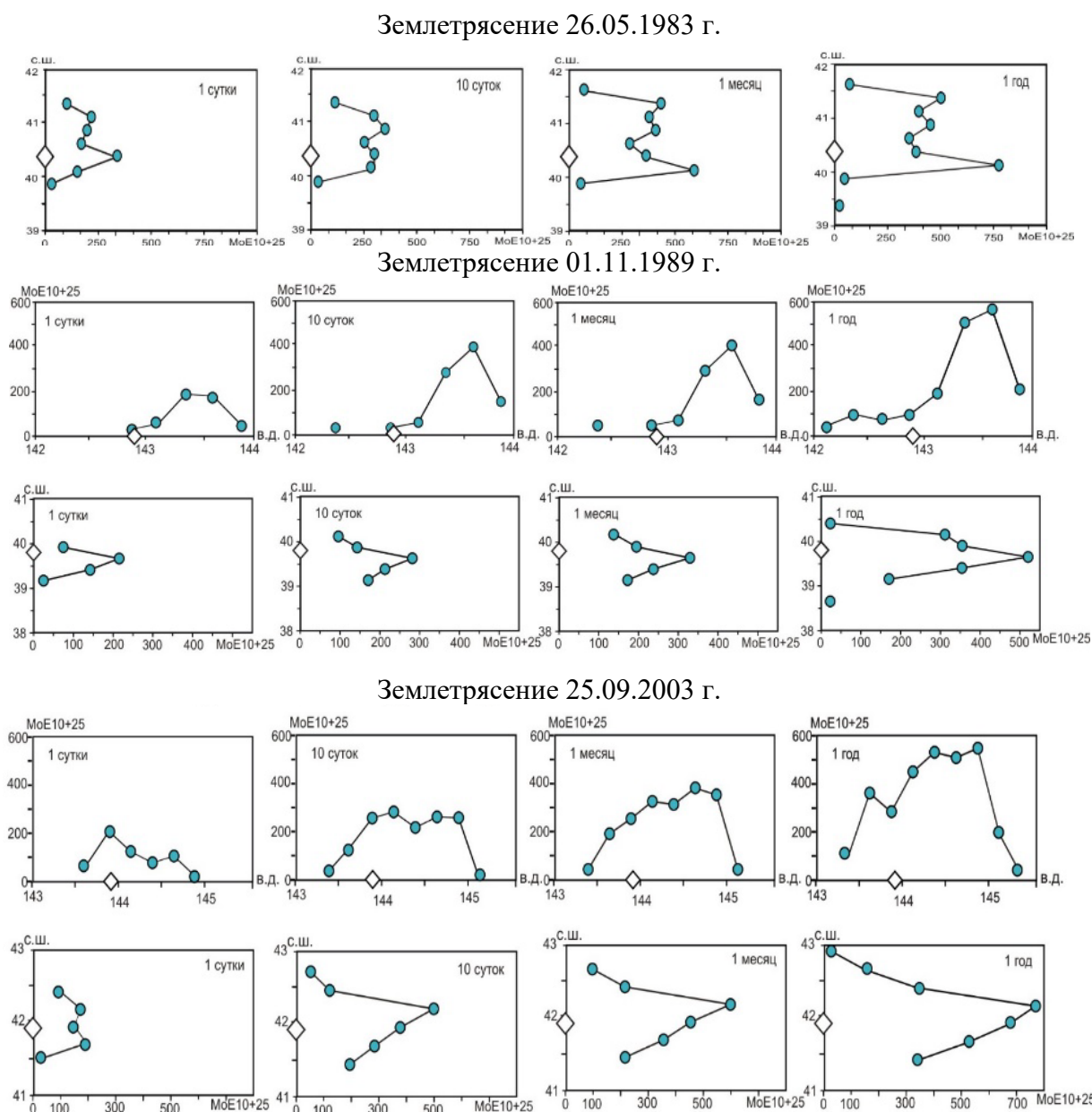


Рис.3. Графики суммарных величин скалярных сейсмических моментов землетрясений Японии. Условные обозначения см. на рис. 2.

Согласно расчетам по афтершоковым последовательностям составлена таблица 1.

Таблица 1. Каталог сильнейших землетрясений Центральной Азии и Японии ($M \geq 7.0$) за 1976–2021 гг. с данными о максимальных магнитудах землетрясений, величинах скалярного сейсмического момента главных событий и накопленных скалярных сейсмических моментов афтершоковых последовательностей M_{0i} аф с $m_{b(isc)} \geq 4.5$ и отношения M_{0i} аф с $m_{b(isc)} \geq 4.5$ к величинам скалярного сейсмического момента главных землетрясений.

N п/п	дата	время	широта	долгота	M_w USGS	H USGS	M_w CMT	H CMT	M_0 глав	$\frac{\sum M_{0i} \text{ аф}}{M_0 \text{ глав}}$	$\sum M_{0i} \text{ аф}$ [дин-см]
Землетрясения Центральной Азии											
1	27.07.1976	19:42	39.36	117.85	7.8	23	7.6	15	2.77e+27	1%	2.8e+25
2	16.09.1978	15:35	33.38	57.33	7.4	33	7.3	11	1.32e+27	0.98%	1.3e+25
3	28.07.1981	17:22	30.01	57.79	7.1	33	7.2	15	9.01e+26	4.55%	4.1e+25
4	23.08.1985	12:41	39.43	75.41	7	7	6.9	15	3.29e+26	2.37%	7.8e+24
5	06.11.1988	13:03	22.87	99.74	7.7	18	7.3	15	3.66e+26	136%	5.0e+26
6	19.08.1992	2:04	42.14	73.57	7.3	27	7.2	17	7.68e+26	91.14%	7.0e+26
7	27.02.1997	21:08	29.85	68.19	7.1	33	7.1	15	5.2e+26	18.46%	9.6e+25
8	10.05.1997	7:57	33.75	59.79	7.3	10	7.2	15	7.35e+26	0.99%	7.3e+24
9	08.11.1997	10:02	35.08	87.41	7.5	33	7.9	16	2.23e+27	0.53%	1.2e+25
10	26.01.2001	3:16	23.38	70.34	7.7	16	7.6	20	3.43e+27	2.3%	7.9e+25
11	14.11.2001	9:45	35.69	93.33	7.8	10	7.8	15	5.9e+27	0.81%	4.8e+25
12	27.09.2003	11:33	49.97	87.76	7.3	16	7.2	15	9.38e+26	66.1%	6.2e+26
13	08.10.2005	3:50	34.49	73.7	7.6	26	7.6	12	2.94e+27	19.38%	5.7e+26
14	20.03.2008	22:32	35.46	81.46	7.2	10	7.1	12	5.43e+26	4.41%	2.4e+25
15	12.05.2008	6:28	30.99	103.39	7.9	19	7.9	13	8.97e+27	6.35%	5.7e+26
16	24.09.2013	11:29	26.91	65.53	7.7	15	7.8	12	5.59e+27	8.4%	4.7e+26
17	25.04.2015	6:11	28.13	84.72	7.8	8	7.9	28	8.39e+27	20.26%	1.7e+27
18	07.12.2015	7:50	38.13	72.89	7.2	22	7.2	12	7.63e+26	0.95%	7.3e+24
19	21.05.2021	18:04	34.6	98.25	7.3	10	7.4	12	1.66e+27	1.92%	3.2e+25
Землетрясения Японии											
1	26.05.1983	2:59	40.46	139.1	7.4	24	7.7	13	4.55e+27	6.65%	3.03e+26
2	12.07.1993	13:17	42.85	139.2	7.7	17	7.7	16	4.65e+27	4.13%	1.92e+26
3	28.12.1994	17:22	40.52	143.42	7.8	26	7.7	28	4.89e+27	6.89%	3.37e+26
4	01.11.1989	18:25	39.84	142.76	7.4	7	7.4	29	1.36e+27	13.3%	1.81e+26
5	25.09.2003	13:03	41.81	143.91	8.2	23	8.3	28	3.05e+28	9.87%	3.01e+26

Основываясь на данных таблицы, суммарная величина скалярного сейсмического момента каждой афтершоковой серии по отношению к сейсмическому моменту главного события на территории Азии составляет от 0.53% до 91%. Землетрясения с наибольшими значениями накопленных суммарных скалярных сейсмических моментов повторных событий произошли в зонах наиболее мощных разломов и имели магнитуду 7.6 и 7.8. В то же время более слабые главные землетрясения с $M_w=7.1-7.3$ происходили в зоне локальных и в зоне основных разломов. Землетрясения Японии характеризуются достаточно близкими значениями отношений суммарной величины скалярного сейсмического момента афтершоковой последовательности к сейсмическому моменту главного события.

Особенности развития афтершоковых серий ($m_{b(isc)} \geq 4.5$) сильнейших землетрясений, оцениваемые за сутки, 10 дней, месяц и год показывают, что только в первом приближении сохраняется форма графиков по высвобождению суммарного скалярного сейсмического момента; со временем увеличиваются лишь их значения (рис. 2, 3).

Процесс развития афтершоковых серий главных землетрясений 28.07.1981 г., 06.11.1988 г., 10.05.1997 г., 26.01.2001 г., 12.05.2008 г. и 21.05.2021 г. реализуется в границах области простираания афтершоков, образованных в первые сутки [Кучай, Мельник, 2026]. Разумеется, более слабые афтершоки происходят также и за границами этой площади. Соответственно, основная перестройка поля напряжений и основная деформация среды для этих землетрясений осуществляется в пределах этой афтершоковой области с $m_{b(isc)} \geq 4.5$. Афтершоковый процесс слабых событий может продолжаться годы, но вклад повторных толчков с $m_{b(isc)} \leq 4.5$ в суммарный скалярный сейсмический момент незначителен. В большинстве остальных случаев спустя сутки отмечается возникновение повторных сейсмических событий с $m_{b(isc)} \geq 4.5$ в краевых частях афтершоковой области, что отражается в графиках величин скалярных сейсмических моментов, а именно на периферии простираания плоскостей разрыва, причем в большинстве случаев с небольшими значениями суммарных скалярных сейсмических моментов. Подобные изменения поля напряжений и соответственно деформаций укладываются в рамки теоретических представлений в публикации [Осокина, Цветкова, 1980].

Заключение

Исследование пространственно-временного распределения афтершоковых последовательностей 19 сильнейших ($7.0 \leq M_w \leq 7.9$) коровых внутриплитных землетрясений Центральной Азии и 5 землетрясений ($7.0 \leq M_w \leq 8.2$) в зоне субдукции Тихоокеанской плиты в пределах территории Японии показало, что в результате анализа фрагментов афтершоковых серий вдоль линейной протяженности разрыва главных очагов наибольший рост значения накопительного скалярного сейсмического момента афтершоков концентрируется вблизи эпицентра главного события или на конце афтершоковой области. Кроме того, повторные сейсмические толчки ($m_{b(isc)} \geq 4.5$) шести главных землетрясений Азии развиваются только в рамках области простираания афтершоков, образованной в первые сутки, в остальных случаях зоны афтершоков увеличиваются. Соответственно высвобождение суммарного

скалярного сейсмического момента в ходе развития афтершокового процесса вдоль плоскости вытянутости разрыва происходит неравномерно. Благодаря этому возникают деформации разного уровня значений и соответственно снимаются напряжения различной величины, которые сказываются на распределении уровня накопительного скалярного сейсмического момента афтершоков, возникающих вдоль плоскости разрыва, что в свою очередь свидетельствует о неоднородности среды.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ FWZZ- FWZZ-2026-0050.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Guglielmi A.V., Zotov O.D., Zavyalov A.D., Klain B.I. On proper time of the source of a strong earthquake. // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2023. – 14(3):0701.
2. Kuchay O.A., Bushenkova N.A. Relationship of seismic processes with the P-wave velocity field // *Russian Geology and Geophysics*. – 2025. – Vol. 66, No 8. – P. 1031-1041.
3. Rebetsky Yu.L., Polets A.Yu. 2014. The state of stresses of the lithosphere in Japan before the catastrophic Tohoku earthquake of 11 March 2011 // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2014. – Vol. 5, No 2. – P. 469-506.
4. Tikhotsky S.A., Tatevosyan R.E., Rebetsky Yu.L., Ovsyuchenko A.N., Larkov A.S. The 2023 Kahramanmaraş Earthquakes in Turkey: Seismic Movements along Conjugated Faults // *Doklady Earth Sciences*. – 2023. – Vol. 511. – P. 703-709.
5. Sun J.B., Xu X.W., Shen Z.K., Shi Y.-L., Liang F. Parameter inversion of the 1997 mani earthquake from insar co-seismic deformation field based on linear elastic dislocation model– i. uniform slip inversion//*Chinese Journal of Geophysics*. – 2007. – Vol.50, No.4. – P. 947-962
6. Hartog J.R. and Schwartz S. Y. Directivity analysis of the December 28, 1994 Sanriku-oki earthquake (Mw = 7.7), Japan// *Geophysical Research Letters*. – 1996. – Vol. 23, No. 1. – P. 2037-2040.
7. Баранов С.В., Шебалин П.Н. Оценивание области афтершоковой активности по информации об основном толчке // *Геофизические исследования*. – 2018. – Т. 19(2). – С. 34-56,
8. Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2017. – Т. 8(4). – С. 711-736.
9. Гольдин С.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Филина А.Г., Еманов А.А., Новиков И.С., Высоцкий Е.М., Фатеев А.В., Колесников Ю.И., Подкорытова В.Г., Лескова Е.В., Ярыгина М.А. Чуйское землетрясение и его афтершоки // *Доклады РАН*. – 2004. – Т. 395(4). – С. 534-536.
10. Завьялов А.Д., Зотов О.Д. Новый способ определения характерного размера очаговой зоны // *Вулканология и сейсмология*. – 2021. – № 1. – С. 22-29.
11. Кучай О.А., Мельник Е.А. Сильнейшие землетрясения Центральной Азии и их афтершоковые серии // *Геофизические технологии*. – 2026. – №. 1.
12. Лукк А.А., Дещеревский А.В. Колебательный режим афтершоков Джиргатальского землетрясения 1984 г. - проявление внутренней динамики неустойчивой геологической системы // *Физика Земли*. – 2006. – № 1. – С. 16-29.
13. Лутиков А.И., Донцова С.Н., Родина С.Н. Временные и энергетические параметры афтершокового процесса землетрясений Кавказа и сопредельных территорий // *Геофизические исследования*. – 2017. – Т. 18 (1). – С. 20-36.
14. Лутиков А.И., Родина С.Н. Временные и энергетические параметры афтершокового процесса Курило-Камчатских землетрясений // *Геофизические исследования*. – 2013. – Т. 14 (4). – С. 23-35.
15. Осокина Д.Н., Цветкова Н.Ю. Перестройка тектонического поля напряжений в очагах землетрясений и в окрестностях систем тектонических разрывов. // *Физические процессы в очагах землетрясений*: М. Наука 1980, с.187-206.

16. Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В. Поле напряжений до Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004. Модель метастабильного состояния горных пород // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47(11). – С. 1192-1206.
17. Родкин М.В. Типовая фор- и афтершоковая аномалия – эмпирика, интерпретация // Вулканология и сейсмология. – 2020. – Т. 1. – С. 64-76.
18. Шебалин П.Н., Баранов С.В. Дзедобоев Б.А. Закон повторяемости количества афтершоков // Доклады РАН. – 2018. – Т. 481(3). – С. 320-323.

© О. А. Кучай, Е. А. Мельник, 2026

И. В. Михайлов¹✉, М. И. Энов¹, И. В. Суродина¹, М. Н. Никитенко¹

Электрокаротажные системы с тороидальными катушками для определения УЭС керна в процессе бурения: обоснование двумерным численным моделированием

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Для актуальной задачи электрокаротажа в процессе колонкового бурения выполнено двумерное численное моделирование реальной и мнимой составляющих вертикальной компоненты электрического поля и тангенциальной компоненты магнитного поля для практически значимого диапазона УЭС керна из терригенных коллекторов. Образец только что выбуренного керна находится в изолирующей или сильнопроводящей трубе с тороидальными катушками внутри ферромагнитного стального корпуса керноприёмника. По результатам численного моделирования выбраны оптимальные длины измерительных систем, а также операционные частоты и типы измеряемых сигналов. Предложены взаимно-однозначные трансформации последних в значения кажущихся УЭС вертикально-неоднородных керновых образцов.

Ключевые слова: тороидальная катушка, колонковое бурение, электрокаротаж, конечно-разностное моделирование, двумерная модель, трансформация сигнала

I. V. Mikhaylov¹✉, M. I. Epov¹, I. V. Surodina¹, M. N. Nikitenko¹

Resistivity logging systems with toroidal coils for determining core resistivity while drilling: substantiation through 2D numerical modeling

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru

Abstract. With regard to a topical problem of resistivity logging while core drilling, we performed 2D numerical modeling of the real and imaginary parts of the electric field vertical component and magnetic field tangential component for a relevant range of core resistivities typical of terrigenous reservoirs. A freshly drilled core sample is contained in an insulating or highly conductive pipe with toroidal coils inside a ferromagnetic steel core barrel. Based on the numerical modeling results, we selected the optimal lengths of the measuring systems, as well as the operating frequencies and measured signal types. One-to-one transforms of the latter into apparent resistivity values for vertically inhomogeneous core samples were proposed.

Keywords: toroidal coil, core drilling, resistivity logging, finite-difference modeling, two-dimensional model, signal transform

Введение

В мировой практике для лабораторных петрофизических исследований кернов применяются различные методы и подходы. Одно из наиболее развивающихся

направлений связано с цифровыми кернами на основе методов сканирующей электронной микроскопии и рентгеновской микротомографии [1, 2, 3]. Неизменно сопоставляются разномасштабные каротажные и керновые данные [4]. Стоит отдельно отметить группу методов электрометрии, которые являются основными для последующей оценки коэффициента нефтегазонасыщения горных пород [5, 6].

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) керна может определяться как многочастотными электродными системами, так и индукционными с соленоидальными катушками. Однако научно-прикладным потенциалом для изучения пространственного распределения УЭС в керне обладают и другие подходы: например, с использованием тороидальных катушек [7].

Источник поля в виде тороидальной катушки можно математически описать сторонним круговым магнитным гармоническим током [8]. Разработан и верифицирован алгоритм двумерного конечно-разностного моделирования электрических и магнитных сигналов от стороннего кругового тока, эквивалентного тороидальной катушке [7]. Относительная погрешность двумерного моделирования не превышает 1.5% в целевом диапазоне УЭС керна из терригенных коллекторов.

Как известно, в процессе извлечения керна и при его последующей доставке в петрофизическую лабораторию с ним неизбежно происходят изменения, порою необратимые. В связи с этим, на сегодняшний день значительный интерес представляет подход, обеспечивающий оценку петрофизических характеристик керна непосредственно в процессе колонкового бурения.

Для решения такой задачи выполняется двумерное численное моделирование сигналов тороидальной катушки для практически значимого диапазона УЭС керна, когда только что выбуренный образец находится в изолирующей или сильнопроводящей трубе с тороидальными катушками внутри ферромагнитного стального корпуса керноприёмника. На основе численного моделирования выбираются оптимальные длины измерительных систем, а также операционные частоты и типы измеряемых сигналов. Предлагаются трансформации последних в значения кажущихся УЭС вертикально-неоднородных образцов.

Геоэлектрическая модель каротажа в процессе отбора керна

Рассматривается геоэлектрическая модель отбора керна при колонковом бурении (рис. 1). Цилиндрическая колонка керна радиуса r_0 и длины L расположена осесимметрично внутри трубы, в которую стационарно вмонтированы генераторная (Г) и измерительная (И) тороидальные катушки. Вся система размещена внутри ферромагнитного стального корпуса керноприёмника; между трубой с тороидами и корпусом циркулирует буровой раствор. Внутри керноприёмника, вокруг и снизу него расположена электропроводящая геологическая среда. Концентрические цилиндрические слои вокруг керна ограничены снизу на уровне $z = 0$ м и имеют значительную протяжённость для глубин $z > 0$ м. Колонка керна поступает в керноприёмник и перемещается относительно трубы с измерительной системой на глубинах $z > 0$ м. Измерительная тороидальная катушка размещена на фиксированном расстоянии от нижней грани керноприёмника ($z = 0$ м);

расстояние между генераторной и измерительной катушкой (длина зонда) варьируется.

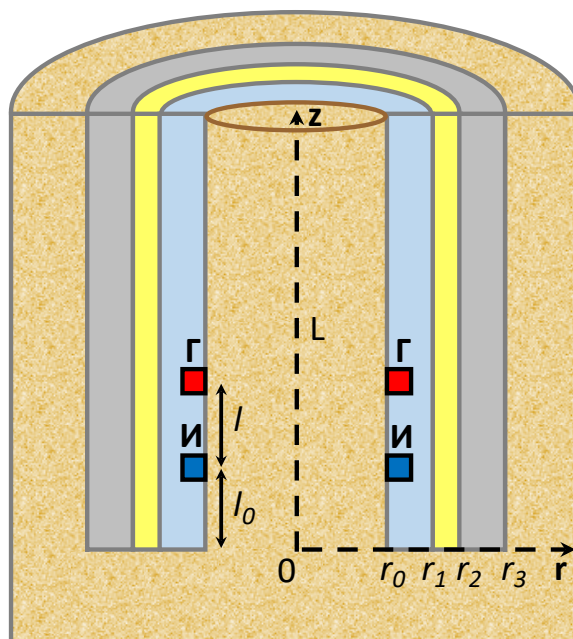


Рис. 1. Геоэлектрическая модель каротажа в процессе отбора керна: керна (коричневый цвет) и измерительный зонд, состоящий из генераторной (красный) и измерительной (синий) тороидальных катушек внутри трубы (голубой). Система заключена в ферромагнитный стальной корпус кернаприёмника (серый); между корпусом и трубой циркулирует буровой раствор (жёлтый). В модели не учтена режущая часть кернаотборного долота

Методом конечных разностей в двумерной постановке моделируются реальная и мнимая составляющие вертикальной компоненты электрического поля E_z и тангенциальной компоненты магнитного поля H_φ .

Профилирование протяжённого однородного изотропного керна в стеклопластиковой трубе

Рассматривается случай, когда геологическая среда вокруг корпуса кернаприёмника характеризуется одинаковым значением УЭС $15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, что соответствует нефтенасыщенному песчанику. Высота колонки однородного керна увеличивается с шагом 0.01 м .

Трансформации сигналов $\text{Im } H_\varphi$ в кажущиеся УЭС при электропрофилеировании выбуриваемого керна показаны на рис. 2. Начальная точка на оси ординат соответствует положению верхней границы керна на глубине $z = 0 \text{ м}$ (расстояние от измерительной катушки $l_0 = 0.10 \text{ м}$). Пунктирными линиями показаны две асимптоты: серая характеризует УЭС бурового раствора $2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а чёрная – УЭС керна $15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

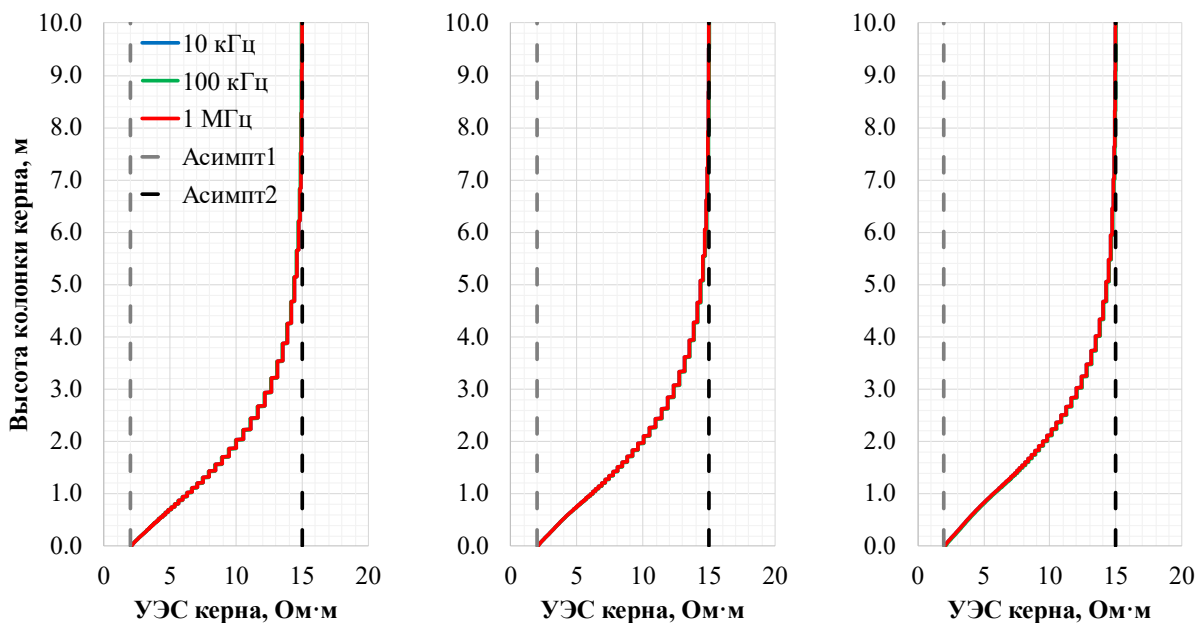


Рис. 2. Кажущиеся УЭС по $\text{Im } H_\varphi$ при профилировании протяжённого однородного керна нефтенасыщенного песчаника с УЭС 15 Ом·м.
Тороидальные катушки в стеклопластиковой трубе.
Длина зонда: 0.10 м (слева), 0.50 м (по центру), 0.90 м (справа)

В начальный момент отбора керна регистрируемые отклики тороидальной катушки в значительной степени определяются буровым раствором. По мере увеличения длины цилиндрического керна, буровой раствор влияет всё меньше; в конечном счёте, сигналы выходят на асимптоту, соответствующую керну. Частотная зависимость трансформаций $\text{Im } H_\varphi$ отсутствует при любом УЭС керна в диапазоне 2–200 Ом·м. По сравнению с $\text{Re } H_\varphi$, $\text{Im } H_\varphi$ – более локальный сигнал; асимптотическое значение достигается для разных длин зонда быстрее.

Профилирование протяжённого однородного изотропного керна в металлической немагнитной трубе

Представлен аналогичный случай, при этом тороидальные катушки смонтированы в металлической немагнитной трубе. Анализируется сигнал $\text{Im } H_\varphi$ при компактной длине зонда 0.10 м. УЭС однородного керна 3, 15 и 120 Ом·м, что характерно для водо-, нефте- и газонасыщенного песчаника (рис. 3).

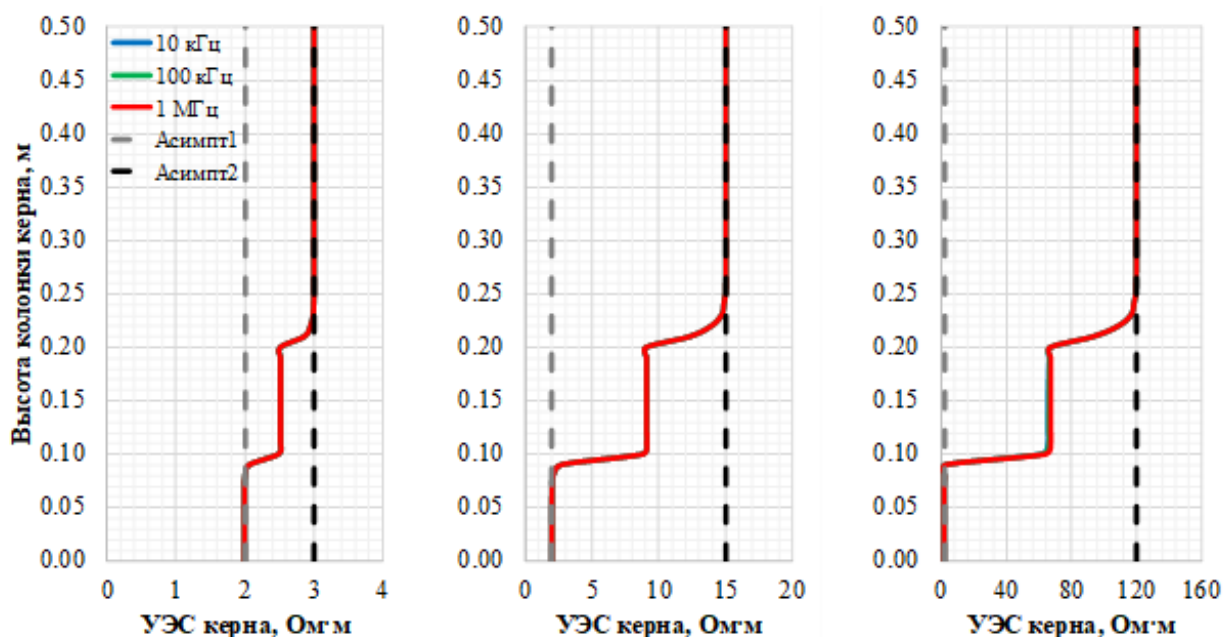


Рис. 3. Кажущиеся УЭС по $\text{Im } H_\phi$ при профилировании протяжённого однородного керна. Тороидальные катушки в металлической немагнитной трубе. Длина зонда 0.10 м. УЭС керна: 3 Ом·м (слева), 15 Ом·м (по центру), 120 Ом·м (справа)

Отмечается очень высокая локальность сигнала $\text{Im } H_\phi$ и его трансформаций. Так, асимптотическое значение, соответствующее УЭС керна, достигается на малом расстоянии 0.23 м от начала отбора керна ($z = 0$ м). Особенности диаграмм на глубинах $z = 0.10$ и 0.20 м характеризуют последовательный переход наращиваемой колонки керна через измерительную и генераторную тороидальную катушку. Таким образом, выход на асимптоту происходит практически мгновенно – на 0.03 м выше положения генераторной катушки.

Результаты

Из анализа результатов численного моделирования следует, что электрокаротаж в процессе отбора керна возможен как с использованием стеклопластиковой трубы (короткие и длинные зонды, реальная и мнимая составляющие тангенциальной компоненты магнитного поля), так и металлической немагнитной трубы (короткий зонд, мнимая составляющая тангенциальной компоненты магнитного поля). Оптимальный диапазон операционных частот – от 10 кГц до 1 МГц. Для однородных кернов построены взаимно-однозначные трансформации сигналов в кажущиеся УЭС. С использованием трансформаций получены достоверные распределения УЭС при профилировании однородных и вертикально-неоднородных кернов внутри кернаприёмника. Тороидальные катушки на металлической немагнитной трубе обеспечивают повышенные локальность измерений и достоверность кажущихся УЭС вдоль керна.

Заключение

Двумерным численным моделированием обоснованы скважинные системы с генераторной и измерительной тороидальными катушками для электрокаротажа в процессе отбора цилиндрического керна при колонковом бурении. Рассмотрено два случая: в первом тороидальные катушки расположены в изолирующей стеклопластиковой трубе вокруг керна, а во втором – в металлической сильнопроводящей немагнитной трубе. КERN и зонды находятся внутри ферромагнитного стального корпуса керноприёмника. Предложенные взаимно-однозначные трансформации сигналов тороидальной катушки позволяют в реальном времени оценивать УЭС вертикально-неоднородных выбуриваемых кернов, включая маломощные с переменным флюидонасыщением и тонкослоистые (макроанизотропные).

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2026-0049 «Электродинамика многомасштабной геологической среды как основа наукоёмких технологий в нефтяной и рудной геологоразведке и инженерной геологии в Сибири и Арктической зоне РФ».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pang M., Balcewicz M., Ba J., Carcione J.M., Siegert M., Saenger E.H. Acoustical-electrical models of tight rocks based on digital rock physics and double-porosity theory // *Geoenergy Science and Engineering*. – 2024. – V. 235. – Paper 212634. – P. 1–21.
2. Иванов Е.Н., Коробков Д.А., Стукан М.Р. Влияние параметров течения реакционного флюида на скорость растворения породы коллектора // *Георесурсы*. – 2025. – Т. 27. – № 2. – С. 206–215.
3. Закиров Т.Р., Хаюзкин А.С., Маннапова Л.М., Елизаров А.М. Влияние фильтрационно-емкостных свойств природных терригенных пород-коллекторов на эффективность нефтевытеснения при различной минерализации пластовой воды // *Георесурсы*. – 2026. – Т. 28. – № 1. – С. 54–64.
4. Morales M.M., Raheem O., Pyrcz M.J., Torres-Verdin C. Anisotropic resistivity inversion and multiple core data assimilation using physics-guided neural network for improved petrophysical interpretation and uncertainty quantification // *Computers & Geosciences*. – 2026. – V. 212. – Paper 106167. – P. 1–17.
5. Mirza D., Birkeland K., Øy L., Chemali R., Barrouillet B. Core Scanner for Electrical Profiling of Full-Bore Cores at the Well Site with Advanced Pulse Electromagnetic Technology // *The SPWLA 65th Annual Logging Symposium (Rio de Janeiro, Brazil)*. – 2024. – Paper SPWLA-2024-0098. – P. 1–13.
6. Ran Q, Lai Q, Zhang B, Wu Y, Tang J, Wu Z. Surface Resistivity Imaging for Drilling Columnar Cores // *Symmetry*. – 2025. – V. 17. – No. 8. – Paper 1238. – P. 1–16.
7. Эпов М.И., Мамяшев В.Г., Михайлов И.В., Суродина И.В., Никитенко М.Н. Определение удельного электрического сопротивления керна с помощью тороидальных катушек: математическое моделирование // *Георесурсы*. – 2024. – Т. 26. – № 3. – С. 151–161.
8. Светов Б.С. Основы геоэлектрики. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 656 с.

© И. В. Михайлов, М. И. Эпов, И. В. Суродина, М. Н. Никитенко, 2026

Д. А. Неклюдов¹✉

Повышение качества данных до суммирования на основе частотно-временных масок в области комплексных вейвлетов

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: neklyudovda@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Сейсмические данные, полученные в условиях сложноустроенной верхней части разреза (ВЧР), зачастую характеризуются крайне низким отношением сигнал/шум. Традиционные процедуры локального суммирования, применяемые для подавления помех, приводят к существенной потере высокочастотной составляющей сигнала. В данной работе предложен метод коррекции амплитудных и фазовых спектров исходных данных в области комплексного вейвлет-преобразования. Предложенный подход позволяет сохранить полный частотный состав полезного сигнала, одновременно повышая когерентность целевых отражающих горизонтов.

Ключевые слова: локальное суммирование, комплексные вейвлеты, сейсморазведка

D. A. Neklyudov¹✉

Prestack data enhancement using time-frequency masks in the complex wavelet domain

¹Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: neklyudovda@ipgg.sbras.ru

Abstract. Seismic data acquired in the complex environments are often very challenging for processing. Although data enhancement procedures based on local stacking mitigate the effects of noise, they result in a significant loss of higher frequencies. We propose a method to correct phase and amplitude spectra of original data in the complex wavelet domain. As a result, the full frequency content remains intact and the coherence of desired reflected events is enhanced.

Keywords: local stacking, complex wavelet transform, seismic exploration

Введение

Данные современной наземной сейсморазведки, регистрируемые одиночными датчиками или малыми группами, нуждаются в существенной предварительной обработке для повышения отношения сигнал/помеха перед переходом к основным процедурам графа обработки, таким как деконволюция и коррекция статики. Эффективным инструментом выделения и усиления слабых когерентных сигналов отраженных волн в сейсмических данных является локальное многомерное суммирование. К настоящему времени разработано множество алгоритмов, базирующихся на этом принципе, например, [1], а также подходы, использующие концепции общей отражающей поверхности (CRS) [2] и мультифокусинга [3]. Все указанные методы, по сути, являются модификациями метода регулируемого направленного

приема (РПП). В их основе лежит введение временных сдвигов в локальных выборках трасс с последующим суммированием, результатом которого является «усиленная» трасса, приписанная к центру апертуры выборки. В данной работе для построения усиленных трасс применяется нелинейный бимформинг (non-linear beamforming, NLBF). Эффективность этого подхода при обработке сложных данных наземной сейсморазведки была продемонстрирована ранее [1]. Несмотря на то, что масштабированное локальное суммирование трасс вдоль оцененных локальных годографов отраженных волн позволяет успешно выделять сигналы на фоне интенсивных помех, результаты такой обработки подвержены нежелательным побочным эффектам: 1) Происходит существенное осреднение исходных амплитуд, 2) Подавляются высокочастотные составляющие спектра из-за неоптимального суммирования. В то же время было показано [4], что бимформинг позволяет получить надежную оценку фазовых спектров (времен вступлений) полезных сигналов. Для сохранения частотных характеристик был предложен метод замещения фаз [5], основанный на комбинировании фазовых спектров трасс после бимформинга с амплитудными спектрами исходных трасс в частотно-временной (TF) области. Такой подход полностью сохраняет исходный частотный состав исходных данных, однако оставляет шум, содержащийся в амплитудном спектре, что при наличии интенсивных помех препятствует достижению необходимого качества данных. В работе [6] было предложено использовать амплитудные частотно-временные маски, как одно из возможных решений этой проблемы. При этом был адаптирован для применения к сейсмическим данным метод минимальной статистики (MS). Частотно-временные маски и MS широко применяются в области обработки речи. Ключевой момент состоит в том, что данные после бимформинга служат исходной моделью сигнала – фаза и оценка снизу амплитудного спектра полезного сигнала, которая в дальнейшем уточняется для получения более достоверной оценки характеристик реального сигнала. В данной работе представлен усовершенствованный подход, развивающий идею комбинирования спектральных характеристик в области комплексного вейвлет-преобразования с предварительной коррекцией фаз на основе фазового фильтра приведения [7].

Метод: коррекция фаз фазовым фильтром приведения + частотно-временные маски в области комплексных вейвлетов.

Ниже приведено детальное описание предлагаемого подхода. Входными данными процедуры являются два набора сейсмических трасс: исходные $x(t)$ и усиленные (после бимформинга) $s(t)$. Обработка выполняется в потрассовом режиме. Каждой исходной трассе соответствует усиленная трасса с идентичными атрибутами (координатами и др.). Задача состоит в извлечении полезного сигнала из исходных данных, при этом результат бимформинга используется в качестве априорной оценки искомого сигнала.

Первый этап – корректировка фаз исходных данных на основе фазового фильтра приведения. Усиленная трасса является эталоном (пилотной трассой), к которому приводится соответствующая ей трасса исходного набора данных.

1. В скользящих временных окнах длиной 300-400 мс вычисляется функция взаимной корреляции (ФВК) двух трасс $CCF = x(t) * s(t)$. Длина расчета ФВК является важным входным параметром (по умолчанию ~50-100 мс).

2. От каждого временного окна и соответствующей ФВК берется преобразование Фурье. Фазовая компонента ФВК имеет вид $Phase = \exp[i\{\varphi_s(\omega) - \varphi_x(\omega)\}]$. Где $\varphi_s(\omega)$ и $\varphi_x(\omega)$ – фазовые спектры усиленной и исходной трассы (окна).

3. Абсолютный спектр $|X(\omega)|$ окна исходной трассы сглаживается фильтром Савицкого — Голея [8].

4. К фурье-образу окна исходной трассы (со сглаженным абс. спектром) применяется фазовый фильтр приведения $Phase = \exp[i\{\varphi_s(\omega) - \varphi_x(\omega)\}]$. При этом происходит приведение фазы исходной трассы к фазе эталонной трассы. Очевидно, что при использовании ФВК, рассчитанной по всему временному окну, это процедура сводится в фазовой подстановке, т.е. замене фазового спектра исходной трассы на фазовый спектр эталона. Зачастую такая замена может оказаться слишком радикальной, поэтому длину расчета ФВК рекомендуется ограничивать.

5. Выполняется обратное преобразование Фурье от приведенной трассы (окна). Процедура повторяется для всех перекрывающихся временных окон. В результате получается скорректированная по фазе исходная трасса $\tilde{x}(t)$. Отметим, что ее амплитудный спектр сохранен.

Второй этап – очистка от помех абсолютного спектра $\tilde{x}(t)$ в области комплексных вейвлетов. Наша конечная цель на этом этапе построить частотно-временную маску (фильтр).

Частотно-временные маски (TFM) широко применяются в области обработки речи для одноканального выделения полезного сигнала из шума. Изначально они были введены в области оконного преобразования Фурье (STFT), но в настоящее время широко применяются и в области вейвлет-преобразований. Общая идея остается неизменной. TFM позволяет получить оценку спектра целевого сигнала $S(k, l)$ в частотно-временной области путем поэлементного перемножения

$$\hat{S}(k, l) = M(k, l) \cdot X(k, l). \quad (1)$$

где фильтр $M(k, l)$, как правило, представляет собой вещественную функцию, принимающую значения в диапазоне $0 \leq M(k, l) \leq 1$. Традиционно маска $M(k, l)$ строится исходя из соотношения сигнал/шум: значения $M(k, l)$ близки к единице в областях доминирования полезного сигнала и стремятся к нулю в зонах преобладания помех. Такие маски принято называть «амплитудными». Одной из наиболее распространенных «мягких» масок является так называемая идеальная рациональная маска (Ideal Ratio Mask, IRM):

$$IRM(k, l) = \sqrt{\frac{|S_{est}(k, l)|^2}{|S_{est}(k, l)|^2 + |N_{est}(k, l)|^2}}, \quad (2)$$

где $|S_{est}(k, l)|^2$ and $|N_{est}(k, l)|^2$ оценки энергетических спектров полезного сигнала и шума соответственно. Для построения IRM необходимо предварительно оценить мощности сигнала и помехи. В задачах обработки речи за последние десятилетия разработано множество подобных алгоритмов. Одним из наиболее востребованных является метод минимальной статистики (minimal statistics, MS), предложенный в работах [9,10] и развитый в [11] и множестве других.

6. К скорректированной по фазе трассе $\tilde{x}(t)$ и усиленной трассе $s(t)$ применяется непрерывное вейвлет-преобразование (CWT). В результате формируются два комплексных спектра $X(k, l)$, $S(k, l)$, где индекс k соответствует масштабу вейвлета, а индекс l — временному сдвигу (положению вейвлета на временной оси)

7. Оценка энергетического спектра остаточной компоненты $|R(k, l)|^2$ вычисляется методом спектрального вычитания в области комплексных вейвлет-коэффициентов $|R(k, l)|^2 = |X(k, l)|^2 - |S(k, l)|^2$.

8. Для оценки энергетического спектра шума $|N_{est}(k, l)|^2$ к остаточной компоненте $|R(k, l)|^2$ применяется метод минимальной статистики (MS). Данная процедура выполняется независимо для каждого масштаба вейвлета k .

9. Повторная оценка энергетического спектра сигнала методом спектрального вычитания $|\check{S}_{est}(k, l)|^2 = |X(k, l)|^2 - |N_{est}(k, l)|^2$.

10. Расчет маски IRM по формуле (2) с использованием полученных оценок энергетических спектров сигнала и шума $|S_{est}(k, l)|^2$ and $|N_{est}(k, l)|^2$. Фильтрация спектра исходной трассы путем наложения маски IRM (выражение (1)).

11. Дополнительно подавление аддитивного шума методом мягкого порогового ограничения (soft thresholding) вейвлет-коэффициентов [12].

12. Восстановление отфильтрованной трассы с помощью обратного непрерывного вейвлет-преобразования (ICWT), $\hat{s}(t) = ICWT[\hat{S}(k, l)]$.

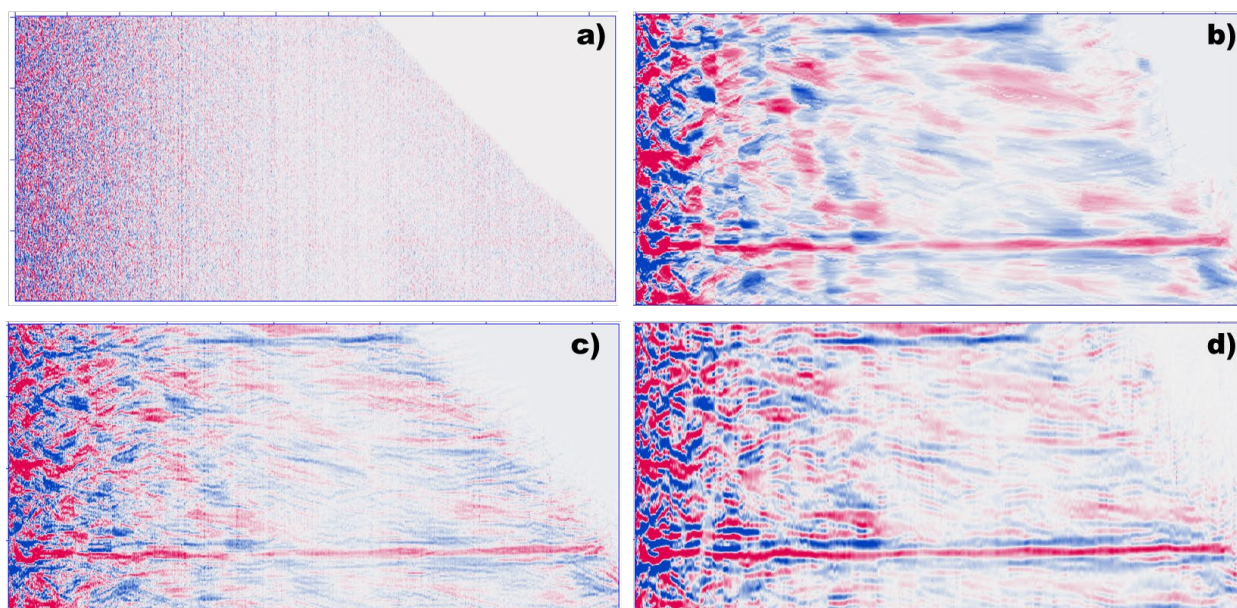


Рис. 1. (а) Исходные данные (фрагмент сейсмограммы ОСТ после NMO); (б) Данные после усиления на основе локального суммирования; (с) данные после применения STFMv1; (д) данные после применения STFMv3 (предлагаемый здесь подход).

Результаты

В данном примере проводится результат применения предложенного подхода на сейсмический данных, зарегистрированных для одиночного датчика (Рис. 1а). Представленный набор данных является весьма сложным, поскольку видимые отражения отсутствуют даже после интенсивной обработки. Для выделения полезного сигнала мы применили нелинейный бимформинг (NLBF) в области "ОГТ—вынос" (Рис.1б). Апертура суммирования составила 100x100 м. Каждая усиленная трасса является результатом суммирования примерно 800 исходных трасс. Локальное суммирование приводит к смещению амплитудного спектра вниз со значительной потерей высоких частот (Рис.2). Для корректировки данных бимформинга мы применили два подхода. Первый (обозначен на рисунках как STFMv1) был предложен ранее [6]. Результат, полученный с помощью описанного в данной работе подхода обозначен как STFMv3. Здесь была выполнена дополнительная фильтрация аддитивного шума с помощью мягкого порогового ограничения вейвлет-коэффициентов. В данном примере это привело к подавлению частот выше 45 Гц, так как отношение сигнал/шум в этом диапазоне оказалось слишком низким. Сравнение временных разрезов ОГТ, полученных по обработанным данным, представлено на Рис.3. Предложенный подход демонстрирует лучшие результаты в сравнении с первой версией, что наглядно подтверждается приведенными разрезами.

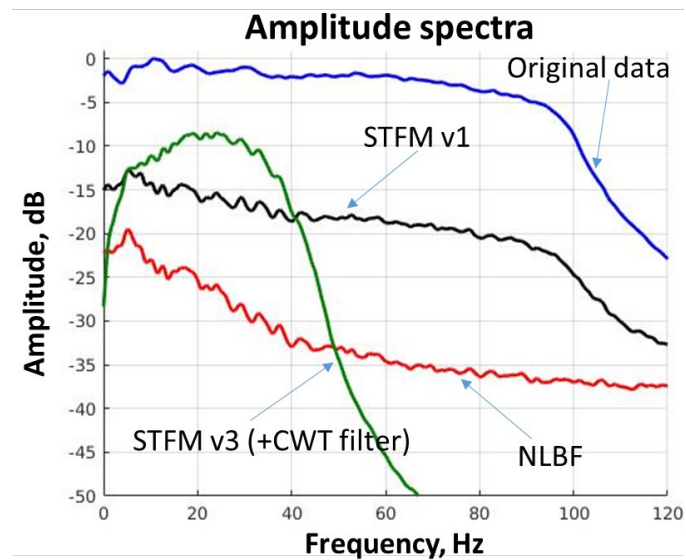


Рис. 2. Усредненные амплитудные спектры данных с Рис.1.

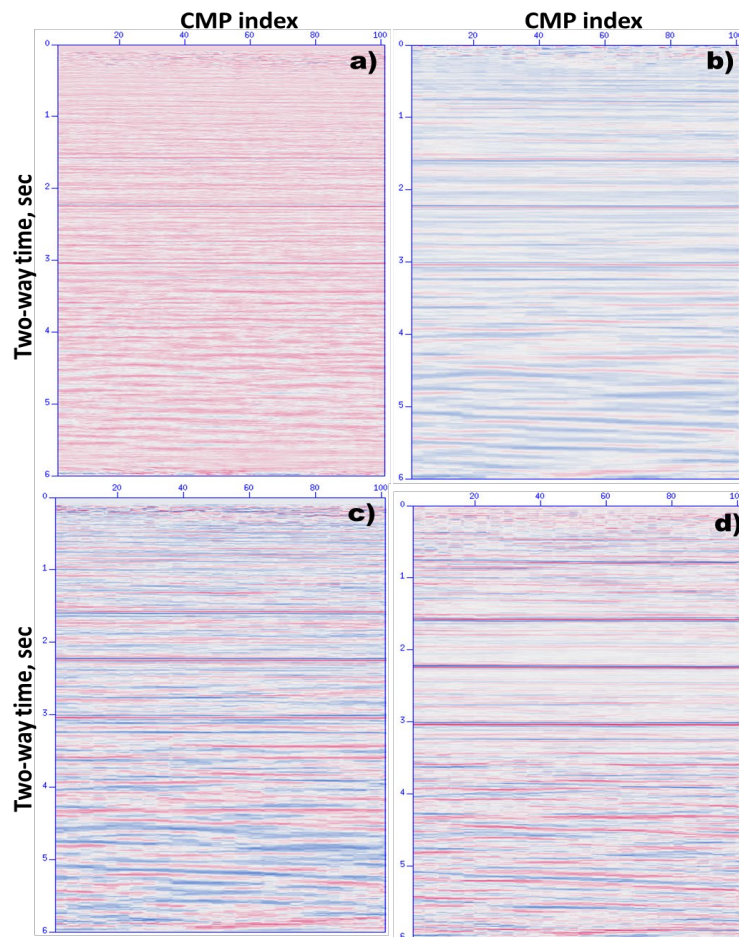


Рис. 3. Фрагменты временных разрезов ОГТ (для визуализации применена автоматическая регулировка усиления (APY) во временном окне 2 с), построенных: (а) по исходным данным; (б) по данным после локального суммирования; (с) после применения STFMv1; (д) после применения STFMv3 (предлагаемый здесь подход).

Заключение

В работе представлен метод коррекции амплитудных и фазовых характеристик сейсмических записей, обладающий достаточной эффективностью для обработки сложных данных наземной сейсморазведки и позволяющий при этом сохранять высокочастотный состав сигнала. Метод основан на использовании локального суммирования трасс для выделения скрытых вступлений отраженных волн. Полученные таким образом данные служат априорной моделью полезного сигнала, на основе которой выполняется коррекция исходных записей с помощью частотно-временных масок в области комплексных вейвлетов. Подчеркивается, что применение адаптивных частотно-зависимых фазовых поправок является критически важным условием для восстановления когерентности отражений. Для подавления аддитивных помех предложены амплитудные маски (TFM), которые строятся на базе результатов бимформинга. Это позволяет избирательно подавлять шум в зонах его доминирования, не искажая при этом области с преобладанием полезного сигнала. Для расчета амплитудной составляющей TFM адаптирован метод минимальной статистики, заимствованный из области обработки речевых сигналов; он обеспечивает достоверную оценку энергетического спектра шума. Эффективность предложенного подхода подтверждена на реальных данных.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания FWZZ-2026-0050.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bakulin A., Silvestrov I., Dmitriev M., Neklyudov D., Protasov M., Gadylshin K., Dolgov V. Nonlinear beamforming for enhancement of 3D prestack land seismic data // *Geophysics*. – 2020. – Vol. 85, № 3. – P. V283–V296.
2. Buzlukov V., Landa E. Imaging improvement by prestack signal enhancement // *Geophysical Prospecting*. – 2013. – Vol. 61. – P. 1150–1158.
3. Curia D., Borghi P., Noble J., Berkovitch A., Justo D., Alayón M. The impact of multifocusing in the processing of land 3D seismic data in a fold and thrust belt setting: Ranquil Norte Block, Neuquén Basin, Argentina // *The Leading Edge*. – 2017. – Vol. 36. – P. 770–774.
4. Bakulin A., Neklyudov D., Silvestrov I. Multiplicative seismic noise caused by small-scale near-surface scattering and its transformation during stacking // *Geophysics*. – 2022. – Vol. 87, № 5. – P. V419–V435.
5. Bakulin A., Neklyudov D., Silvestrov I. Prestack data enhancement with phase corrections in time-frequency domain guided by local multidimensional stacking // *Geophysical Prospecting*. – 2020. – Vol. 68. – P. 1811–1818.
6. Bakulin A., Neklyudov D., Silvestrov I. Seismic time-frequency masking for suppression of seismic speckle noise // *Geophysics*. – 2023. – Vol. 88, № 5. – P. V371–V385.
7. Каныгин М. Ю., Петрова Н. В. Согласование фазовых спектров сигналов при формировании обобщенных сейсмических проектов // *Технологии сейсморазведки*. – 2009. – № 1. – С. 56–59.
8. Savitzky A., Golay M. J. E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures // *Analytical Chemistry*. – 1964. – Vol. 36, № 8. – P. 1627–1639.
9. Martin R. Spectral subtraction based on minimum statistics // *Proc. 7th Eur. Signal Processing Conf. (EUSIPCO'94)*. – Edinburgh, UK, 1994. – P. 1182–1185.

10. Martin R. Noise power spectral density estimation based on optimal smoothing and minimum statistics // IEEE Transaction on Speech and Audio Processing. – 2001. – Vol. 9. – P. 504–512.
11. Dobliger G. Computationally efficient speech enhancement by spectral minima tracking in subbands // Proc. 4th Eur. Conf. speech, Communication, and Technology, EUROSPEECH'95. – Madrid, Spain, 1995. – P. 1513–1516.
12. Ergen B. Signal and Image Denoising Using Wavelet Transform in Advances // Wavelet Theory and Their Applications in Engineering, Physics and Technology. – 2012. – DOI: 10.5772/36434.

© Д. А. Неклюдов, 2026

М. А. Новиков^{1✉}, В. В. Лисица¹

Численное решение параболического уравнения с использованием разложения матричной экспоненты по полиномам Чебышева в задачах моделирования физических процессов в многомасштабных средах

¹Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: m.a.novikov@math.nsc.ru

Аннотация. Многие физические процессы описываются уравнениями параболического типа. К примеру, распространение тепла в сплошной среде и квазистатические процессы в рамках теории упругости и ее модификаций (включая пороупругость) описываются такими моделями. Стандартный конечно-разностный подход в соответствующих задачах во временной области зачастую требует малого шага по времени, что приводит к существенным вычислительным затратам. В данной статье предлагается альтернативный подход к численному решению параболических задач с использованием полиномов Чебышева. В частности, дифференциальное уравнение в частных производных параболического типа вначале пространственной дискретизацией сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений по времени. В полученной задаче явное решение состоит из двух компонент, зависящих от матричной экспоненты, начальных условий и внешних источников. Численный метод основывается на приближении матричной экспоненты неполным разложением по матричным полиномам Чебышева с коэффициентами в форме модифицированных функций Бесселя первого рода. В работе приведено указанное приближенное решение исходного уравнения, кратко описан процесс его вычисления и предложен критерий остановки на основе необходимого числа первых слагаемых разложений обеих частей решения. На примере одномерной задачи теплопроводности выполнена верификация численного алгоритма сравнением с результатами использования классической явной конечно-разностной схемы. Кроме того, выполнено сравнение вычислительных затрат двух подходов на примере числа условных операций умножения матрицы на вектор.

Ключевые слова: теплопроводность, пороупругость, параболические уравнения, полиномы Чебышева

M. A. Novikov^{1✉}, V. V. Lisitsa¹

Numerical solution of the parabolic equation using Chebyshev polynomial decomposition for the matrix exponent for the modeling of physical phenomena in multi-scale media

¹Sobolev Institute of Mathematics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: m.a.novikov@math.nsc.ru

Abstract. Many physical phenomena are described by parabolic equations. Such cases include heat transport problems and also quasi-static processes within the theory of elasticity and its modifications including poroelasticity. Classical finite-difference approach in such problems usually requires quite small time step, and this results in significant computational cost. In this paper we present alternative approach to numerical solution of parabolic problems using Chebyshev polynomials. In particular, parabolic PDE can be reduced to the system of time dependence ODEs by a spatial discretization of

the solution. For the latter one explicit solution is formulated in terms of the matrix exponent, initial condition and source terms. Numerical method is based on the matrix exponent approximation by its incomplete Chebyshev series expansion with the coefficients in the form of modified Besseli fucttions of first type. We derive this solution approximation, describe its computation process and discuss the stopping criterion for it via bumbers of series first terms applied. The verification of the corresponding algorithm is performed for the one-dimensional heat conduction problem by the comparison of the approximate solutions by considered method and the standart explicit finite-difference scheme. Finally, numerical cost for both approaches is considered to demonstrate the potential economy in the number of required matrix-vector multiplication operations.

Keywords: heat conduction, poroelasticity, parabolic equations, Chebyshev polynomials

Введение

Параболические уравнения возникают во многих прикладных задачах, при математическом моделировании физических процессов в сплошных средах. Наиболее известны среди них задачи теплопроводности [1]. Однако уравнения теории упругости в квазистатической постановке также обладают параболической структурой [2, 3]. В обоих случаях современные задачи требуют как детального описания среды, так и больших по размеру расчетных областей. Поэтому необходимо использование вычислительных сеток с большим числом узлов при применении конечно-разностных методов [2, 3], конечно-элементных аппроксимаций [4, 5] и других. Зачастую условия устойчивости накладывают жёсткие ограничения на шаг по времени, что приводит к необходимости выполнения большого числа шагов [6, 7]. Таким образом, одной из ключевых задач при разработке современных численных алгоритмов является снижение вычислительных затрат при решении крупномасштабных задач.

В задачах вычислительной пороупругости в последние десятилетия существенную роль играет квазистатическая постановка соответствующих уравнений. В частности, исследование влияния структуры пористых флюидонасыщенных сред на сейсмические характеристики (такие как скорости распространения и затухание сейсмических волн) часто основывается на квазистатическом моделировании. Подобные задачи возникают, например, при сейсмическом мониторинге коллекторов углеводородов и анализе изменений свойств пород многолетней мерзлоты. Такие задачи входят в рамки численного апскейлинга, где отклик среды на внешнее нагружение усредняется для получения эффективных оценок фазовых скоростей и коэффициентов затухания [2-5]. При этом для решения уравнений в частотной области для каждой частоты расчёты необходимо выполнять отдельно. Временная же область позволяет проводить универсальные вычисления с получением частотных характеристик преобразованием Фурье.

Для численного апскейлинга применяются различные модели пороупругих сред. К числу наиболее известных относится феноменологическая модель Био [8, 9] и её обобщения на случай многофазных флюидов [10, 11] и вязкоупругого скелета [12]. Известны и более строгие математические модели на основе термодинамически согласованных систем законов сохранения [13, 14]. В динамической постановке эти модели представляют гиперболические системы, а при

переходе к квазистатической постановке [2,3] во временной области приводятся к параболическим уравнениям. В связи с этим разработка эффективных численных методов решения параболических задач важна для исследования зависимости затухания и распространения сейсмических волн от свойств разномасштабных флюидонасыщенных сред (пористость, трещиноватость, насыщение и т.д.).

В статье представлен подход к решению начально-краевой задачи для параболического уравнения, основанный на разложении матричной экспоненты по полиномам Чебышёва [15, 16]. Исходная задача для уравнения в частных производных преобразуется в систему обыкновенных дифференциальных уравнений, для которой известно аналитическое решение. Основная идея подхода заключается в представлении матричной экспоненты в решении в виде ряда матричных полиномов Чебышёва. Разложение матричной экспоненты по полиномам Чебышёва включает в качестве коэффициентов модифицированные функции Бесселя первого рода. Для численного решения вычисляется конечное число членов ряда, что дает приближение аналитического решения. Выполнена верификация подхода для частного случая постоянных граничных условий в исходной задаче для уравнения в частных производных при отсутствии внешних источников.

Методы и материалы

Рассматривается простейшая постановка одномерной задачи теплопроводности – начально-краевая задача в области $(t, x) \in (0, T] \times (0, L)$ для параболического уравнения с постоянными коэффициентами:

$$\begin{cases} \frac{\partial u(t, x)}{\partial t} - \frac{\partial^2 u(t, x)}{\partial x^2} = f(t, x), & x \in (0, L), \quad t \in (0, T]; \\ u(0, x) = \phi(x), & x \in [0, L]; \\ u(t, 0) = u_l(t), & t \in (0, T]; \\ u(t, L) = u_r(t), & t \in (0, T]. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $u(t, x)$ – искомая функция (температура), начальные условия заданы в $t = 0$ функцией $\phi(x)$, а краевые условия на концах одномерной области $[0, L]$ заданы функциями $u_l(t)$ и $u_r(t)$. При пространственной дискретизации расчетной области и соответствующей аппроксимации второй производной по пространству центральной разностью уравнение (1) сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений вида:

$$\frac{\partial U(t)}{\partial t} + AU(t) = F(t), \quad t \in (0, T] \quad (2)$$

на вектор-функцию $U(t)$ значений поля $u(t, x)$ в узлах расчетной сетки, где матрица A при регулярной дискретизации постоянна, а вектор $F(t)$ в правой части образован узловыми значениями $f(t, x)$ и граничными условиями задачи (1). Известно, что решение системы (2) представимо в виде

$$U(t) = e^{-At}U_0 + \int_0^t e^{-A(t-s)}F(s) ds = e^{-At}U_0 + \int_0^t e^{-As}F(t-s) ds, \quad (3)$$

где вектор U_0 – вектор узловых значений функции начального условия $\phi(x)$ [17]. В обоих слагаемых решения присутствует матричная экспонента e^{-At} , при некотором приближении которой может быть приближено все решение. Поскольку зачастую (к примеру, в подзадачах численного апскейлинга [2,3]) граничные условия не зависят от времени, далее для упрощения рассматриваем $F(t) = F = const$. При этом вектор F выносится из интеграла во второе слагаемое.

Полиномы Чебышева обладают множеством важных свойств, обеспечивающих близкое к наилучшему приближение непрерывных функций (наименьшее отклонение от нуля на отрезке $[-1,1]$, наличие точек альтеранса и т.д.). С теоретическим обоснованием свойств полиномов Чебышева можно ознакомиться, к примеру, в книге [16]. Напомним, что полиномы Чебышева определяются рекурсивно следующим образом:

$$T_0(x) = 1, \quad T_1(x) = x, \quad T_k(x) = 2xT_{k-1}(x) - T_{k-2}(x), \quad k = 2, 3, \dots \quad (4)$$

Формулы (4) могут быть распространены на матричную переменную. Существуют различные формы чебышевских полиномов. В частности, на отрезке $[-1,1]$ справедливо представление $T_k(x) = \cos(n \arccos x)$.

Разложение матричной экспоненты по полиномам Чебышева может быть выражено через функции Бесселя первого рода $J_k(z)$ с целыми индексами [16]. В частности, с использованием функции Якоби-Ангера и связи функций Бесселя $J_k(iz) = i^k I_k(z)$ с модифицированными функциями Бесселя первого рода I_k на интервале $[-1,1]$ может быть получено выражение для $x, q \in \mathbb{R}$:

$$e^{q \cos t} = 2 \sum_{k=0}^{\infty} ' I_k(q) \cos t \xrightarrow{t=\arccos x} e^{qt} = 2 \sum_{k=0}^{\infty} ' I_k(q) T_k(x). \quad (5)$$

Здесь $\sum'$ означает суммирование, где при первом слагаемом стоит множитель $1/2$. Поскольку матрица A в системе (2) симметрична, матричный аналог разложения (5) полностью определяется этой скалярной функцией на собственных значениях матрицы $x = \lambda_i \in \text{Spec}(A)$. Для использования формулы (5) они должны располагаться в интервале $[-1,1]$. Поэтому вначале необходимо нормировать спектр матрицы заменой

$$\tilde{A} = I - 2 \frac{A - \lambda_{\min} I}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}. \quad (6)$$

Здесь $\lambda_{\min}$ и $\lambda_{\max}$ – наименьшее и наибольшее собственные значения матрицы A . С учетом этой замены справедливо разложение

$$e^{-At} = 2e^{-\lambda_+ t} \sum_{k=0}^{\infty} ' I_k(\lambda_- t) T_k(\tilde{A}), \quad (7)$$

где λ_- и λ_+ – полуразность и полусумма наибольшего и наименьшего собственных значений A . Для получения приближения решения (3) экспоненты в первом слагаемом и подынтегральном выражении второго слагаемого заменяются частичными суммами разложения (7):

$$\tilde{U} = 2e^{-\lambda_+ t} \sum_{k=0}^{N_1} ' I_k(\lambda_- t) T_k(\tilde{A}) U_0 + 2 \sum_{k=0}^{N_2} ' \left[\int_0^t e^{-\lambda_+ s} I_k(\lambda_- s) ds \right] T_k(\tilde{A}) F. \quad (8)$$

Обозначим в $\tilde{U} = \tilde{U}_1 + \tilde{U}_2$. Основные вычисления приближенного решения (8) могут быть выражены в операциях умножения матрицы на вектор в процессе последовательного вычисления слагаемых обеих сумм. Из-за рекурсивной связи полиномов Чебышева для нахождения нового слагаемого суммы (7) необходимо лишь одно матричное умножение и несколько сложений, которые мы не включаем в грубую оценку вычислительной сложности. Так, для вычисления первого слагаемого решения (8) $\tilde{U}_1$ необходимо N_1 умножений матрица-вектор, для второго слагаемого $\tilde{U}_2 - N_2$ таких операций. Однако в $\tilde{U}_2$ также необходимо вычислить интегральные коэффициенты, что в зависимости от метода численного интегрирования может привносить различный вклад в вычислительную сложность.

В численном моделировании обычно выполняется расчет на множестве шагов по времени, поэтому приближенное решение (8) находится несколько раз для разных моментов времени $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ с использованием решения на предыдущем моменте времени в качестве начального вектора U_0 . При постоянном шаге по времени Δt второе слагаемое $\tilde{U}_2$ в (8) находится один раз за всю процедуру, а $\tilde{U}_1$ считается на каждом шаге, поэтому окончательная оценка основных операций умножения матрица-вектор есть $n \cdot N_1 + N_2$.

Для оценки точности приближения решения рассматривается оценка абсолютной погрешности

$$\begin{aligned} \|U(t) - \tilde{U}\| &\leq 2e^{-\lambda_+ t} \sum_{k=N_1+1}^{\infty} ' I_k(\lambda_- t) \|T_k(\tilde{A})\| \|U_0\| + \\ &+ 2 \sum_{k=N_2+1}^{\infty} ' \left| \int_0^t e^{-\lambda_+ s} I_k(\lambda_- s) ds \right| \|T_k(\tilde{A})\| \|F\|. \end{aligned} \quad (9)$$

Отсюда при предположении об ограниченности $\|U_0\| \leq C_1$ и $\|F\| \leq C_2$ и оценке $\|T_k(x)\| \leq 1$ при $x \in [-1, 1]$, выражая полученные остатки рядов в слагаемых правой части (9) через матричную экспоненту $e^{\lambda_- t}$ и первые слагаемые рядов, выводятся условия для ограничения погрешности малым положительным ε для каждого слагаемого решения:

$$\begin{aligned} & \left(1 - 2e^{-\lambda_+ t} \sum_{k=0}^{N_1} I_k(\lambda_- t) \right) C_1 \leq \varepsilon, \\ & \left(t - 2 \sum_{k=0}^{N_2} \left[\int_0^t e^{-\lambda_+ s} I_k(\lambda_- s) ds \right] \right) C_2 \leq \varepsilon \end{aligned} \quad (10)$$

Условие (10) определяет необходимое число первых членов обоих рядов решения для достижения заданной точности.

Результаты

Для верификации представленного подхода с использованием соответствующего алгоритма получены решения одномерной задачи (1). В частности, получены решения в отсутствие источников $f(t, x) = 0$ для параметров $L = 1$, $u_l = u_r = 1$ при начальном условии, заданном квадратичной функцией $2 + (4(u_l - 2)/L^2) \cdot (x - L/2)^2$. Расчетная область представлена сеткой с шагом $h = 0.01$.

Для сравнения численного решения описанным методом задача (1) также решалась с помощью стандартной явной конечно-разностной схемы первого порядка по времени и второго по пространству. Для устойчивости схемы шаг по времени Δt выбран в соответствии условию Куранта [18]. Обоиими методами задача была решена для времени $T = n_T \Delta t$ – за n_T шагов явной схемой и за один шаг при помощи полиномов Чебышева. Рассмотрено три различных шага по времени $\Delta t = \{h^2/2, h^2/4, h^2/8\}$ для явной схемы, а в критерии (10) параметр $\varepsilon = 10^{-6}$ для сравнимой точности с точностью численного решения явной схемой. Относительная погрешность решений обоими методами в зависимости от n_T представлена на Рисунке 1. На Рисунке 2 показан рост числа операций умножения матрица-вектор с увеличением $T = n_T \cdot \Delta t$ для обоих методов и различных шагов по времени для предложенного подхода. В частности, для явной схемы можно считать $N_M = n_T$, а для предложенного подхода $N_M = N_1 + N_2$ из (8).

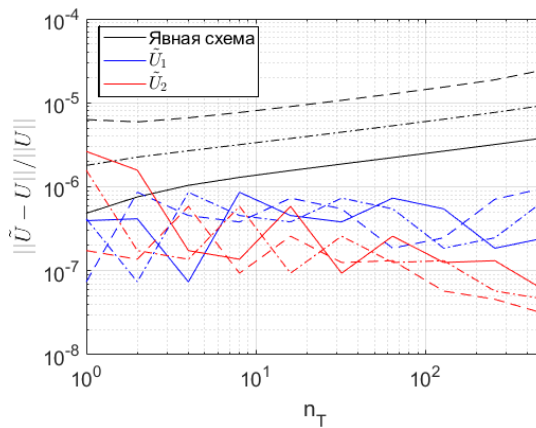


Рис. 1. Относительная погрешность численного решения задачи (1). Сплошная, штриховая и штрихпунктирная линии соответствуют шагам по времени явной схемы $h^2/2, h^2/4, h^2/8$.

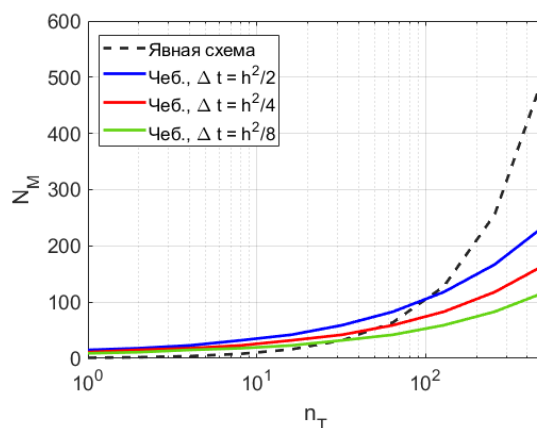


Рис. 2. Число основных операций для вычисления решения.

Обсуждение

Как видно на Рисунке 1, относительная погрешность предложенного метода в верификационных расчетах сравнима с погрешностью явной схемы. При этом рост числа основных операций, сопоставимых с умножением матрица-вектор в явной схеме имеет больший порядок, нежели рост для предложенного метода. Это приводит к тому, что несмотря на то, что для малого числа шагов по времени явная схема выгоднее, для всех трех рассматриваемых шагов по времени после превышения интервалом $[0, T]$ некоторого значения для вычислений предложенным подходом требуется меньше вычислений. Так, для $\Delta t = h^2/8$ число $N_1 + N_2 \approx 30$, для $\Delta t = h^2/4$ $N_1 + N_2 \approx 60$, а для $\Delta t = h^2/2$ $N_1 + N_2 \approx 100$. Поскольку для приближения обоих слагаемых в ходе расчетов требовалось приблизительно одинаковое число первых членов ряда, примерно 15, 30 и 50 первых полиномов Чебышева с неотрицательными индексами необходимо для сравнимой погрешности предложенного метода с явной схемой. Более того, для наибольшего числа шагов по времени явной схемы потребовалось приблизительно в два раза меньше основных операций умножения матрица-вектор. Однако, поскольку такая оценка числа операций достаточно груба, в дальнейшем необходим более детальный учет вычислительных затрат, к примеру, с учетом численного интегрирования для нахождения коэффициентов второго ряда решения (8).

Заключение

В работе представлен эффективный численный подход к решению начально-краевой задачи для уравнения параболического типа, к которым относятся как задачи теплопроводности, так и задачи квазистатического нагружения пороупругих образцов среды в рамках задачи апскейлинга. Подход основан на сведении задачи к системе обыкновенных дифференциальных уравнений на функции значений в узлах пространственной сетки с последующим приближением матричной экспоненты в решении частью ряда по полиномам Чебышева с коэффициентами в виде

модифицированных функций Бесселя первого рода. Представлен возможный критерий остановки вычислительного процесса для достижения заданной точности. Верификация численного метода на одномерной задаче сравнением со стандартным конечно-разностным подходом демонстрирует эффективность первого для относительно больших временных интервалов. В дальнейшем необходим более детальный анализ эффективности алгоритма. Также в дальнейшие планы входит применение представленного подхода к решению задач оценки затухания и дисперсии сейсмических волн в многофазных пористых средах.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИМ СО РАН (тема №FWNF-2026-0018).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бицадзе, А. В. Уравнения математической физики : учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1982. – 336 с.
2. Solovyeu, S., Novikov, M., Lisitsa, V. A numerical investigation of wave-induced fluid flows in anisotropic fractured porous media // *Computers and Mathematics with Applications*. – 2023. – Vol. 140. – P. 78–88.
3. Novikov, M., Lisitsa, V., Romenski, E. Numerical Modeling of Fluid-Saturated Porous Sample Loading Based on Thermodynamically Compatible System Theory // *ICCSA 2024 Workshops / O. Gervasi et al. (Eds.)*. – Cham : Springer, 2024. – Vol. 14817. – P. 237–249. – DOI: 10.1007/978-3-031-65238-7_16.
4. Quintal, B., Steeb, H., Frehner, M., Schmalholz, S. Quasi-static finite element modeling of seismic attenuation and dispersion due to wave-induced fluid flow in poroelastic media // *Journal of Geophysical Research*. – 2011. – Vol. 116.
5. Rubino, J. G., Caspari, E., Muller, T. M., Milani, M., Barbosa, N. D., Holliger, K. Numerical upscaling in 2D heterogeneous poroelastic rocks: Anisotropic attenuation and dispersion of seismic waves // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2016. – Vol. 121, no. 9.
6. Lisitsa, V., Vishnevsky, D. Lebedev scheme for the numerical simulation of wave propagation in 3D anisotropic elasticity // *Geophysical Prospecting*. – 2010. – Vol. 58, no. 4. – P. 619–635.
7. Bernth, H., Chapman, C. Comparison of the dispersion relations for anisotropic elastodynamic finite-difference grids // *Geophysics*. – 2011. – Vol. 76, no. 3. – P. WA43–WA50.
8. Biot, M. A. Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. I. low-frequency range // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1956. – Vol. 28. – P. 168–178.
9. Biot, M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. higher frequency range // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1956. – Vol. 28. – P. 179–191.
10. Santos, J. E., Douglas, J., Corbero, T., Lovera, O. M. A model for wave propagation in a porous medium saturated by a two-phase fluid // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1990. – Vol. 87, no. 4. – P. 1439–1448.
11. Carcione, J. M., Cavallini, F., Santos, J. E., Ravazzoli, C. L., Gauzellino, P. M. Wave propagation in partially saturated porous media: simulation of a second slow wave // *Wave Motion*. – 2003. – Vol. 39. – P. 227–240.
12. Liu, X., Greenhalgh, S., Zhou, B., Greenhalgh, M. Effective biot theory and its generalization to poroviscoelastic models // *Geophysical Journal International*. – 2018. – Vol. 212, no. 2. – P. 1255–1273. – DOI: 10.1093/gji/ggx460.
13. Romenski E., Reshetova G., Peshkov I., Dumbser M. Modeling wavefields in saturated elastic porous media based on thermodynamically compatible system theory for two-phase solid-fluid mixtures // *Computers and Fluids*. – 2020. – Vol. 206. – P. 104587.

14. Romenski E., Reshetova G., Peshkov I., Dumbser M. Modeling wavefields in saturated elastic porous media based on thermodynamically compatible system theory for two-phase solid-fluid mixtures // *Computers and Fluids*. – 2020. – Vol. 206. – P. 104587.
15. Пашковский, С. Вычислительные применения многочленов и рядов Чебышева / С. Пашковский; пер. с пол. С. Н. Киро; под ред. В. И. Лебедева. – М. : Наука, 1983. – 384 с.
16. Gao, Q., Nie, C. B. An accurate and efficient Chebyshev expansion method for large-scale transient heat conduction problems // *Computers and Structures*. – 2021. – Vol. 249. – Article 106513. – DOI: 10.1016/j.compstruc.2021.106513.
17. Хартман, Ф. Обыкновенные дифференциальные уравнения / Ф. Хартман; пер. с англ. под ред. В. М. Алексеева. – М. : Мир, 1970. – 720 с.
18. Самарский А. А. Введение в численные методы. – М.: Наука, 1982. – 256 с.

© М. А. Новиков, В. В. Лисица, 2026

В. В. Плоткин¹✉

Доменный вариант магнитотеллурического зондирования

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: plotkinvv@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Для снижения вычислительных затрат при решении обратной задачи МТЗ сложно построенных сред предлагается новый принцип его проведения – выполнять наблюдения и обработку данных нескольких пунктов в ограниченном по площади и объему пространственном окне – домене. На тестовой модели среды продемонстрировано как правильно выбрать размеры окна и необходимое количество пунктов в нем.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, решение обратной задачи, домен

V. V. Plotkin¹✉

Domain version of magnetotelluric sounding

¹Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: plotkinvv@ipgg.sbras.ru

Abstract. To reduce computational costs when solving the inverse problem of MTS of complex built media, the domain principle of its implementation is proposed - to observe and process data from several points in a spatial window limited in area and volume - a domain. The test media model demonstrates how to correctly select the size of the window and the required number of puncts in it.

Keywords: magnetotelluric sounding, inverse problem solution, domain

Введение

При МТЗ сложно построенных сред необходимы численные расчеты с 3D моделями этих сред. Часто используют модели, учитывающие весь объем среды вдоль исследуемого профиля или полигона. Для таких расчетов нужны вычислительные средства с большой памятью и быстродействием. Поэтому на практике при решении обратных задач МТЗ обычно ограничиваются применением различных приближений и расчетами для 1D и 2D моделей. Однако и в этих случаях для проверки достоверности результатов следует провести расчеты с полученными моделями в 3D варианте.

Так как электромагнитное поле на частотах МТЗ затухает вглубь поглощающей среды, можно предположить, что на амплитудных и фазовых кривых в заданном пункте сказывается ограниченный объем прилегающей среды [1]. Это позволяет протестировать новый принцип проведения МТЗ – одновременно выполнять наблюдения и обработку данных нескольких пунктов в ограниченном по площади и объему пространственном окне – домене. Его преимущество - в уменьшении анализируемого объема среды и снижении вычислительных затрат. Конечно, существенен выбор размеров окна и количества пунктов в нем. В качестве проверки

правильности выбора этих параметров можно взять результаты сравнения расчетов с разными условиями на боковых границах домена в среде. Малое отличие кривых в центральных пунктах домена по результатам таких расчетов служит оценкой достоверности найденной модели среды. Возможность подобного подхода проверялась на тестовой 3D модели среды.

Модель среды и методы расчетов

Для проверки была взята тестовая 3D-модель среды, представленная 3 латерально неоднородными слоями (рис. 1, максимальное сопротивление электропроводности в слоях - 1000, 500, 100 Ом, толщин слоев 1, 1, 2 км, сверху вниз) и подстилающей средой с сопротивлением 10^4 Ом. Фоновое сопротивление в трех верхних слоях 40 Ом. Данный выбор обусловлен сходством поведения кривых МТЗ для этой модели и кривых, полученных в эксперименте на полигоне Салаир [2]. Предполагалось выяснить причины подобного поведения кривых МТЗ, и вызвано ли оно латеральной неоднородностью приповерхностных слоев выбранной модели.

Решения прямых задач МТЗ находились по методу Треффца [3, 4], при этом каждый слой представлялся набором одинаковых параллелепипедов, в которых электропроводность однородна, а их высота равна толщине слоя. На рис. 1 красными точками показаны центры этих параллелепипедов. Размеры полигона по оси ОХ 35 км, по оси ОУ 25 км, количество параллелепипедов вдоль осей 15 и 13 соответственно. Белыми линиями показаны границы тестируемого домена. Приведены кривые МТЗ для пункта в центре по расчетам на моделях среды внутри всего полигона и отдельно - домена.

Расчеты выполнены для двух вариантов граничных условий на боковых сторонах домена. В одном случае (БГУ1) считалось, что домен граничит с горизонтально слоистой средой - на боковых гранях домена вертикальные компоненты $E_z, H_z = 0$. Во втором случае (БГУ2) на боковых гранях домена задавались условия периодичности полей по осям оси ОХ и ОУ. Кривые МТЗ по расчетам для всего полигона (сплошные линии) приведены в случае БГУ1.

Видно, что указанные невязки δ по относительной величине между кривыми кажущихся сопротивлений для домена и полигона малы в обоих вариантах БГУ. Можно говорить об имеющемся сходстве кривых МТЗ для полигона и тестируемого домена и заключить, что объем среды вне домена слабо влияет на поведение кривых МТЗ в центральной части домена. Поэтому обратную задачу для полигона в целом можно решать доменным подходом, сводя ее решение к нескольким независимым задачам для интересующих доменов.

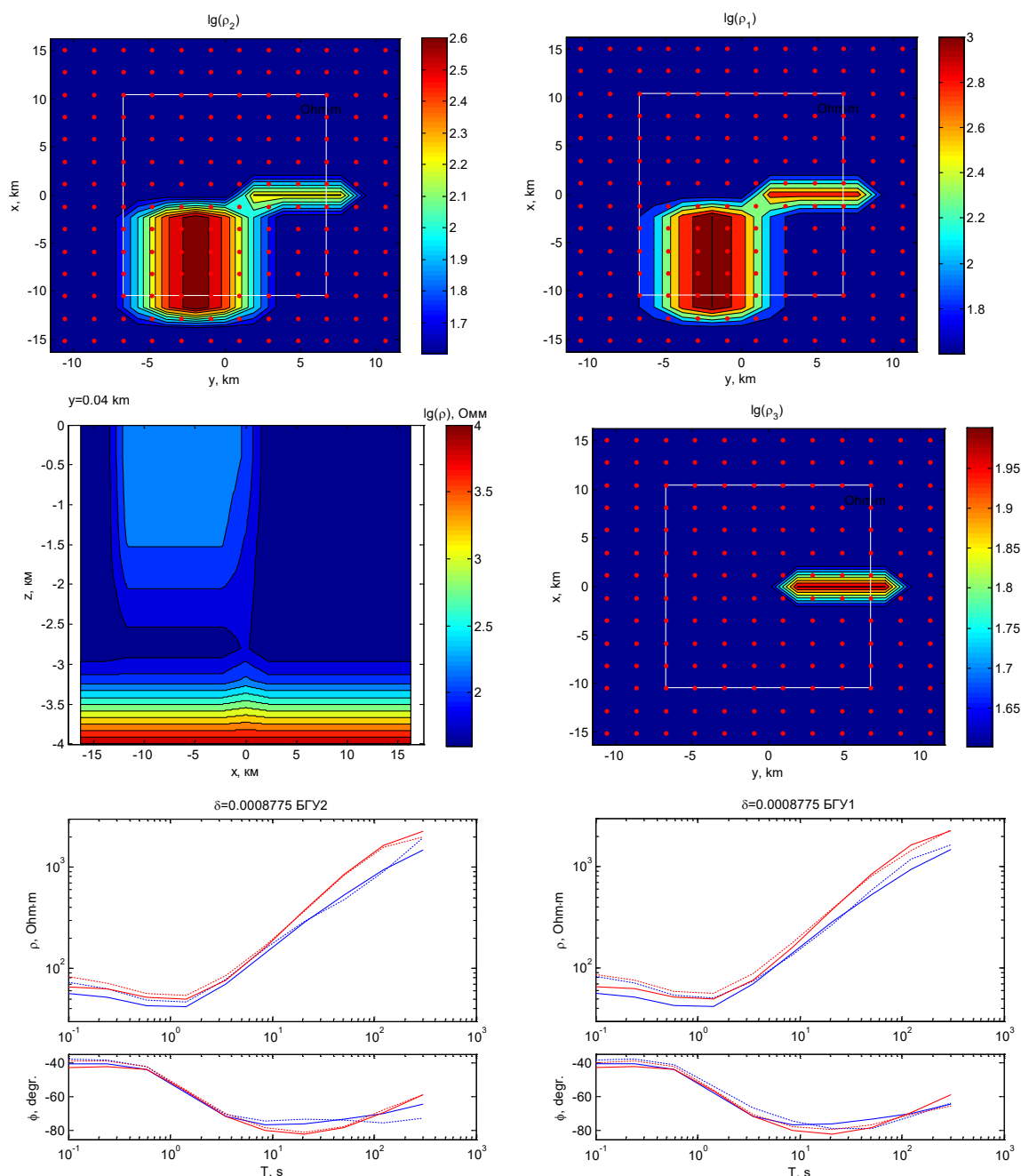


Рис. 1. 3D-модель среды и кривые МТЗ в центре
(сплошные линии – кривые МТЗ по расчетам для всего полигона, пунктир - по расчетам для домена;
БГУ1 – вне домена слоистая среда; БГУ2 – на боковых гранях домена условия периодичности полей; ρ_{xy} - кривые синего цвета, ρ_{yx} - кривые красного цвета;
 δ - невязки кривых кажущихся сопротивлений по относительной величине).

Обратные задачи решались нелинейным методом наименьших квадратов с вычислениями матрицы чувствительности [5]. Решение находилось по данным пунктов МТЗ с помощью минимизации следующего целевого функционала:

$$\Phi = \frac{1}{4K} \sum_{k=1}^K \left(\left| \frac{\ln \rho_{xy} - \ln \rho_{xy}^0}{\ln \rho_{xy}^0} \right|_k^2 + \left| \frac{\ln \rho_{yx} - \ln \rho_{yx}^0}{\ln \rho_{yx}^0} \right|_k^2 \right)$$

где K – количество учитываемых временных периодов и имеющихя пунктов МТЗ, $\rho_{xy, yx}$, $\rho_{xy, yx}^0$ – кажущиеся сопротивления для текущей и исходной модели среды соответственно.

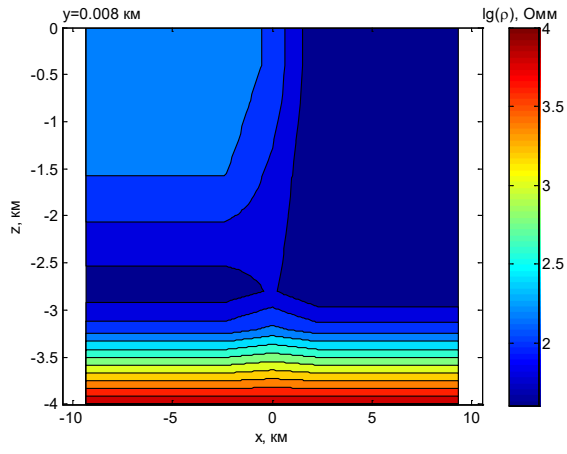
Так как невязка δ не равна нулю, и кривые МТЗ для полигона и домена точно не совпадают, необходимо выяснить, насколько отличается исходная модель среды в домене от получающейся при решении обратной задачи для него. Важно также понять, насколько на результатах сказывается количество и расположение учитываемых пунктов МТЗ.

Результаты расчетов и их обсуждение

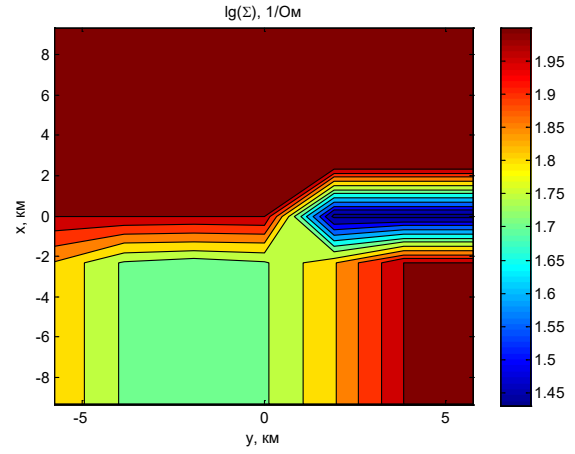
Решения обратной задачи повторялись 10 раз с разными стартовыми моделями. По результатам этих решений определялись средняя модель среды, с.к.о. параметров эквивалентных моделей и соответствующих кривых МТЗ [6]. Все стартовые модели – однородная среда, представленная 3 слоями. Толщины слоев и сопротивление среды задавались случайными числами с 10% отклонениями от исходных значений. Коридоры изменения параметров определяли соответствующие наборы эквивалентных моделей искомой среды. Решение каждой обратной задачи ограничивалось 15 итерациями, практически во всех вариантах невязки кривых МТЗ по относительной величине не превышали 10^{-3} .

На рис. 2 представлены результаты, полученные по данным двух разных доменов. Сравниваются латеральные и глубинные распределения в исходной модели и в модели, полученной по данным взятых пунктов. С уменьшением количества этих пунктов восстановление исходной модели ухудшается. Результаты расчетов показывают, что эффективность такого восстановления зависит от положения домена относительно рассматриваемой латеральной неоднородности и расстановки пунктов в нем.

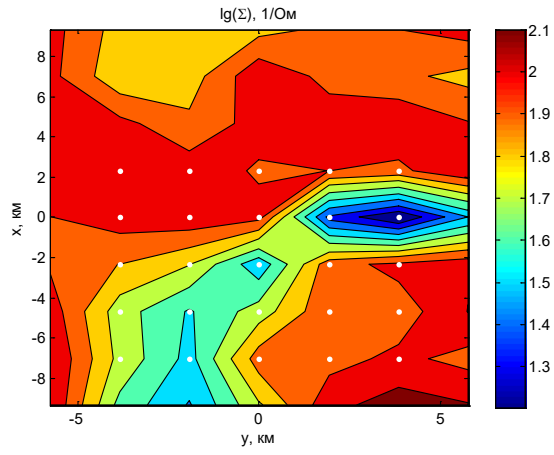
Для более детальной характеристики степени восстановления модели тестируемой среды учитывались результаты повторных решений обратной задачи с разными стартовыми моделями. В качестве примера на рис. 3 даны разбросы параметров эквивалентных моделей среды и соответствующих кривых кажущихся сопротивлений. Для каждого пункта приводятся невязки кривых для исходной модели и средней по решениям обратных задач. При малых представленных “погрешностях” кривых кажущихся сопротивлений разбросы параметров эквивалентных моделей среды заметно больше. Это является следствием неустойчивости и неоднозначности решений любых обратных задач.



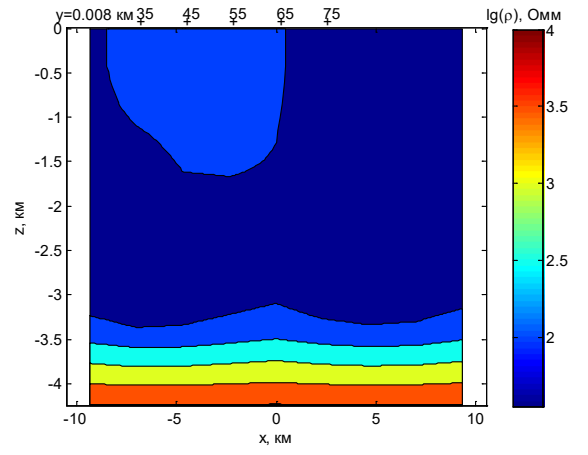
1



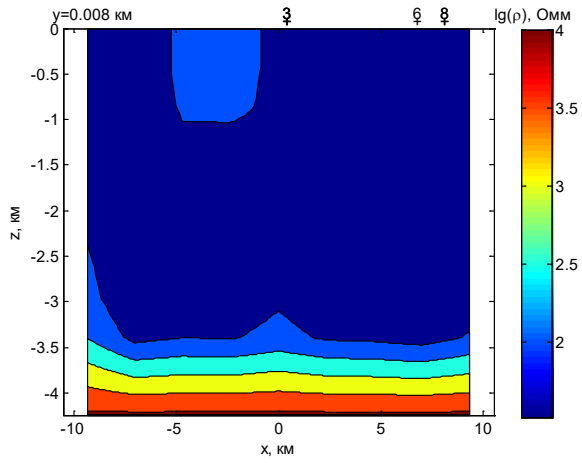
2



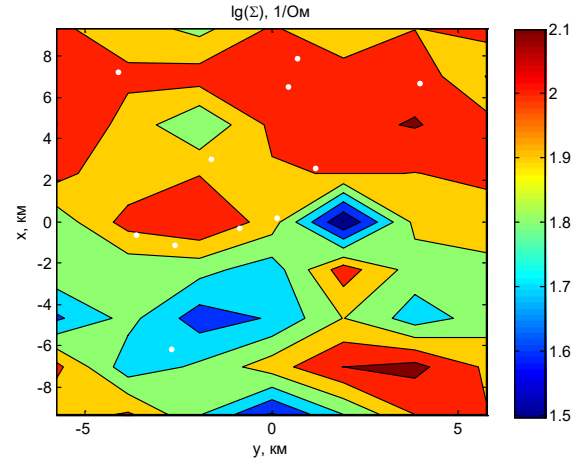
3



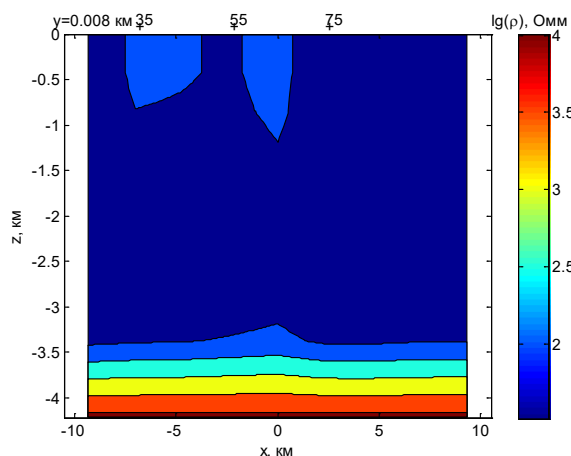
4



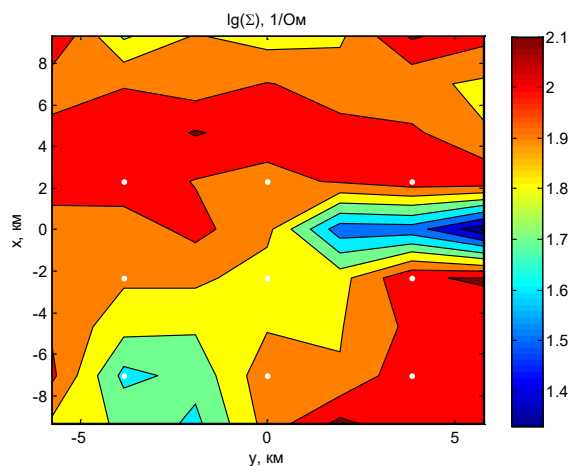
5



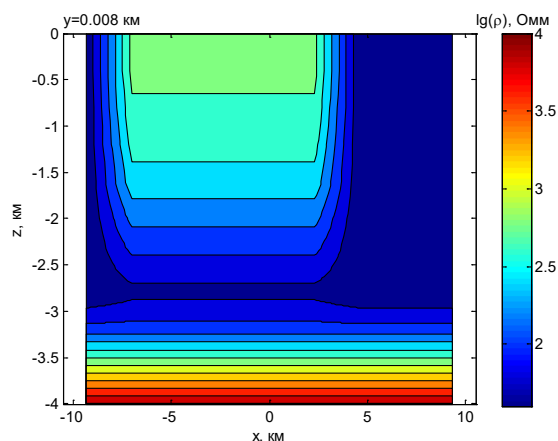
6



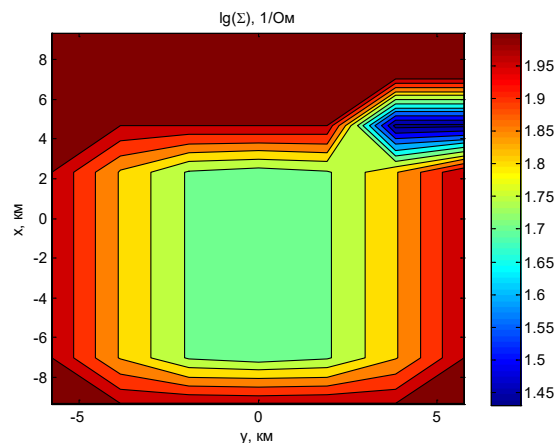
7



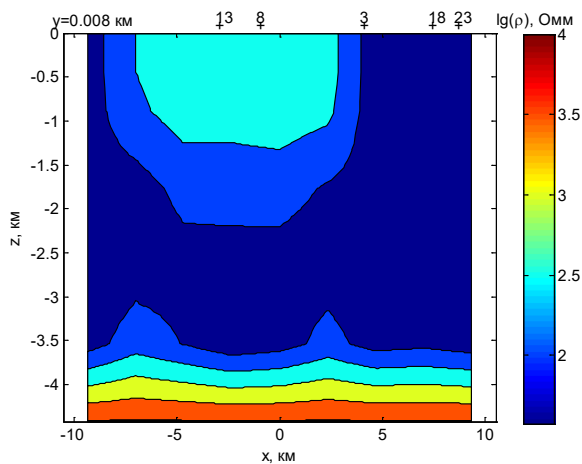
8



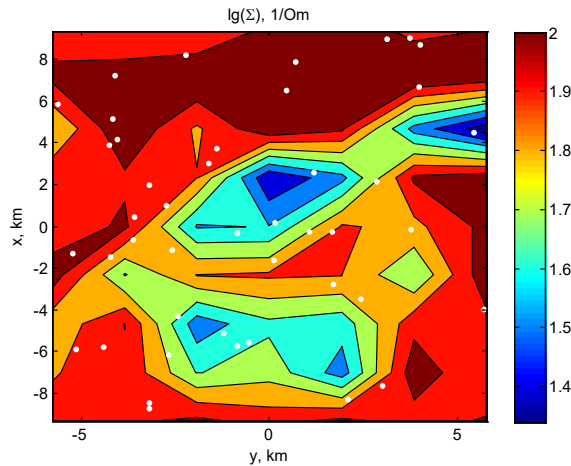
9



10



11



12

Рис. 2. Продольные проводимости (слева) и глубинные разрезы (справа) слоев среды. Исходные модели в двух доменах (1, 2) и (9, 10) и полученные оптимизацией по данным 25 пунктов (3, 4), 12 пунктов (5, 6), 9 пунктов (7, 8) и 50 пунктов (11, 12). Пункты показаны точками белого цвета (слева).

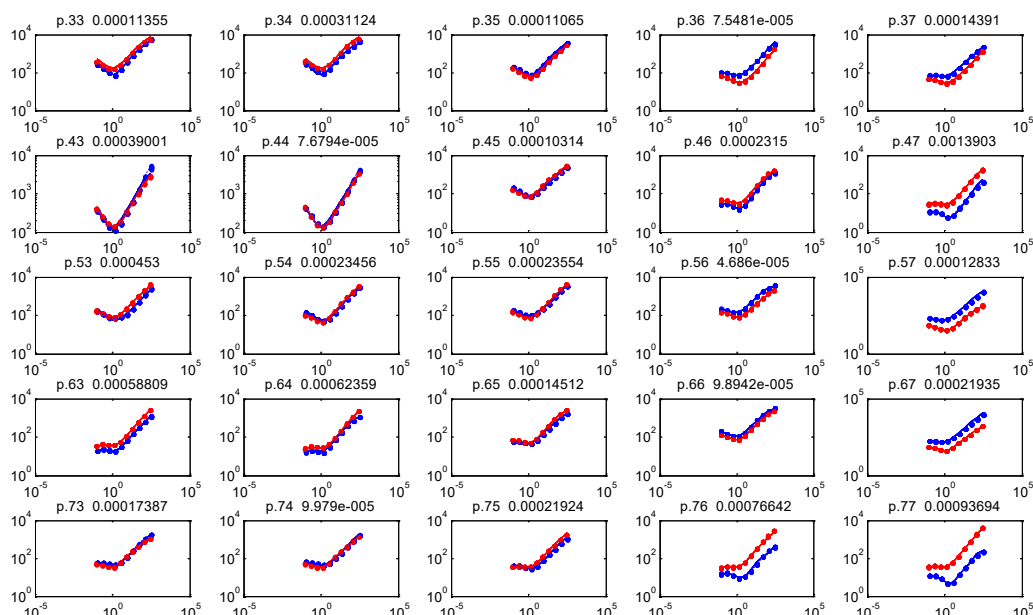
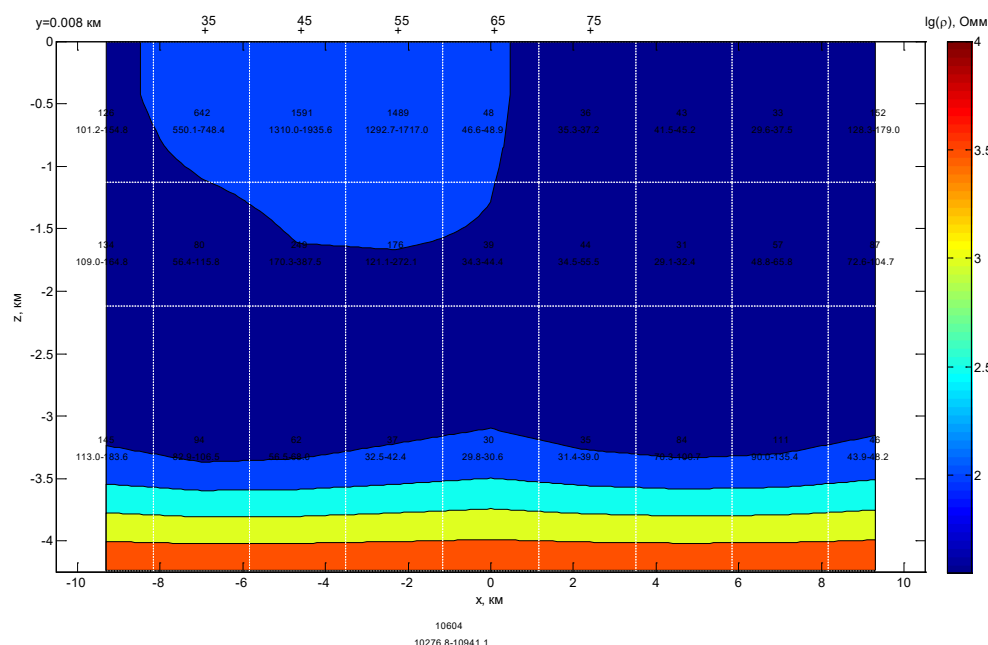


Рис. 3. Глубинный разрез модели среды, полученной по данным 25 пунктов (для каждого параллелепипеда цифрами указаны средние значения и коридор сопротивлений в соответствии с с.к.о.). Кривые кажущихся сопротивлений для исходной модели (сплошные линии) и средней по решениям обратных задач (пунктир, точки показаны кривые всех решений). ρ_{xy} - кривые синего цвета, ρ_{yx} - кривые красного цвета.

Заключение

Предложен доменный принцип проведения МТЗ – наблюдения и обработку данных нескольких пунктов осуществлять в ограниченном по площади и объему пространственном окне – домене. Его преимущество - в уменьшении анализи-

руемого объема среды и снижении вычислительных затрат. Это возможно благодаря диффузному характеру распространения и затуханию электромагнитного поля в поглощающей среде.

На тестовой модели среды продемонстрировано, как можно проверить выбор размеров окна и количества пунктов в нем. Предложено сравнивать результаты расчетов с разными граничными условиями на боковых сторонах домена в среде. Малое отличие кривых в центральных пунктах домена по результатам таких расчетов служит оценкой достоверности найденной модели среды.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2026-0049.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Плоткин В.В. Зона влияния неоднородности среды и поля при магнитотеллурическом зондировании // Геология и геофизика. - 2012. - Т. 53. - № 1. - С. 140-149.
2. Жимулев Ф.И., Поспеева Е.В., Потапов В.В., Новиков И.С., Котляров А.В. Глубинное строение и тектоника зоны сочленения Салаира и Горной Шории (северо-запад Центрально-Азиатского складчатого пояса) по результатам магнитотеллурического зондирования // Геология и геофизика – 2023. – Т. 64 – № 5 – С. 674-690.
3. Егоров И.В. Метод Треффца для решения трехмерных прямых и обратных задач геоэлектрики // Физика Земли. - 2011. - Т. 47. - № 2. - С. 15-26.
4. Плоткин В.В., Губин Д.И. Учет приповерхностных неоднородностей над горизонтально слоистым разрезом при магнитотеллурическом зондировании // Геология и геофизика. - 2015. - Т. 56. - № 7. - С. 1381-1390.
5. Плоткин В.В. Алгоритм устойчивого решения обратной задачи магнитотеллурического зондирования // Геофизические технологии. – 2023. – № 1. – С. 13-24.
6. Плоткин В.В., Поспеева Е.В., Потапов В.В., Заплавнова А.А. Оценки достоверности результатов магнитотеллурического зондирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь - XXI Международный научный конгресс. Международная научная конференция "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 8 т. – СГУГиТ – Новосибирск – Т. 2 – № 4 – С. 20-26 – 2025

© В. В. Плоткин, 2026

Е. В. Агеев¹, В. В. Потапов^{1✉}, В. В. Оленченко¹, Е. Ю. Антонов¹

Результаты исследования многолетнемерзлой толщи методом ЗСБ в окрестностях р. Пур

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения
Российской академии наук,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: potapovvv@ipgg.sbras.ru

Аннотация. С водоёмами Западной-Сибири связано возникновение таликовой зоны в криогенной толще. Талики гидрогенного класса формируются за счёт тепла, аккумулированного поверхностными или подземными водами. Обычно сквозные водопроводящие (подрусловые) талики приурочены к руслам крупных рек и их наиболее крупных притоков. Применение электроразведочного метода становления поля в ближней зоне (ЗСБ) широко распространено для изучения криогенной толщи. Целью данных работ было на основе геофизических данных определить влияние речной долины на криогенную толщу. По результатам измерений методом ЗСБ вдоль профиля пересекающего долину р. Пур построен предварительный интерпретационный разрез, на котором показано криогенное состояние геологических образований.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, подрусловой талик, электромагнитные зондирования, геоэлектрический разрез, индукционно-вызванная поляризация

E. V. Ageenkov¹, V. V. Potapov^{1✉}, V. V. Olenchenko¹, E. Y. Antonov¹

The results of the study of permafrost strata by the TEM method in the vicinity of the Pur river

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: potapovvv@ipgg.sbras.ru

Abstract. The occurrence of the talik zone in the cryogenic stratum is associated with the reservoirs of Western Siberia. Hydrogenic class taliks are formed due to heat accumulated by surface or groundwater. Usually, through-running (subsurface) taliks are confined to the beds of large rivers and their largest tributaries. The use of electrical exploration was near-field transient electromagnetic sounding (TEM) is widely used to study cryogenic stratum. The purpose of these studies was to determine the influence of the river valley on the cryogenic stratum based on geophysical data. Based on the results of measurements by the TEM method, a preliminary interpretative section was constructed along the profile crossing the valley of the Pur River, which shows the cryogenic state of geological formations.

Keywords: permafrost, river talik, electromagnetic soundings, geoelectrical section, induction-induced polarization

Введение

На строение многолетнемерзлых пород (ММП) оказывают влияние локальные или азональные факторы, такие как нефтегазовые структуры и подрусловые талики.

С последним обстоятельством связана необходимость детализации и подробного изучения строения ММП в современных границах пойм крупных рек.

Крупные водотоки и водоёмы в регионах развития многолетнемёрзлых пород выступают в роли мощных тепловых агентов, способствуя формированию обширных гидрогенных таликовых зон [11, 12, 15], которые значительно усложняют внутреннее строение криогенной толщи [5].

Обычно на геологических разрезах границы талых и мёрзлых пород изображают в основном по наитию, из общих соображений об отепляющем действии воды, или на основании бурения ограниченного количества скважин.

Электроразведочные методы для изучения ММП стали применяться давно. Электроразведочные методы, позволяют уточнять границы таликов. Первоначально использовались измерения на постоянном токе, а позднее на переменном.

Известные работы включают исследование таликовых зон методом ЗСБ на севере Западной Сибири [1, 7], а также комплексирование электромагнитных зондирований с тепловым моделированием для уточнения геометрии подозёрного талика на Аляске [16].

Целью наших исследований было установление структуры ММП, в частности подруслового талика, в границах поймы р. Пур.

Методы и материалы

Геофизический профиль пересекал р. Пур в 3 км к северу от п. Уренгой (рис. 1). Ширина русла в этом месте составляет 1100 м.

Район работ относится к зоне прерывистого распространения современных ММП до глубины 25–80 м с наличием реликтовой многолетнемёрзлой толщи в интервале глубин 150–400 м [9].

При измерениях многолетнемерзлых пород методом ЗСБ помимо процессов становления поля также генерируются и регистрируются процессы вызванной поляризации. Под эффектом вызванной поляризации (ВП) обычно понимают совокупность электрохимических и электрокинетических процессов, происходящих в горных породах под действием электрического тока и сопровождаемых возникновением вторичных ЭДС [8]. Механизм проявления ВП, в этом случае, связан с электрохимической поляризацией пленок незамерзшей воды, которая при температурах ниже 0°C в связанном состоянии остается на поверхности минеральных зерен.

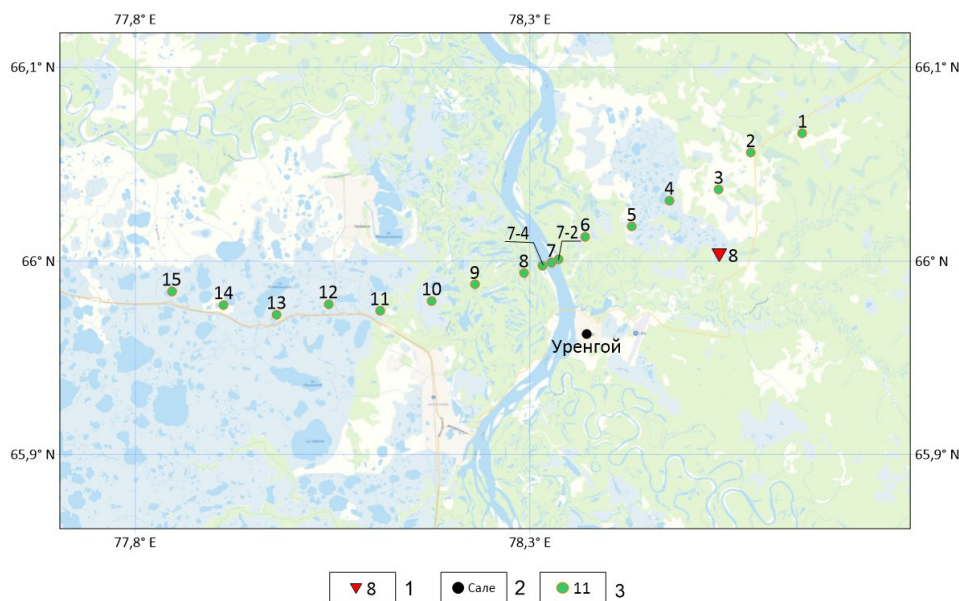


Рис. 1. Схема расположения профиля через р. Пур:

- 1 – номер площадки ЗСБ субмеридионального профиля 2023 г. [2];
2 – населённый пункт; 3 – площадки измерений методом ЗСБ с номерами.

В результате измеряемый сигнал содержит в себе суммарный сигнал от этих двух процессов. Из теории методов ЗСБ и ВП [13] известно, что в случае, когда измерительная петля соосна генераторной, то процессы ВП имеют максимальный вклад в сигнал. В случае же если измерительная петля разнесена от центра генераторной, тогда влияние процессов ВП ослабляется. Таким образом для определения параметров ВП при измерениях сигнала становления, необходимо измерение как соосных, так и разнесенных петель.

Схема измерений (рис. 2) включала два генераторных контура и четыре приёмных петли. Сигнал ЗСБ от каждого генераторного контура размером 100×100 м регистрировался с помощью одновитковых приёмных петель (20×20 м), установленных на двух пикетах. Один пикет был соосным, а второй – выносным (разнос 100 метров), расположенным в центре соседнего генераторного контура.

В ходе исследований были выполнены измерения на 17 площадках с близким к равномерному расположением вдоль профиля (среднее расстояние между площадками составило около 2.5 км), со сгущением в русле р. Пур.

Площадки 1-5 расположены на правом берегу р Пур и не входят, в ярко выраженную на космоснимках, пойму реки. Площадки 6-10 находятся в пойме реки, которая выделяется бурной растительностью в отличие от берегов, причем площадка 7 находится непосредственно в середине русла, а 7-2 и 7-4 по краям русла (расстояние между этими площадками около 500 метров).

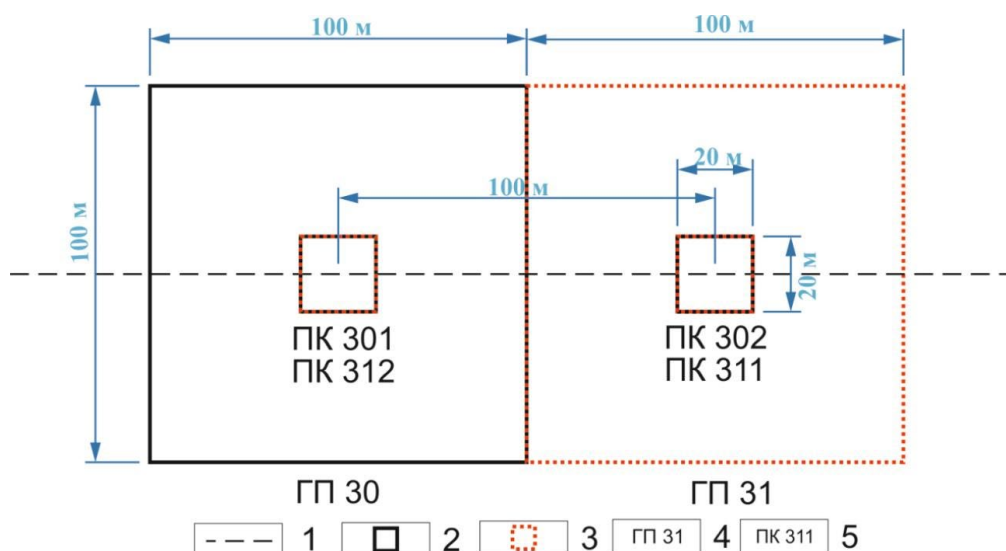


Рис. 2. Схема расположения генераторных и измерительных петель на площадке работ методом ЗСБ:

- 1 – направление профиля; 2 – расположение первой генераторной петли и её измерительных петель; 3 – расположение второй генераторной петли и её измерительных петель; 4 – номер генераторной петли;
5 – номер измерительной петли (пикета)

Измерения выполнены с помощью аппаратуры FastSnap [14]. Подбор одномерных геоэлектрических моделей в каждой точке зондирования проводился с помощью программы TEM-IP [3, 4].

Результаты

Анализ кривых становления электромагнитного поля показал, что результаты измерений вдоль профиля различаются в основном интенсивностью проявления индукционно-вызванной быстропротекающей поляризации (БВПИ), которое выражается появлением локального минимума на кривой ЭДС на временах переходного процесса около 0.1 мс.

На рисунке показаны типичные сигналы становления для пикетов с ВП и без ВП. Влияние ВП видно на временах примерно 0.1 мс, в виде резкого спада в узком временном интервале, либо двойной смене полярности кривой ЭДС. На кривых без заметного влияния ВП таких особенностей не наблюдается. Переходы сигнала становления через ноль на временах 0.1 мс типичный признак многолетнемерзлых пород [17], в которых ВП проявляется именно на этом времени. Из качественного анализа сигналов ЗСБ на всем профиле видно, что подбор моделей среды необходимо проводить с учетом влияния параметров вызванной поляризации.

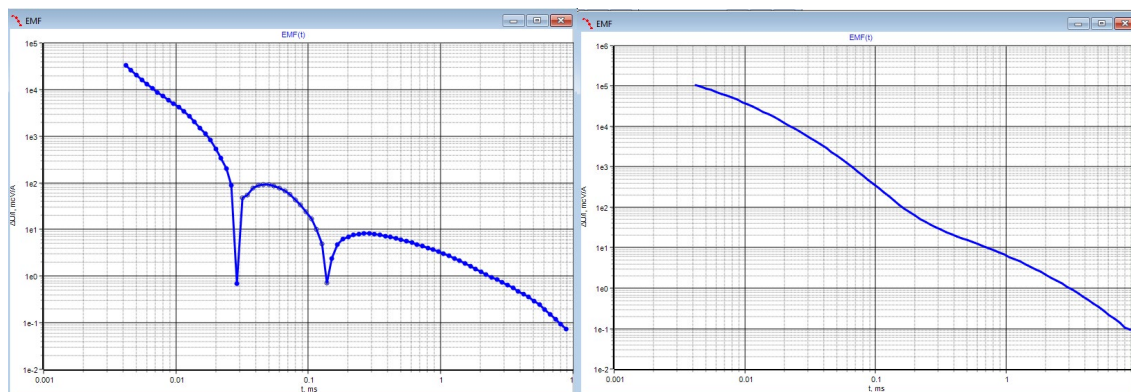


Рис. 3. Сигнал становления: слева - на пикете 801 не имеющий признаков присутствия ВП, справа - на пикете 1401 осложненный влиянием ВП

По виду кривых можно увидеть различия в сигналах, и соответственно в моделях среды для площадок 7, 7-2, 7-4, которые находились в русле реки (рис. 4), и для площадок (5 и 9), находившихся в пойме.

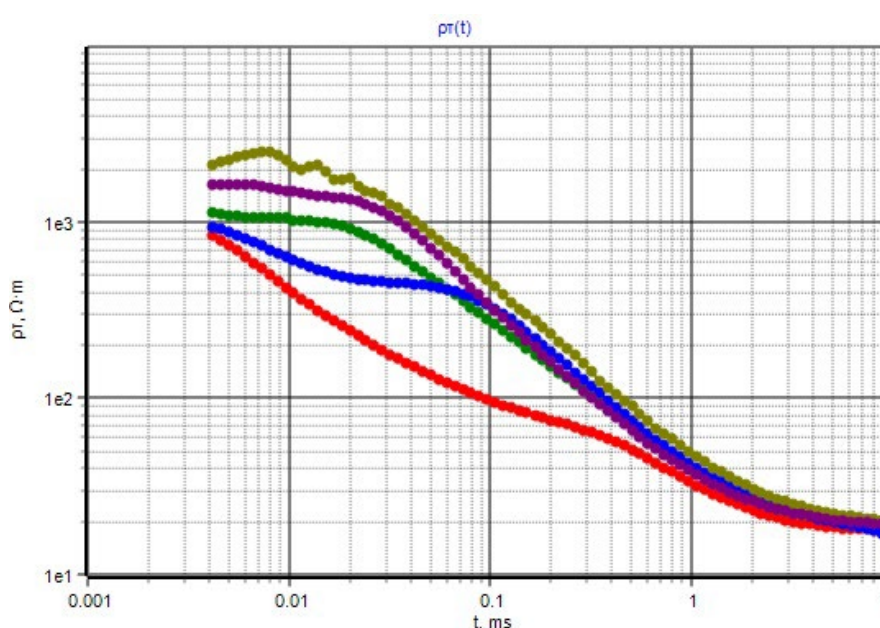


Рис. 4. Кривые кажущегося сопротивления для соосных измерений на площадках:

красная – 7 площадка (центр русла), синяя – 7-4 площадка (край русла),
зеленая – 7-2 площадка (край русла), фиолетовая – 5 площадка (пойма),
коричневая 9 площадка (пойма).

По кривым кажущегося сопротивления видно, что отличается только кривая измеренная по центру русла, ее уровень сопротивлений ниже, чем у остальных кривых, что может свидетельствовать о наличие подруслового сквозного талика, ширина которого не выходит за пределы русла.

По результатам инверсии в программе TEM-IP с учетом параметров вызванной поляризации получены 1D модели для всех точек измерения. На основе моделей, полученных по результатам инверсии, был построен предварительный интерпретационный разрез (рис. 5).

На интерпретационном разрезе показано криогенное состояние геологических образований. В основании разреза подмерзлотная толща, выше неё реликтовая многолетнемёрзлая толща. Реликтовые и современные многолетнемерзлые породы разделяет, предположительно, межмерзлотный талик или криопэг. С большей уверенностью, учитывая следы миграции солёной и пресной воды можно говорить о проявлении криопэга. Современную мерзлоту перекрывает сезонно талый слой. На разрезе показан гидрогенный подрусловой напорно-фильтрационный криогидрогалинный сквозной талик [11], пронизывающий современную и реликтовую многолетнемёрзлую толщу. Под хасырями выделены подозёрные застойные криогидрогалинные несквозные талики [11].

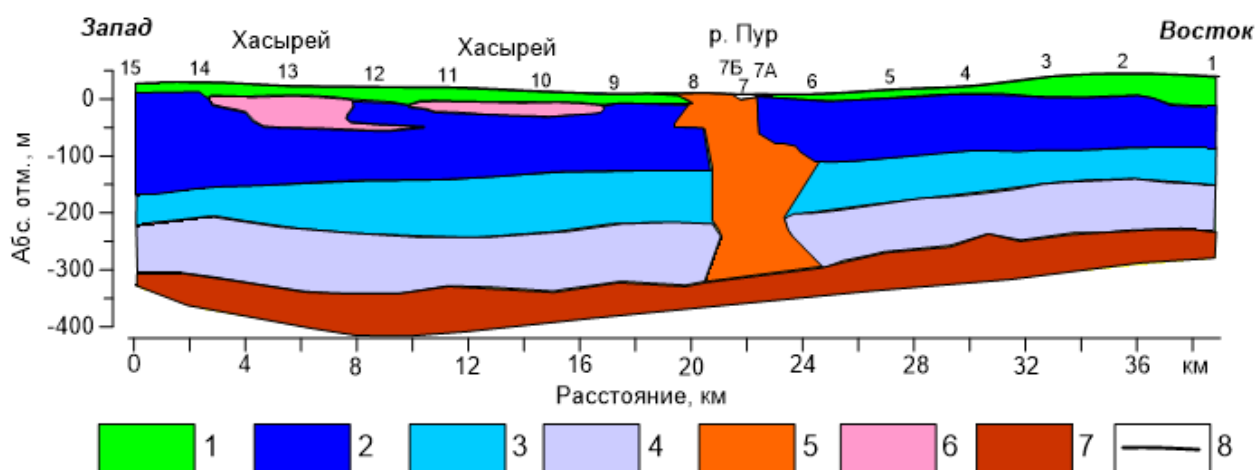


Рис. 5. Интерпретация результатов съёмки ЗСБ. 1 – сезонно-талый слой; 2 – современная многолетнемёрзлая толща; 3 – криопэг; 4 – реликтовая многолетнемёрзлая толща; 5 – подрусловой сквозной талик; 6 – подозёрный несквозной талик; 7 – подмерзлотная толща; 8 – границы криогенных образований

Заключение

Выполненные в долине р. Пур геофизические исследования методом ЗСБ позволили получить сведения о сложном строении криогенной толщи района. Использование метода ЗСБ подтвердило свою эффективность в разделении талых и мёрзлых горизонтов, а также поиске таликовых зон.

В результате получено строение ММТ в пределах линии съёмки, показано присутствие таликовой зоны под руслом реки, проходящей сквозь современную (резистивную) и реликтовую ММТ. Между современной и реликтовой мерзлотой выявлено развитие слоя, предположительно криопэга.

Благодарности

Полевые работы выполнены в рамках проекта Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра «Прогноз деградации мерзлоты и технология автоматизированного контроля несущей способности мёрзлых грунтов под объектами капитального строительства», обработка и интерпретация материалов проведена при поддержке программы фундаментальных научных исследований FWZZ-2026-0049.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агеев Д.В. Применение зондирования становлением поля для решения гидрогеологических задач в условиях криолитозоны на примере Новоуренгойского месторождения // Инженерные изыскания, 2019, т. 13, № 3, с. 40–49.
2. Агеев Е.В., Потапов В.В., Антонов Е.Ю., Шеин А.Н., Оленченко В.В. Широкая зональность строения многолетнемерзлой толщи Ямало-Ненецкого автономного округа по данным электромагнитных зондирований // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 5, с. 60–70. DOI: 10.15372/KZ20240505. EDN: DGDONM
3. Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А. Автоматизированная система для интерпретации данных индукционных импульсных электромагнитных зондирований с учётом индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика, 2014, т. 55, № 8, с. 1282–1293.
4. Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А., Эпов М.И. Программа для ЭВМ «ТЕМ-IP v2» // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022668984, 14.10.2022. Заявка № 2022668128/69 от 07.10.2022. URL: <https://fips.ru/EGD/f57ecc52-4dca-4943-8a74-f12cdc64d143>
5. Бадю Ю.Б. Криолитогенез. Признаки и призраки криолитосферы. М., Издательство Московского университета, 2021, 367 с.
6. Брадучан Ю.В., Василенко Е.П., Воронин А.С. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист Q-43 – Новый Уренгой. Объяснительная записка. СПб., Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015, 320 с.
7. Кожевников Н.О. Быстропротекающая индукционно-вызванная поляризация в мёрзлых породах // Геология и геофизика, 2012, т. 53, № 4, с. 527–540.
8. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1980. 391 с.
9. Лебедева Е.А., Файбусович Я.Э., Назаров Д.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000. Третье поколение. Серия Западно-Сибирская. Лист Q-44 – Тазовский. Объяснительная записка. СПб., Изд-во ВСЕГЕИ, 2020, 191 с.
10. Рекомендации по геофизическим работам при инженерных изысканиях для строительства (электроразведка) / ПНИИС. М., Стройиздат, 1984, 104 с.
11. Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны. М., Изд-во Моск. ун-та, 1983, 232 с.
12. Романовский Н.Н. Талики в области многолетнемерзлых пород и схема их подразделения // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология, 1972, № 1, с. 23–34.
13. Стогний В.В. Импульсная индуктивная электроразведка при изучении поляризующей среды криолитозоны Якутской кимберлитовой провинции // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 4, с. 46–56.
14. Шарлов М.В., Агафонов Ю.А., Стефаненко С.М. Современные телеметрические электроразведочные станции SGS-ТЕМ и FastSnap. Эффективность и опыт использования // Приборы и системы разведочной геофизики, 2010, № 1 (31), с. 27–31.

15. Фотиев С.М. Гидрогеотермические особенности криогенной области СССР. М., Наука, 1978, 236 с.
16. Creighton A.L., Parsekian A.D., Angelopoulos M. Transient electromagnetic surveys for the determination of talik depth and geometry beneath thermokarst lakes // Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2018, vol. 123. DOI: 10.1029/2018JB016121.
17. Kozhevnikov, N.O. On the association between fast induced polarization in frozen rocks and dielectric polarization of ice. // 2022, Geophysical Prospecting, 70, 1380–1387. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.13246>

© *Е. В. Агеевков, В. В. Потапов, В. В. Оленченко, Е. Ю. Антонов, 2026*

М. И. Протасов^{1✉}

Модели трещиноватости и трёхмерное сверточное моделирование: возможности практического использования

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: protasovmi@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В рамках проведённого исследования созданы трёхмерные реалистичные разно-масштабные синтетические модели зон трещиноватости, описывающие практически значимые геологические модели трещин. С использованием трёхмерного свёрточного моделирования для всех созданных моделей были построены трёхмерные синтетические идеальные дифракционные изображения. При этом для каждой модели были построены изображения для нескольких значимых сейсмических диапазонов частот. В итоге получилась обширная база данных изображений и моделей, которая позволяет провести исследование потенциальных возможностей характеристики трещиноватых коллекторов и их параметров по сейсмическим данным.

Ключевые слова: модели трещиноватости, дифракционные изображения, трёхмерное свёрточное моделирование

М. И. Protasov^{1✉}

Fracture models and 3D convolutional modeling: practical application capabilities

¹Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: protasovmi@ipgg.sbras.ru

Abstract. As part of the study, realistic, multi-scale synthetic 3D models of fracture zones are created, describing practically relevant geological fracture patterns. Using 3D convolutional modeling, 3D synthetic ideal diffraction images are constructed for all created models. For each model, images are generated for several significant seismic frequency ranges. The resulting database of images and models enable the exploration of potential characterization capabilities for fractured reservoirs and their parameters using seismic data.

Keywords: fracture models, diffraction images, 3D convolutional modeling

Введение

Общеизвестно, что трещины и разломы могут существенно влиять на фильтрационные процессы в коллекторах. Поэтому анализ их пространственной структуры и ее моделирование имеет большое значение при планировании разработки и эксплуатации нефтегазовых залежей. При этом по размерам выделяют малые и большие трещины. Абсолютная длина большинства трещин – метры и десятки метров, но она может колебаться от миллиметров до сотен метров [Епифацев, Плетенчук, 2008; Ольховатенко, Трофимова, Ожогина, 2015]. В связи с этим важно и необходимо иметь ответы на вопросы: какие трещины и какие их

параметры можно определить по дифракционным изображениям рассеянных волн.

Для этого в рамках проведённого исследования созданы реалистичные разномасштабные синтетические модели зон трещиноватости, описывающие практически значимые геологические модели трещин. Для всех созданных моделей были построены синтетические идеальные дифракционные изображения.

Для построения таких изображений использовалось трёхмерное свёрточное моделирование [Protasov et. al, 2019], которое позволяет создать изображения за разумное время счёта на достаточно мелких сетках, учитывающих мелкомасштабные особенности трещиноватых сред. Необходимо отметить, что построить такие изображения с использованием полноволнового моделирования с последующей обработкой сейсмических данных не представляется возможным за приемлемое время счёта на современном этапе развития вычислительных методов и вычислительной техники.

В итоге для каждой модели были построены изображения для нескольких значимых сейсмических диапазонов частот. В итоге получилась обширная база данных изображений и моделей, которая позволяет провести исследование потенциальных возможностей характеристики трещиноватых коллекторов и их параметров по сейсмическим данным.

Моделирование трещиноватых сред

Для моделирования рассмотрены различные классификации трещин и различные горные породы, которые являются трещиноватыми коллекторами, и из них выбраны наиболее распространённые. Также были проанализированы реалистичные масштабы трещин, что привело к решению создать разномасштабные типичные модели трещиноватых коллекторов. В итоге всего создано 4 различных класса моделей, содержащих трещины, различные по масштабу, начиная от самых мелких, заканчивая самыми крупными. При этом в рамках этих классов было решено создавать типичный коллектор с реалистичными, но различными параметрами модели.

Далее было адаптировано статистическое моделирование дискретной сети трещин [Колюхин, Протасов, 2018] для каждого класса модели, и с его использованием были созданы наборы моделей дискретных сетей трещин для каждого класса. Для каждой дискретной сети трещин были созданы модели упругих параметров с использованием осреднения по Шонбергу, при этом значения матрицы породы выбирались исходя из типичных значений соответствующего типа коллектора, а сам коллектор моделировался в предположении, что он является нефте-насыщенным, газо-насыщенным или водо-насыщенным. Таким образом было получено достаточно широкое разнообразие реалистичных коллекторов, как по масштабу, так и физическим свойствам коллектора (Рисунок 1).

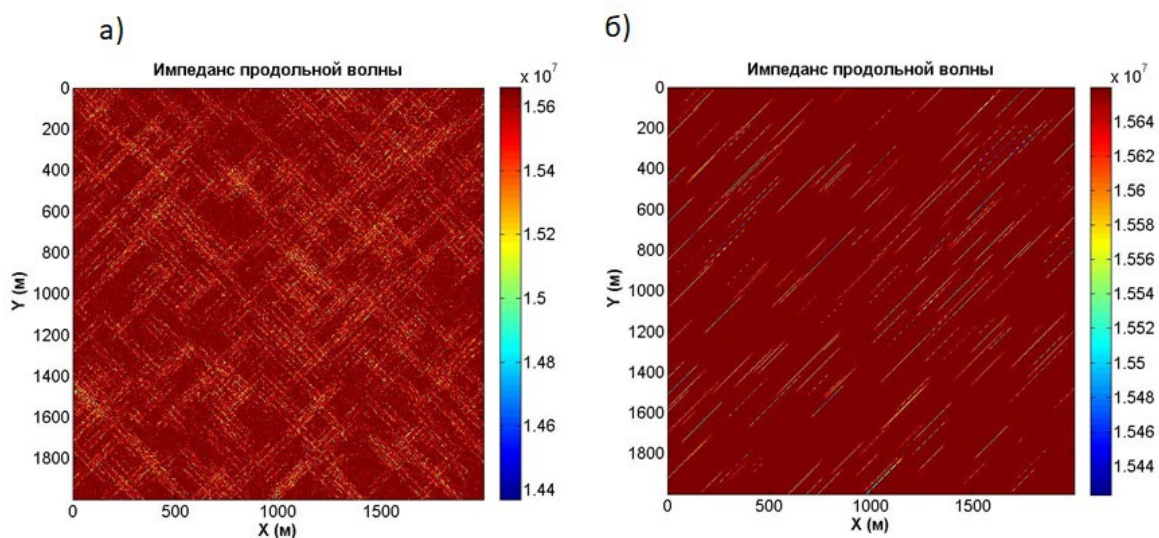


Рис. 1. а) Акустический импеданс продольной волны для модели трещин карбонатного нефте-насыщенного коллектора для участка месторождения, с размерами модели: 2000 м × 2000 м × 100 м. (размер ячейки: 2 метра), где содержатся три уровня трещин: магистральные трещины - крупные, сквозные, определяют фильтрационный каркас; зональные трещины - среднего размера, связаны с деформационными зонами вокруг магистральных трещин; фоновые трещины - мелкие, рассеянные по всему объему породы.
б) Акустический импеданс продольной волны для той же модели, но где она включает только одно семейство магистральных трещин.

Построение дифракционных изображений

Для построения дифракционных изображений любым из возможных алгоритмов необходимо использовать сейсмическую миграцию: «частичную» или «полную», например, на основе условия визуализации в структурных углах [Protasov et al, 2019]. При этом наиболее качественные дифракционные изображения получаются в том случае, когда используется «полная» миграция только рассеянной компоненты сейсмического волнового поля. При отсутствии других волн полученные таким образом дифракционные изображения полностью соответствуют результатам двухмерного/трёхмерного свёрточного моделирования, которое и предлагается использовать. И именно таким образом для всех созданных моделей трещиноватости были построены синтетические идеальные дифракционные изображения. При этом для каждой модели были построены изображения для нескольких значимых сейсмических диапазонов частот (пример на Рисунке 2). Длины трещин в этом примере лежат в интервале от 100 м до 500 м. Доминирующая длина волны на изображениях на Рисунках 2а, 2б, 2в, 2г равна 580 м, 193 м, 97 м и 64 м соответственно. Даже на основе качественной оценки можно сделать вывод, что частичное извлечение отдельных трещин возможно, когда средняя длина семейства трещин больше длины волны. Извлечение большей части отдельных трещин возможно, когда длины всего семейства трещин больше длины волны.

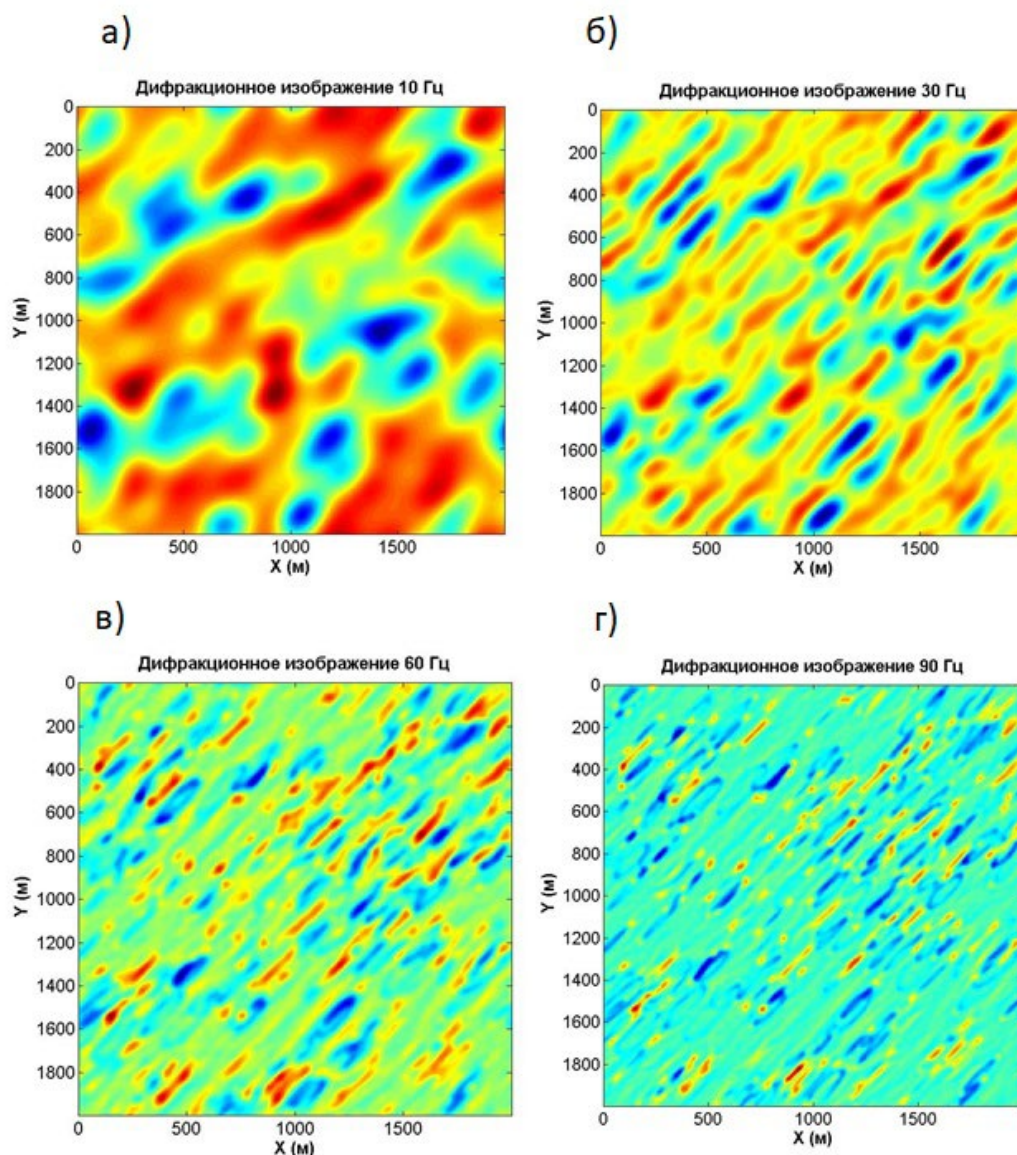


Рис. 2. Дифракционные изображения разных доминирующих частот: а) 10 Гц; б) 30 Гц; в) 60 Гц; г) 90 Гц; для модели трещиноватого коллектора (Рисунок 1б), содержащего только одно семейство магистральных трещин.

Обсуждение и заключение

В рамках данной работы созданы реалистичные разномасштабные синтетические модели зон трещиноватости, описывающие практически значимые геологические модели трещин. Созданы модели для 4 различных классов, содержащих трещины, различные по масштабу, начиная от самых мелких, заканчивая самыми крупными. При этом в рамках каждого из этих классов использовался типичный коллектор с реалистичными, но различными параметрами модели.

Для всех созданных моделей построены синтетические идеальные дифракционные изображения. При этом для каждой модели были построены изображения для нескольких значимых сейсмических диапазонов частот. В итоге получилась обширная база данных изображений и моделей, которая позволяет провести

исследование и получить ответы на вопросы: какие трещины и какие их параметры можно определить по дифракционным изображениям рассеянных волн.

В результаты качественной оценки построенных моделей и изображений сделаны определённые выводы. Извлечение отдельных трещин невозможно, когда максимальная длина семейства трещин меньше длины волны. Частичное извлечение отдельных трещин возможно, когда средняя длина семейства трещин больше длины волны. Извлечение большей части отдельных трещин возможно, когда длины всего семейства трещин больше длины волны.

Благодарности

Данное исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда грант №21-71-20002-П. Результаты работы были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (scc.spbstu.ru).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Епифацев О.Г., Плетенчук Н.С. Трещиноватость горных пород. Основы теории и методы изучения: Новокузнецк: издательство СибГИУ. – 2008. – 41 с.
2. Колюхин Д.Р., Протасов М.И. Статистическое моделирование дискретной системы трещин в сейсмическом диапазоне частот: Вычислительные методы и программирование. – 2018. – Т. 19. – С. 270–281.
3. Ольховатенко В.Е., Трофимова Г.И., Ожогина Т.В., Методы изучения трещиноватости горных пород: Томск: издательство ТГАСУ. – 2015. – 80 с.
4. Protasov M.I., Gadylshin K.G., Tcheverda V.A., Pravduhin A.P. 3D diffraction imaging of fault and fracture zones via image spectral decomposition of partial images: Geophysical Prospecting. – 2019. – V. 65(5). – P. 1256 – 1270.

© М. И. Протасов, 2026

Д. В. Рыжков¹✉, К. Г. Гадильшин¹

Разработка теоретических основ метода волнового обращения времен: анализ регулярности и дифференцируемости оператора обратной динамической задачи сейсмики

¹Институт математики им. С. Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: d.v.ryzhkov@math.nsc.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке теоретических основ метода волнового обращения времен – одного из перспективных подходов к решению обратной динамической задачи сейсмики, основанного на минимизации временных сдвигов между наблюдаемыми и модельными сейсмограммами. Проблема восстановления распределения скорости распространения волн в геологической среде по данным наземной регистрации относится к классу нелинейных некорректных задач и требует строгого математического обоснования применяемых итерационных алгоритмов. Целью исследования является установление свойств регулярности и дифференцируемости оператора, сопоставляющего параметрической модели среды вектор невязок времен первых вступлений. В качестве математической модели волновых процессов используется акустическое приближение, а временные сдвиги определяются через положение максимума взаимной корреляционной функции наблюдаемых и модельных сейсмотрасс. Доказана теорема о существовании, непрерывности и дифференцируемости по Фреше отображения временных невязок в окрестности опорной модели. Получена явная формула для производной этого отображения и выражение для градиента целевого функционала через сопряженный оператор. Результаты закладывают математический фундамент для построения строго обоснованных градиентных методов инверсии времен пробега и их эффективной численной реализации на основе решения сопряженных задач.

Ключевые слова: обратная динамическая задача сейсмики, инверсия времен пробега, дифференцируемость по Фреше

D. V. Ryzhkov¹✉, K. G. Gadylishin¹

Theoretical foundations of the wave-equation traveltime inversion: regularity and differentiability of the seismic inverse dynamic problem operator

¹Sobolev Institute of Mathematics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: d.v.ryzhkov@math.nsc.ru

Abstract. The paper is devoted to the development of the theoretical foundations of the wave-equation traveltime inversion method – one of the promising approaches to solving inverse dynamic problem of seismics, based on minimizing time shifts between observed and modeled seismograms. The problem of recovering the wave velocity distribution in a geological medium from surface registration data belongs to the class of nonlinear ill-posed problems and requires a rigorous mathematical justification of the applied iterative algorithms. The aim of the study is to establish the regularity and differentiability properties of the operator that maps a parametric model of the medium to the vector of first-arrival time residuals. The acoustic approximation is used as the mathematical model of wave

processes, and the time shifts are determined through the position of the maximum of the cross-correlation function of observed and modeled seismic traces. The theorem on the existence, continuity, and Fréchet differentiability of the time-shift mapping in the vicinity of a reference model is proved. An explicit formula for the derivative of this mapping and an expression for the gradient of the objective functional in terms of the adjoint operator are obtained. The results lay a mathematical foundation for the construction of rigorously justified gradient methods of traveltimes inversion and for their efficient numerical implementation based on solving adjoint problems.

Keywords: inverse dynamic problem of seismics, traveltimes inversion, Fréchet differentiability

Введение

В современных задачах сейсморазведки существенное значение приобретает построение высокоразрешающих глубинно-скоростных моделей геологической среды, обеспечивающих адекватную интерпретацию наблюдаемых данных. Одним из наиболее эффективных подходов к решению данной задачи является метод обращения полного волнового поля (Full Waveform Inversion, FWI), позволяющий восстанавливать параметры среды с разрешением порядка длины волны.

Математически задача FWI формулируется как нелинейная задача минимизации функционала невязки между наблюдаемыми и синтетическими данными, как правило, в норме L_2 [1, 2]. В силу высокой размерности параметрического пространства, особенно в трёхмерных постановках, решение данной задачи осуществляется с использованием локальных методов оптимизации градиентного или ньютоновского типа. При этом существенным ограничением является сложная структура целевого функционала, характеризующаяся выраженной мульти-модальностью, что приводит к высокой вероятности сходимости итерационного процесса к локальным минимумам и, как следствие, к получению некорректных решений.

В условиях недостаточности низкочастотной информации и низкого отношения сигнал/шум более устойчивые результаты демонстрируют методы, основанные на использовании кинематических характеристик волнового поля. К их числу относится метод волнового обращения времен (Wave-equation Traveltime Inversion, WTI) [3], являющийся развитием подхода, предложенного в работе [4]. В рамках данного метода минимизируется функционал, основанный на рассогласовании времен пробега волн, определяемом посредством кросс-корреляции наблюдаемых и расчетных волновых полей. Численная реализация WTI близка к классической схеме FWI, однако в процедуре обратного распространения используются временные невязки, что обеспечивает большую устойчивость алгоритма. В отличие от лучевых методов, WTI основан на решении полного волнового уравнения и, следовательно, учитывает волновые эффекты, включая дифракцию и интерференцию, что обеспечивает физическую состоятельность получаемых скоростных моделей.

Настоящая работа посвящена разработке теоретических основ метода волнового обращения времен и включает анализ регулярности и дифференцируемости оператора обратной динамической задачи сейсмологии.

Теория и метод

В качестве математической модели распространения сейсмических волн в работе используется акустическое приближение, в рамках которого среда характеризуется единственным скалярным параметром – скоростью распространения продольных волн $c(x)$. Это приближение позволяет описать волновое поле u^{mod} как решение начально-краевой задачи для классического волнового уравнения. Рассматриваемая прямая задача заключается в моделировании процесса генерации и регистрации сейсмических сигналов в ограниченной пространственной области $\Omega \subset \mathbb{R}^3$ на временном интервале $[0, T]$. Математически она ставится следующим образом:

$$\begin{cases} m(x) \cdot u_{tt}^{mod}(x, t; x_s) - \Delta u^{mod}(x, t; x_s) = s(x, t; x_s), & x \in \Omega, t \in [0, T], \\ u^{mod}(x, 0; x_s) = u_t^{mod}(x, 0; x_s) = 0, \\ u^{mod}|_{\partial\Omega} = 0. \end{cases}$$

Здесь $m(x) = c^{-2}(x) \in C_+^2(\Omega)$ представляет собой квадрат медленности – ключевую физическую характеристику среды, подлежащую восстановлению. Предполагается, что $m(x)$ есть строго положительная и дважды непрерывно дифференцируемая функция в области Ω , то есть $c(x) > 0$. Правая часть уравнения $s(x, t; x_s) \in W_2^2(\Omega \times [0, T])$ описывает источник возмущения, локализованный в точке x_s . Граница области $\partial\Omega$ предполагается принадлежащей классу C^4 , однако данное условие может быть снято, если Ω является параллелепипедом, что типично для многих вычислительных задач. При указанных условиях на коэффициенты и данные задачи решение $u^{mod}(x, t, x_s) \in W_2^2(\Omega \times [0, T])$ существует и единственно. Строгое доказательство этого факта опирается на классические результаты теории смешанных задач для гиперболических уравнений и может быть найдено, например, в [5].

Для формализации процесса восстановления свойств среды введем два функциональных пространства. Пространство моделей M определим как множество допустимых параметров среды: $M = C_+^2(\Omega)$. Пространство данных D определим как множество всех возможных сейсмограмм, зарегистрированных в N_r точках приема x_r , то есть $D = (C([0, T]))^{N_r}$. Это пространство наделяется структурой гильбертова пространства со скалярным произведением, которое для любых двух наборов трасс $u_1, u_2 \in D$ задается как

$$(u_1, u_2)_D = \sum_{r=1}^{N_r} \int_0^T u_1(x_r, t) \cdot u_2(x_r, t) dt.$$

Соответственно, пространство моделей M также снабжается скалярным произведением, индуцированным нормой пространства Соболева $W_2^2(\Omega)$: $(m_1, m_2)_M =$

$(m_1, m_2)_{W_2^2(\Omega)}$. Данный выбор топологий обеспечивает корректность анализа гладкости вводимых далее операторов.

Ключевым элементом математической постановки является оператор прямой задачи $\mathcal{F}$, который каждой модели среды $m(x) \in M$ ставит в соответствие смоделированные данные наблюдений – значения волнового поля в точках расположения приемников x_r :

$$\mathcal{F}: M \rightarrow D, \quad \mathcal{F}m = u^{mod}(x_r, t).$$

Таким образом, $\mathcal{F}$ представляет собой композицию решения начально-краевой задачи и оператора взятия следа на множестве точек. Фундаментальным свойством этого оператора, лежащим в основе всех градиентных методов решения обратной задачи, является его дифференцируемость по Фреше. Это свойство установлено и строго обосновано в работе [6].

Основная цель обратной динамической задачи сейсмологии формулируется как восстановление неизвестного распределения квадрата медленности $m(x) \in M$ по набору зарегистрированных сейсмограмм $u^{obs}(x_r, t)$, которые будем считать элементами подпространства более гладких функций $(C^2([0, T]))^{N_r} \subset D$. Классический подход к решению этой нелинейной некорректной задачи состоит в построении итерационной процедуры уточнения модели, на каждом шаге которой минимизируется некоторый функционал невязки между модельными данными $u^{mod}(x_r, t)$ и наблюдениями u^{obs} .

В настоящей работе в качестве такого функционала используется мера, основанная на разности времен первых вступлений, вычисляемых через взаимную корреляцию волновых форм. Такой подход известен как метод инверсии времен пробега, основанный на волновом уравнении (wave-equation traveltimes inversion [??]). Его идея заключается в переходе от сравнения амплитуд сигналов к сравнению кинематических характеристик, что делает функционал невязки более устойчивым к высокочастотным шумам. Формально метод ищет искомую модель $\tilde{m}(x)$ как решение задачи минимизации:

$$\tilde{m}(x) = \arg \min_{m \in M} J(m) = \arg \min_{m \in M} \left(\frac{1}{2} \sum_{r=1}^{N_r} (\Delta\tau(x_r))^2 \right),$$

где для каждого приемника x_r временной сдвиг $\Delta\tau(x_r)$ между наблюдаемой и модельной трассами определяется как положение максимума функции их кросс-корреляции:

$$\Delta\tau(x_r) = \operatorname{argmax}_{-T \leq \tau \leq T} \int_0^T u^{mod}(x_r, t) \cdot u^{obs}(x_r, t + \tau) dt.$$

В этом определении предполагается, что наблюдаемая трасса $u^{obs}(x_r, t)$ определена нулем вне временного окна регистрации $[0, T]$, что позволяет вычислить интеграл для любого сдвига τ из указанного диапазона. Для корректности данного определения необходимо гарантировать существование и единственность максимума. В этой связи важным является следующее утверждение, обосновывающее корректность определения.

Утверждение. Интеграл, задающий взаимную корреляционную функцию наблюдаемой и смоделированной сейсмотрасс, является непрерывной функцией аргумента сдвига τ на отрезке $[-T, T]$ для любых фиксированных модельной $u^{mod} \in C([0, T])$ и наблюдаемой $u^{obs} \in C([0, T])$ трасс.

Из данного утверждения непосредственно следует, что функция взаимной корреляции достигает своего максимума на компактном множестве $[-T, T]$, что делает определение невязки $\Delta\tau(x_r)$ математически строгим. Единственность максимума, требуемая для однозначности определения сдвига, предполагается как характеристика данных и на практике достигается при надлежащем выборе частотного диапазона и временного окна.

Результаты

Центральным теоретическим результатом работы является установление свойств регулярности и дифференцируемости нелинейного оператора, сопоставляющего модели среды $m(x)$ вектор временных невязок $\Delta\tau$. В отличие от анализа метода наименьших квадратов, где дифференцируемость оператора невязки напрямую наследуется от дифференцируемости оператора прямой задачи $\mathcal{F}$, здесь требуется более тонкий анализ, включающий применение теоремы о неявной функции к условию максимума взаимной корреляции. Основным итогом этого анализа формулируется в виде следующей теоремы.

Теорема. Пусть $m_0 \in M$ – некоторая опорная модель среды. Тогда существует отображение $\mathcal{T}: U \rightarrow \mathbb{R}^{N_r}$, определенное в некоторой окрестности U точки m_0 и ставящее в соответствие каждой модели $m \in U$ вектор временных сдвигов $\Delta\tau$, то есть

$$\mathcal{T}(m) = \Delta\tau.$$

Это отображение является непрерывным в указанной окрестности. Более того, отображение $\mathcal{T}$ дифференцируемо по Фреше в точке m_0 . Его производная в этой точке дается выражением

$$\frac{\delta\mathcal{T}}{\delta m}(m_0)\delta m = - \frac{\int_0^T \frac{\delta\mathcal{F}}{\delta m}(m_0)\delta m \cdot \frac{\partial u^{obs}}{\partial t}(x_r, t + \Delta\tau_0)dt}{\int_0^T \mathcal{F}(m_0) \frac{\partial^2 u^{obs}}{\partial t^2}(x_r, t + \Delta\tau_0)dt}.$$

Доказательство данной теоремы опирается на обобщение классической теоремы о неявной функции на случай отображений в банаховых пространствах [7]. В рамках проведенного исследования было показано, что при наложенных ограничениях на гладкость модели среды и источника вектор-функция условий стационарности

$$F(m, \tau) = \int_0^T \mathcal{F}(m) \cdot \frac{\partial u^{obs}}{\partial t}(x_r, t + \tau) dt$$

является непрерывно дифференцируемой по обеим переменным в окрестности точки $(m_0, \Delta\tau_0)$. Существенным моментом доказательства выступает проверка невырожденности оператора частной производной $F'_\tau(m_0, \Delta\tau_0)$, гарантирующая его обратимость. Условие невырожденности глобального максимума взаимной корреляционной функции для опорной модели m_0 как раз и обеспечивает выполнение этого требования, поскольку вторая производная кросскорреляционного функционала в точке максимума строго отрицательна. При выполнении указанных условий теорема о неявной функции гарантирует существование, единственность, непрерывность и дифференцируемость по Фреше неявно заданного отображения $\mathcal{T}$ в некоторой окрестности точки m_0 .

Доказанная теорема не только обосновывает корректность использования методов градиентного типа для минимизации функционала $J(m)$, но и предоставляет явную формулу для производной отображения $\mathcal{T}$, выраженную через производные операторов, зависящих от решения прямой задачи.

Для удобства анализа функционала обратной задачи введем в рассмотрение конечномерное пространство невязок $Q = \mathbb{R}^{N_r}$ со стандартным евклидовым скалярным произведением:

$$(\tau_1, \tau_2)_Q = \sum_{r=1}^{N_r} \tau_1(x_r) \cdot \tau_2(x_r).$$

В этих обозначениях целевой функционал $J(m)$, определенный как половина суммы квадратов временных невязок, может быть записан как квадрат нормы в пространстве Q :

$$J(m) = \frac{1}{2} \sum_{r=1}^{N_r} (\Delta\tau(x_r))^2 = \frac{1}{2} (\mathcal{T}(m), \mathcal{T}(m))_Q = \frac{1}{2} \|\mathcal{T}(m)\|_Q^2.$$

Используя доказанную дифференцируемость отображения $\mathcal{T}$ и правило дифференцирования сложной функции, для производной Фреше функционала J в точке m_0 получаем выражение, связывающее ее с производной самого отображения $\mathcal{T}$:

$$\frac{\partial J}{\partial m}(m_0) = \left(\frac{\partial \mathcal{T}}{\partial m}(m_0) \right)^* \mathcal{T}(m_0).$$

Здесь $\left(\frac{\partial \mathcal{T}}{\partial m}(m_0) \right)^*$ обозначает оператор, сопряженный к производной Фреше отображения $\mathcal{T}$ в точке m_0 , действующий из пространства невязок Q в сопряженное к M пространство. Эта формула является отправной точкой для построения эффективных вычислительных алгоритмов.

Заключение

В рамках настоящей работы разработаны теоретические основы метода волнового обращения времен, составляющего перспективный класс алгоритмов решения обратных динамических задач сейсмологии. Центральное место в исследовании занял анализ оператора $\mathcal{T}$, ставящего в соответствие распределению квадрата медленности в среде вектор временных сдвигов между наблюдаемыми и модельными сейсмограммами. Показано, что данный оператор определен, непрерывен в окрестности опорной модели и является дифференцируемым по Фреше.

Представленные результаты закладывают строгий математический фундамент для обоснования итерационных процедур минимизации функционала невязки времен первых вступлений. В частности, установленная дифференцируемость оператора невязки позволяет перейти к построению градиентных методов, обладающих гарантированной сходимостью в окрестности точного решения. Полученная формула для градиента целевого функционала как результата действия сопряженного оператора на вектор невязок открывает прямой путь к организации вычислительного процесса на основе решения сопряженных задач для волнового уравнения. Это делает возможным масштабирование метода на реалистичные трехмерные постановки, где явное построение и хранение матрицы производных Фреше практически неосуществимо.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИМ СО РАН (тема FWNF-2026-0018).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tarantola A. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation // *Geophysics*. – 1984. – vol. 49, №8, p. 1259–1266. – doi: 10.1190/1.1441754
2. Virieux J., Operto S. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics // *Geophysics*. – 2009. – vol. 74, №6, p. WCC1–WCC26. – doi: 10.1190/1.3238367

3. Liu L., Duan X., Luo Y. Three-dimensional data-domain full travelttime inversion using a practical workflow of early arrival selection // *Geophysics*. – 2020. – vol. 85, №4, p. U77–U86. – doi: 10.1190/geo2019-0476.1
4. Luo Y., Schuster G. T. Wave-equation travelttime inversion // *Geophysics*. – 1991. – vol. 56, №5, p. 645–653. – doi: 10.1190/1.1443081
5. Ладыженская, О. А. Смешанная задача для гиперболического уравнения. – М. : Гос. изд-во тех.-теорет. лит. (ГИТТЛ), 1953. – 280 с.
6. Natterer F. and Sielschott H. and Dorn O. and Dierkes T. and Palamodov V. Fréchet Derivatives for Some Bilinear Inverse Problems // *SIAM J. Appl. Math.* – 2002. – vol. 62, №6, p. 2092–2113. – doi: 10.1137/S0036139901386375
7. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. – 7-е изд. – М. : Физматлит, 2009. – 572 с.

© Д. В. Рыжков, К. Г. Гадильшин, 2026

Е. Б. Сибиряков^{1,2}✉

Новый метод решения задачи Лэмба и возможности его использования в геофизике

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: sibiryakoveb@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе предложен относительно простой полуаналитический способ нахождения решения задачи Лэмба для двухмерного полупространства. Показано, что используя разложение нагрузки в виде интеграла Фурье и решение уравнения Клейна-Городона, можно получить относительно простую альтернативу методу Каньяра-деХупа. Изложенный алгоритм может использоваться для решения динамических обратных задач, особенно в дифракционной области, а также решения задач малоглубинной сейсморазведки. В дальнейшем этот метод можно использовать для нахождения решения динамической задачи трёхмерной упругости для системы плоских слоёв на полупространстве.

Ключевые слова: краевые задачи, уравнение Клейна-Городона, задача Лэмба, коэффициентные обратные задачи, дифракция

E. B. Sibriakov^{1,2}✉

A new method for solving the Lamb problem and the possibilities of its use in geophysics

¹IPGG SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

²SibSUTIS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: sibiryakoveb@ipgg.sbras.ru

Abstract. A simple semi-analytical method for finding a solution to the Lamb problem for a two-dimensional half-space is proposed. It is shown that by using a Fourier integral decomposition of the traction vector and a solution to the Klein-Gordon equation, a simple alternative to the Cagniard-deHoop method can be obtained. The presented algorithm can be used to solve dynamic inverse problems, especially in the diffraction domain. This method can further be used to find a solution to a dynamic three-dimensional elasticity problem for a system of plane layers in a half-space.

Keywords: boundary value problems, Klein-Gordon equation, Lamb problem, coefficient inverse problems, diffraction

Введение

Нахождение решений динамических упругих волновых задач имеет значение как для геофизики, так и для акустики. В частности, потому, что решения прямых задач используются для нахождения решений коэффициентных обратных задач, конечной целью которых является восстановление свойств среды, включая геометрию отражающих границ раздела. Теория упругости находит взаимосвязь

между нагрузкой, прикладываемой к поверхности (удельная сила) и откликом на эту нагрузку (вектор перемещений). При этом обычно предполагается, что источником поля является импульсный источник, приложенный к верхней свободной поверхности, а коэффициентная обратная задача в классической постановке является некорректной [1].

Различные методы использования лучевого приближения (например AVO - Amplitude Versus Offset), имеют ограничения связанные с длиной волны, так и с тем, что амплитуда отражённого от границы раздела сигнала неизвестна [2]. Идея нахождения свойств упругой среды с использованием результатов измерений как вектора нагрузки, так и вектора перемещений была реализована в [3] с используя обобщённого принципа взаимности. Идея не получила широкого применения, как по причине сложности алгоритма, так и трудностей независимого измерения нагрузок, приложенных к внешней поверхности.

В случае уменьшения длины волны учёт дифракционных эффектов может использоваться как в задачах малоглубинной сейсморазведки [4], так и для вычисления временных сдвигов для вычисления кинематической поправки. В [5] показано, что кинематические свойства отражённых волн отличаются от отражённых и могут быть отфильтрованы в процессе обработки. Однако, классическое дифракционное суммирование (без весовых коэффициентов) приводит к появлению ложных границ. Там же упоминается про попытку решения обратной динамической задачи методом обращения полных волновых полей. Казалось бы, что хотя бы в случае плоских границ раздела для этого можно использовать точные решения динамической теории упругости, например, аналог задачи Лэмба, включающий несколько плоских границ раздела. В этом случае нахождение полного волнового поля сведётся к вычислению интегралов. Однако, полные волновые поля, как правило, вычисляются с помощью метода конечных элементов, либо конечных разностей и требует использования регуляризационных процедур.

В настоящий момент считается, что задача Лэмба решена давно. Как будет показано ниже, в случае достаточно малых временных частот, можно достаточно просто разделить переменные, используя либо представление в виде двойного ряда Фурье, либо в виде интеграла. Однако, в случае высоких частот, экспонента становится комплексной, как и знаменатель Рэлея. Уравнению и граничным условиям удовлетворяет как мнимая, так и вещественная части. Это приводит к тому, что задача становится недоопределённой. Соответственно, просто разделить переменные уже нельзя. Нужно обращать преобразование Лапласа (либо Фурье), что является нетривиальной задачей в двухмерном случае и очень сложной в трёхмерном. В [6] отмечено, что что обратить полученные интегральные представления оказалось весьма непросто. В случае произвольной зависимости от времени замкнутое решение было получено в пространстве изображений, точнее, решение на поверхности было представлено в виде несобственного интеграла от некоторой алгебраической функции. Главная трудность в вычислении этого интеграла в том, чтобы правильно построить контур интегрирования, используя метод Каньяра-деХупа (Cagniard-DeHoop), изложенный в [7]. В этом

случае получаются очень громоздкие решения. Альтернатива, упомянутая в [6] – использование многократного изменения порядка интегрирования совместно с функционально-инвариантными решениями Смирнова – Соболева. Там же упомянуто о возникновении на поверхности не только волн Рэлея, но также продольных и поперечных волн. Таким образом, эти достаточно сложные решения не позволяют обобщить существующий метод решения задачи Рэлея на случай слоя на полупространстве. Если найти альтернативу этим сложным методам решения, то это откроет возможность найти полуаналитическое решение для плоского слоя на полупространстве. В случае криволинейной границы раздела эти решения можно будет использовать в качестве ядер, аналогично [8].

Задача Лэмба

Уравнений динамической теории упругости имеют вид:

$$\mu \Delta U_i + (\lambda + \mu) \text{grad}_i(\text{div} \mathbf{U}) = \rho U_{i,tt} \quad (1)$$

где λ, μ – упругие модули, ρ – плотность, U_i – компоненты вектора перемещений, порождённого нормальной нагрузкой на плоской свободной поверхности. Граничные условия на поверхности – нулевая касательная нагрузка ($\sigma_{12}(0, x, t) = 0$) и нормальная нагрузка с достаточно широким единичным спектром, которую можно представить в виде интеграла Фурье. Будем искать аналитическое решение в виде двух функций (в трёхмерном случае их будет три), аналогично [9]. Эти функции выбираются так, чтобы каждая из них удовлетворяла системе уравнений (1), а их сумма – условиям на границе полупространства:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \varphi_{zz}^p \\ \varphi_{zx}^p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\varphi_{xx}^s \\ \varphi_{zx}^s \end{bmatrix} \quad (2)$$

Нижние индексы – частные производные по координатам z (вертикальная) и x – горизонтальная. Граница полупространства ($z = 0$). Для того, чтобы удовлетворять системе (1) эти функции должны удовлетворять волновым уравнениям:

$$\Delta \varphi^s = \frac{1}{C_s^2} \varphi_{tt}^s \quad (3)$$

$$\Delta \varphi^p = \frac{1}{C_p^2} \varphi_{tt}^p \quad (4)$$

при этом есть $C_p^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}$; $C_s^2 = \frac{\mu}{\rho}$ – объёмные скорости волн. Перемещения вызваны нагрузкой. Нормальную компоненту вектора нагрузки, не уменьшая общности, будем считать дважды чётной, и обладающей единичным спектром в достаточно широком диапазоне частот. Её можно задать на поверхности в виде интеграла:

$$p_1 = \int_0^{\infty} d\omega \int_0^{\infty} \hat{p}_{1ee}(k_x, \omega) \cos(t\omega) \cos(k_x x) dk_x \quad (5)$$

Если представить эти функции в виде разложения Фурье по координате, то получим уравнения Клейна-Гордона. Например, (4) даёт следующее уравнение:

$$\hat{\phi}_{zz}^p - \frac{1}{C_p^2} \hat{\phi}_{tt}^p - j^2 \hat{\phi}^p = 0 \quad (6)$$

Это уравнение имеет характеристики:

$$\xi = t - \frac{z}{C_p}; \eta = t + \frac{z}{C_p} \quad (7)$$

В характеристических переменных (7) уравнение (6) имеет вид:

$$\frac{\hat{\phi}_{\xi\eta}^p}{\hat{\phi}^p} = -\frac{k_x^2 C_p^2}{4} \quad (8)$$

Ищем решение в виде, допускающим разложение в ряд Фурье или представление в виде интеграла:

$$\hat{\phi}^p = e^{i\frac{k_x C_p}{2}(\alpha\xi + \beta\eta)} \quad (9)$$

Подстановка (9) в (8) даёт соотношение параметров: $\alpha\beta = 1$, следовательно

$$\hat{\phi}^p(z, k_x, t) = e^{i\frac{k_x C_p}{2}(\alpha\xi + \frac{\eta}{\alpha})} \quad (10)$$

Если $z = 0$, то $\xi = \eta = t$. Это даёт возможность вычислить параметр α .

$$\begin{aligned} & \frac{k_x C_p}{2\alpha} \\ &= \frac{\omega \mp \sqrt{\omega^2 - (k_x C_p)^2}}{2} \end{aligned} \quad (11)$$

Это означает, что (9) имеет вид:

$$\begin{aligned} \hat{\phi}^p(z, k_x, t) = & A \cos\left(\frac{1}{2}\left(\xi\omega \pm \xi\sqrt{\omega^2 - (k_x C_p)^2}\right) + \eta\omega \mp \eta\sqrt{\omega^2 - (k_x C_p)^2}\right) \\ & + B \sin\left(\frac{1}{2}\left(\xi\omega \pm \xi\sqrt{\omega^2 - (k_x C_p)^2}\right) + \eta\omega \mp \eta\sqrt{\omega^2 - (k_x C_p)^2}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

В результате мы получаем связь между временем и вертикальной переменной. При этом знак «минус» соответствует волне, отражённой от нижнего слоя. Таким образом, для полупространства получается следующая зависимость. Если $\omega > k_x C_p$, то

$$\begin{aligned}\hat{\phi}^p(z, k_x, t) = \\ = A \cos\left(t\omega - \frac{z}{C_p} \sqrt{\omega^2 - (k_x C_p)^2}\right) \\ + B \sin\left(t\omega - \frac{z}{C_p} \sqrt{\omega^2 - (k_x C_p)^2}\right); \omega > k_x C_p\end{aligned}\quad (13)$$

Для другой частотной области ($\omega < k_x C_p$) получается классическая экспонента:

$$\hat{\phi}^p(z, x, t) = \exp\left(-\frac{z}{C_p} \sqrt{\omega^2 - (k_x C_p)^2}\right) (A \cos(t\omega) + B \sin(t\omega)) \quad (14)$$

Введём обозначения: $v_p = \sqrt{|\omega^2 - (k_x C_p)^2|}$; $v_s = \sqrt{|\omega^2 - (k_x C_s)^2|}$; $k^2 = \frac{\omega^2}{C_s^2}$

Теперь в этих же обозначениях можем вычислить нагрузки, используя (2) и связать нагрузки с перемещениями, то есть решить задачу.

$$\frac{\hat{\sigma}_{11}}{2\mu} = \left(k_x^2 - \frac{k^2}{2}\right) \hat{\phi}_z^p + k_x^2 \hat{\phi}_z^s \quad (15)$$

$$\frac{\hat{\sigma}_{12}}{2\mu} = \hat{\phi}_x^p (k_x^2 - \gamma^2 k^2) + \hat{\phi}_x^s \left(k_x^2 - \frac{k^2}{2}\right) \quad (16)$$

Перемещения с этими же функциями связаны следующим образом:

$$\hat{U}_1 = -\frac{\hat{\sigma}_{12}}{2\mu k_x} + \frac{k^2}{2} \hat{\phi}^s \quad (17)$$

$$\hat{U}_2 = -\frac{\hat{\sigma}_{11}}{2\mu k_x} - \frac{k^2 \hat{\phi}_z^p}{2k_x} \quad (18)$$

Можно отметить три интересных момента. Первые слагаемые в (17-18) – не волновые. На свободной поверхности они представляют из себя не что иное, как первообразные от соответствующих нагрузок. Они несут никакой информации о внутренней структуре среды. И будут одинаковыми при любой внутренней геометрии структур. Поэтому при изучении волновых явлений эти слагаемые желательно просто вычесть из данных измерений. Второе. Несмотря на свою кажущуюся бесполезность, эти слагаемые могут быть выделены и использованы для

вычисления эффективной нагрузки. Третье. В плоскопараллельной среде напряжённое состояние таково, что нормальные компоненты напряжений много больше касательных. Это значит, что при скачкообразном уменьшении модуля сдвига выделившаяся энергия будет расходоваться прежде всего на осуществление касательных перемещений вдоль границы раздела. Получится что-то похожее на дипольный сдвиг. Это может быть использовано для объяснения механизмов возникновения землетрясений.

Теперь задача сводится к решению системы уравнений, которые будут разными в разных областях временных частот. Приведём решения для нормальной компоненты вектора перемещений на свободной поверхности. В области $\omega < k_x C_s$ решение следующее:

$$\left(k_x^2 - \frac{k^2}{2}\right)^2 - k_x^2 \frac{v_s}{C_s} \frac{v_p}{C_p} = Ra \quad (19)$$

$$U_1 = \int_0^\infty d\omega \int_0^\infty \frac{k^2}{2\pi^2} \frac{\hat{p}_{1ee}(k_x, \omega) \frac{v_p}{C_p}}{Ra} \cos(t\omega) \cos(k_x x) dk_x \quad (20)$$

В случае $k_x C_p > \omega > k_x C_s$ решение имеет следующий вид:

$$\left(\left(k_x^2 - \frac{k^2}{2}\right)^4 + k_x^4 \frac{v_s^2}{C_s^2} \frac{v_p^2}{C_p^2}\right) = Ra_2 \quad (21)$$

$$U_1 = \int_0^\infty d\omega \int_0^\infty \frac{k^2}{2\pi^2} \frac{\hat{p}_{1ee}(k_x, \omega) \frac{v_p}{C_p} \left(\left(k_x^2 - \frac{k^2}{2}\right)^2 \cos(t\omega) - k_x^2 \frac{v_s}{C_s} \frac{v_p}{C_p} \sin(t\omega)\right)}{Ra_2} \cos(k_x x) dk_x \quad (22)$$

В случае высоких временных частот $\omega > k_x C_p$ решение следующее:

$$\left(\left(k_x^2 - \frac{k^2}{2}\right)^2 + k_x^2 \frac{v_s}{C_s} \frac{v_p}{C_p}\right) = Ra_1 \quad (23)$$

$$U_1 = - \int_0^\infty d\omega \int_0^\infty \frac{k^2}{2\pi^2} \frac{\hat{p}_{1ee}(k_x, \omega) \frac{v_p}{C_p}}{Ra_1} \sin(t\omega) \cos(k_x x) dk_x \quad (24)$$

Результаты вычислений

Нормальная компонента нагрузки, заданная на свободной поверхности двумерного упругого полупространства с параметрами $\lambda = \mu = \rho$, являющаяся

конечным аналогом импульсной с частотами $\omega \in (0.01; 2\pi)$, $k_x \in (0.01; 2\pi)$ представлена на рисунке 1:

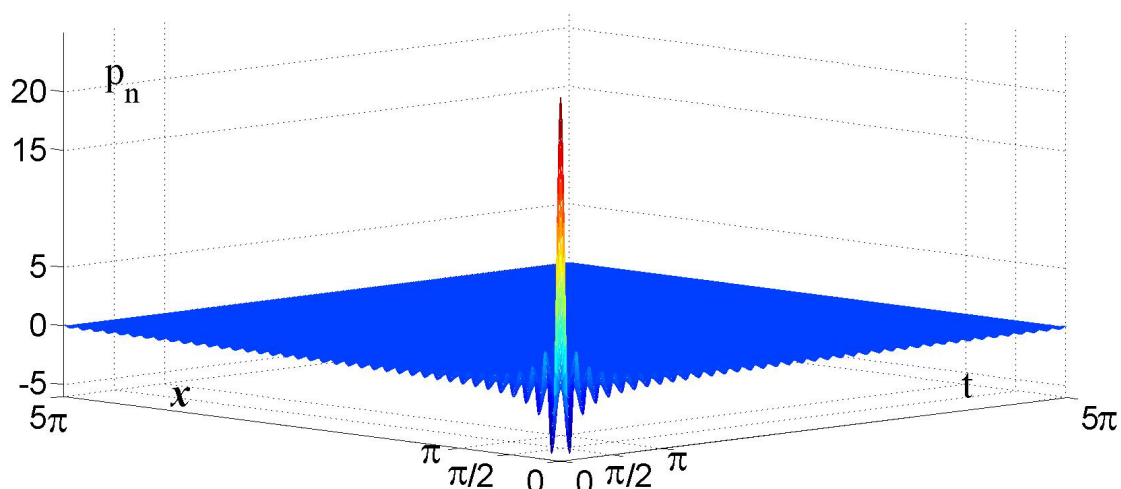


Рис. 1. Нормальная компонента вектора нагрузки, приложенная к свободной поверхности двумерного полупространства.

Поскольку большая часть энергии, приложенной к полупространству в результате действия нагрузки, перейдёт в энергию волн Рэлея, нормальную компоненту нагрузки имеет смысл представить в виде трёх рисунков, соответствующих суммированию в трёх частотных областях, $\omega < k_x C_s$, $k_x C_p > \omega > k_x C_s$, $\omega > k_x C_p$, для того, чтобы в области высоких частот увидеть волны с амплитудой, меньшей амплитуды волны Рэлея. На рисунке 2 представлена нормальная компонента вектора перемещений в первой частотной области.

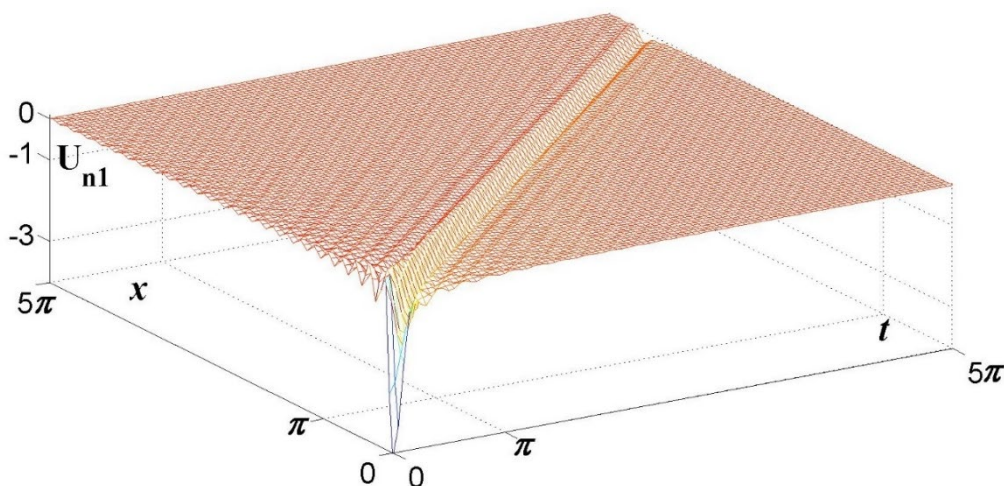


Рис. 2. Нормальная компонента вектора перемещений на свободной поверхности двумерного полупространства, полученная суммированием в диапазоне частот $\omega < k_x C_s$.

При этом на рисунке 2, отчётливо видна волна, бегущая со скоростью поверхностной волны Рэлея, являющаяся результатом вычисления интеграла (20). На рисунке 3 представлена та же компонента вектора вычисленная с помощью (22). На рисунке видны две волны, распространяющиеся со скоростями поперечной и продольной волн соответственно. Волны Рэлея в этом частотном диапазоне нет.

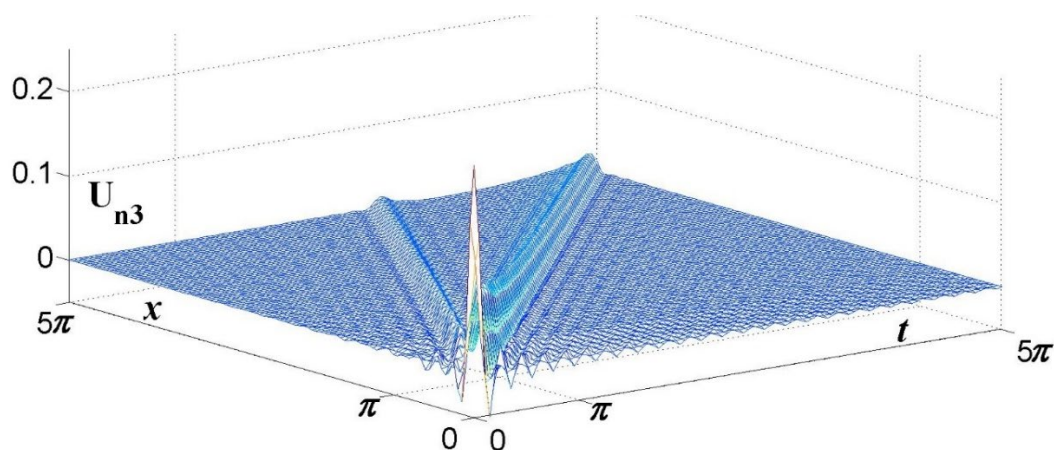


Рис. 3. Нормальная компонента вектора перемещений на свободной поверхности двумерного полупространства, полученная суммированием в диапазоне частот $k_x C_p > \omega > k_x C_s$.

На рисунке 4 представлена та же компонента вектора вычисленная по формуле (24). На рисунке видны только малоамплитудная волна, распространяющаяся со скоростью продольной волны. В этом частотном диапазоне на поверхности нет ни поперечных волн ни волн Рэлея.

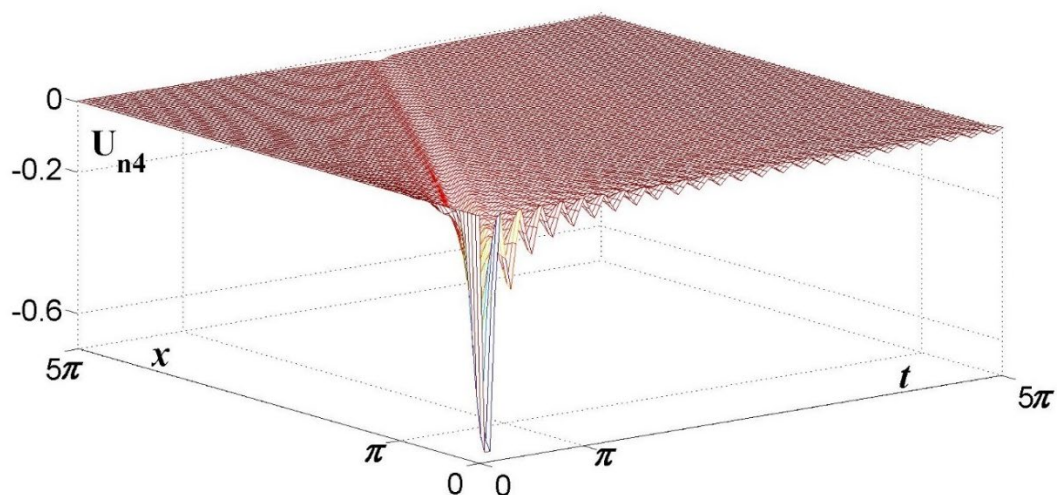


Рис. 4. Нормальная компонента вектора перемещений на свободной поверхности двумерного полупространства, полученная суммированием в диапазоне частот $k_x C_p < \omega$.

Полное поле перемещений будет суммой перемещений, представленных на рисунках 2-4. По-видимому, для выделения и подавления различных типов волн имеет смысл разделять поле перемещений на три слагаемых, полученных суммированием в упомянутых выше частотных областях.

Заключение

В работе предложен относительно простой полуаналитический способ нахождения решения задачи Лэмба для двухмерного полупространства. Показано, что используя представление вектора нагрузки в виде интеграла Фурье и решение уравнения Клейна-Городона, можно получить относительно простую альтернативу методу Каньяра-деХупа, подробное изложение использования которого для двухмерного случая изложено в [10]. В [6] показано, что результатом аналитического решения задачи Лэмба будет появление на поверхности являющиеся волн Рэлея, а также продольных и поперечных волн. В данной работе этот факт подтверждается. Волн с иными скоростями на поверхности полупространства не обнаружено. Однако, показано также, что поле перемещений можно разбить на три слагаемых путём разбиения временной области интегрирования на три части, суммирования по которым дают разные типы волн. Следовательно, можно выбрать частотную область, где будет волна только одного типа. Формулы, получаемые в результате классического аналитического решения задачи Лэмба являются очень громоздкими даже в двухмерном случае. По этой причине получить решение задачи для слоя на полупространстве представляет собой отдельную проблему. Предложенный в работе алгоритм даёт возможность получить в достаточно простом виде аналитическое решение в спектральной области, что сводит задачу к вычислению двухмерных сингулярных интегралов от вещественных функций с одной интегрируемой особенностью. Поэтому предложенный в работе алгоритм может быть использован для получения решения для слоя на полупространстве, в том числе и в трёхмерном случае, что может использоваться для решения динамических обратных задач, особенно в дифракционной области, а также задач малоглубинной сейсморазведки.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНГГ СО РАН, при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FWZZ-2026-0050).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кабанихин С.И. Обратные и некорректные задачи. Учебник для студентов высших учебных заведений. Новосибирск. Сибирское научное издательство, 2009, 457 с.
2. Разин А.В., Меркулов В.П., Чернов С.А. Применение геофизики при изучении месторождений нефти и газа. Томск: Центр профессиональной переподготовки специалистов нефтегазового дела. ТПУ, 204. – 332 с.
3. Ватульян А.О., Гукасян Л.С., Недин Р.Д. // О задачи Коши в теории коэффициентных обратных задач для упругих тел // Владикавказский математический журнал. – 2016, Т.18, Выпуск 2, С. 31-40.

4. Удоратин В. В., Магомедова А. Ш., Езимова Ю. Е., Зелионко А. В. Применение малоглубинной сейсморазведки на объектах Среднего Тимана // Вестник геонаук. 2025. 11(371). С. 33—41. DOI: 10.19110/geov.2025.11.4
5. Е.И. Ланда. Роль дифракционной компоненты волнового поля при построении сейсмических изображений // Технологии сейсморазведки, № 1, 2013, с. 5–31
6. С. В. Кузнецов, Е. О. Терентьева. Плоская внутренняя задача Лэмба. Волны в эпицентральной зоне от вертикального силового источника // Акустический журнал. 2015, Т. 61, № 3. с. 387-399.
7. Kazumi Watanabe. Integral Transform Techniques for Green's Function // Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Volume 71, Springer International Publishing Switzerland January 2014, DOI: 10.1007/978-3-319-00879-0, ISBN: 978-3-319-00878-3
8. Сибиряков Е.Б. Использование метода граничных элементов с гладкими ядрами для решения граничных задач упругих стационарных колебаний. Интерэкспо ГЕО-Сибирь - XIX Международный научный конгресс. Международная научная конференция "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 8 т. (г. Новосибирск, 17-19 мая 2023 г.) – СГУГиТ – Новосибирск – том Т. 2 – № 3 – С. 276-284 – 2023
9. Е.Б. Сибиряков. О детектировании шероховатых границ. Физическая мезомеханика, Т.20, №6, Томск, 2017, с.98-104
10. Д.В. Перегудов. Двумерная задача Лэмба. Метод Каньяра. Вычислительная сейсмология. Вып. 31, 2000., с.120-137.

© Е. Б. Сибиряков, 2026

В. М. Соловьев¹✉, В. С. Селезнев², А. Ф. Еманов¹, А. А. Еманов¹, С. А. Елагин¹, Н. А. Галева¹

К использованию динамических характеристик волновых полей при вибромониторинге среды с мощными вибраторами

¹Алтае-Саянский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Сейсмологический филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: solov@gs.sbras.ru

Аннотация. Приведены результаты исследований характеристик излучения 40-тонного вибратора на Быстровском полигоне и волновых полей в дальней зоне в разные временные периоды. Показана повышенная чувствительность динамических параметров (по сравнению с кинематическими) при сезонных изменениях характеристик верхней части разреза как под виброисточником, так и в районе приемных станций. Описан подход по использованию динамических параметров при анализе рядов вибромониторинга. По результатам трехлетних режимных вибросейсмических наблюдений 2022-2024 гг. в районе угледобывающих разрезов Колыванский и Восточный в Горловской впадине выявлены вариации отношений амплитуд продольных волн на с/ст «Елбаш» в районе разрезов и опорной с/ст «Новосибирск», коррелирующие с графиком разности продольных волн на этих сеймостанциях.

Ключевые слова: вибратор ЦВ-40, вибромониторинг, амплитуды, ряды наблюдений

V. M. Solovyev¹✉, V. S. Seleznev², A. F. Emanov¹, A. A. Emanov¹, S. A. Elagin¹, N. A. Galeva¹

On the use of dynamic characteristics in vibration monitoring of environments with powerful vibrators

¹Altai–Sayan Branch of the FRC UGS RAS, Novosibirsk, Russian Federation

²Seismological Branch of the FRC UGS RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: solov@gs.sbras.ru

Abstract. The research results on the radiation characteristics of a 40-ton vibrator at the Bystrovsky test site and wave fields in the far zone during different time periods are presented. Increased sensitivity of dynamic parameters (compared to kinematic ones) is shown with seasonal changes in the characteristics of the upper part of the geological section, both under the vibration source and in the vicinity of the receiving stations. An approach for using dynamic parameters in the analysis of vibration monitoring data for probed objects is described. Based on the results of three years of continuous vibroseismic observations from 2022-2024 in the area of the Kolyvansky and Vostochny coal mining pits in the Gorlovskaya depression, variations in the amplitude ratios of longitudinal waves at seismic station "Elbashi" near the pits and the reference seismic station "Novosibirsk" have been identified. These variations correlate with the difference in longitudinal waves at these seismic stations.

Keywords: CV-40 vibrator, vibration monitoring, amplitude, observation series

Введение

В 21-ом тысячелетии в связи с значительным развитием аппаратурно-технологического сопровождения существенно возрос объем мониторинговых геофизических исследований в зонах сейсмических активизаций, ответственных объек-

тов (ГЭС, АЭС, ГХК и др.), районах нефтегазодобычи, разработки угольных и рудных месторождений, искусственных водохранилищ. В качестве источников, наряду с землетрясениями, в ряде технологий применяется просто накопление сейсмического шума. Ограничение этих методов мониторинга связано с нестабильностью источников, в первом случае, и значительным временем накопления, во втором. В этом плане определенные надежды исследователей связываются с развитием вибрационных технологий с высокой стабильностью вибрационных воздействий при мониторинге напряженного состояния массивов в зонах сейсмических активизаций [1, 2, 9, 11].

Ниже представлены результаты экспериментов по режимным вибросейсмическим наблюдениям в северо-западной части Алтае-Саянского региона, показаны возможности и ограничения вибромониторинга в условиях Сибири, а также расширения информативных параметров за счет привлечения динамических характеристик зондируемых сигналов.

О возможностях вибромониторинга зон сейсмических активизаций

Ряд экспериментов в летнее время в районе Быстровского вибросейсмического полигона показывали на высокую стабильность повторных сеансов на удалении 50 км от вибратора ЦВ-40 в течение нескольких дней, достигающую по кинематике в 0.001 с [9]. Анализ графиков разности времен продольной волны от повторных сеансов (с перерывом в 6-8 часов) за длительный период мониторинговых наблюдений с 2007 по 2024 гг. показывает, что средние значения отклонений (по модулю) также составляют ~0.001-0.002 с, а единичные, практически не более ± 0.005 -0.01 с. Наблюдения выполнялись на с/ст «Новосибирск» в стационарном павильоне (на 3-х компонентных сейсмоприемниках, установленных на постаменте на коренных породах) в северо-западной части Алтае-Саянского региона с слабой сейсмической активностью, где отсутствует вероятность значительных изменений упругих характеристик земной коры.

Какие могут быть реальные изменения значений упругих параметров горных пород в зонах подготовки и разгрузки землетрясений и соответствующие им вариации времен пробега волн, просвечивающих очаги, однозначно сказать в настоящее время сложно. Несмотря на многочисленные попытки в прошлом как предсказать землетрясения, так и оценить точное значение прогнозных параметров, сделать это пока не удастся. На основании многочисленных публикаций 1970-1990 годов по данным наблюдений в Китае, Японии, Таджикистане (Гармский район), США (Калифорния), Россия до сильного землетрясения (от нескольких месяцев до несколько лет) отмечено было уменьшение значений соотношения скоростей V_p/V_s в ряде случаев на величину до 18% [3, 5, 6], а сами величины скоростей Р- и S-волн могут изменяться соответственно на 4.6% и 4.3% [3, 6]. В ряде других исследований, в том числе и современных с использованием искусственных источников (пневмоисточников и вибрационной системы АКРОСС) и взрывов, либо не были получены значимые вариации скоростей упругих волн, либо изменения составляли в пределах 1% от значений скорости [4, 11]. Соответственно сами временные вариации на 5-10-ти километровую зону

землетрясения с магнитудой ~ 6.0 могут составлять для Р-волн около 0.008-0.015 с, что представляет крайне малую величину для обнаружения даже при использовании искусственных источников при мониторинге. Реально, как отмечалось выше, значимые вариации могут быть еще меньше или отсутствовать. Так по результатам трехлетних вибропросвечиваний по трассе распространения 100 тонный вибратор-сейсмостанция Тырган через высокосейсмичную Байкальскую рифтовую зону (где в год в среднем происходит до 10 000 землетрясений с магнитудой до 6.0) исследователями [2] выделен тренд в вариациях времен вступления, составляющий всего величину 0.6–0.7 мсек/год; безусловно, он не представляется значимым, поскольку практически на порядок меньше надежного установленной при многолетних наблюдениях на Быстровском полигоне точности вибромониторинга в 0.001-0.002 с [9].

Ограничения вибромониторинга в условиях Сибири и способы повышения его информативности

Проведенные ранее эксперименты с вибраторами ЦВМ-100 и ЦВ-40 [8, 10] показали сильную сезонную зависимость характеристик излучения вибратора, когда сильно меняются упругие параметры среды под виброисточником (промерзание, оттаивание, обводнение...). В ряде полевых экспериментов на опорных профилях в зоне вечной мерзлоты было показано, что в условиях неоднородной верхней части разреза (зоне ВЧР) даже в относительно стабильный летний период характеристики излучения меняются даже при повторных экспериментах в течение дня [7, 8]. Для «полноценного» мониторинга необходимо знать и учитывать (исключать) вариации характеристик в ближней зоне источника и приемника, оставляя вариации параметров волнового поля в просвечиваемой среде. Для исключения сезонных изменений в районе виброисточника при режимных вибросейсмических наблюдениях анализируется разность времен прихода двух волн, например Р-и S-волн на одной коррелограмме, как это показано в [1], либо двух продольных волн, регистрируемых от вибратора на опорной сейсмостанции в стороне от просвечиваемого объекта и станциях в пределах зоны просвечивания [1, 10]. Так при вибромониторинге земной коры Горловского угленосного бассейна (рис. 1) в качестве прогнозного параметра достаточно эффективным оказалось использование разности времен регистрации продольных волн на опорной станции «Новосибирск» (NVS) вдали от разрезов и данных станции «Елбаши» (KLV01) в пределах угольных разрезов с хорошим качеством материалов [10].



Рис. 1. Схема режимных вибросейсмических исследований в районе угледобывающих разрезов Колыванский и Восточный. На врезке – эпицентры землетрясений в районе Горловской впадины в 2022-2024 гг.

Наряду с кинематическими характеристиками при мониторинге необходимо использовать дополнительные параметры и, прежде всего, высокочувствительную к изменениям в среде динамику волн (вариации амплитуд, поляризацию и др.). Ранее изменения динамических параметров связывались, главным образом, с изменениями в районе источника [8, 10]. Как сильно влияет изменение характеристик верхней части разреза в районе приемников в течение года на динамику волн практически не рассматривалось. Ниже рассмотрены примеры динамической повторяемости волновых полей от вибратора ЦВ-40 как в стабильные периоды, так и в межсезонье, в том числе на разных станциях.

На рисунке 2А приведены примеры июньских и октябрьских суточных повторных сеансов на сейсмостанции «Новосибирск» (NVS).

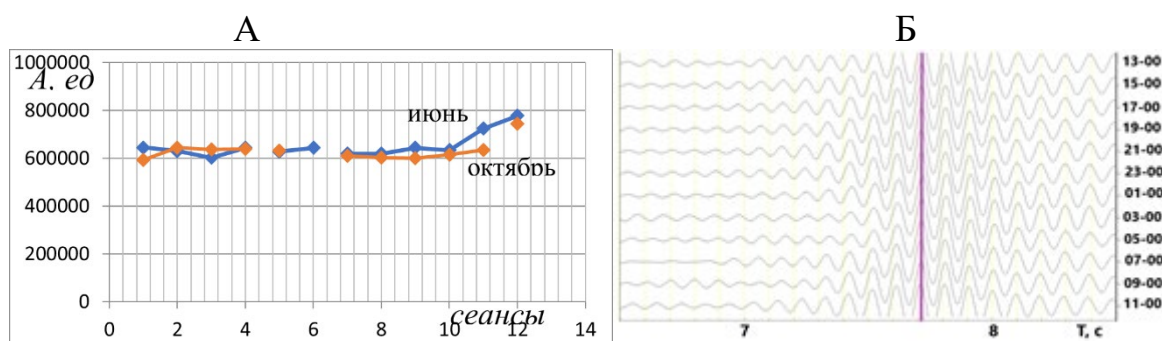


Рис. 2. Графики максимальных амплитуд продольной преломленной волны при суточном мониторинге на сейсмостанции NVS 21-22 июня и 12-13 октября 2023 года (А) и коррелограммы от вибратора ЦВ-40 на сейсмостанции NVS 21-22 июня 2023 года

Из графиков на рисунке 2А следует, что средние отклонения амплитуд (без учета скачков амплитуд на 11-12 сеансах, что обусловлено включением в резонанс более толстого слоя из-за большого поступления тепла под вибратор [10]) составляют 15000-20000 единиц, или 2.5-3% от средней амплитуды.

Эти, в целом небольшие, колебания амплитуд связаны с физическими процессами в самой верхней низкоскоростной части разреза при работе и простое вибратора. Времена максимумов амплитуд при суточном мониторинге практически не меняются (рис. 2Б), что согласуется с ранее проведенными экспериментами на повторяемость вибрационных сеансов в течение нескольких дней [9].

Сезонные колебания амплитуд более значительные и изменяются в 4-5 раз и более от максимальной амплитуды в годовом мониторинге (рис. 3).

Из графиков на рисунках 3А и 3Б по данным со станции NVS отчетливо виден достаточно близкий спад амплитуд (~800000-900000 ед.) в период после оттаивания грунта (весна-лето) до промерзания (осень-зима). Для станции KLV01 в эти периоды (в разные годы) также близкие зависимости (~1400000-2000000 ед.), однако сам наклон графиков в два раза сильнее, чем на станции NVS.

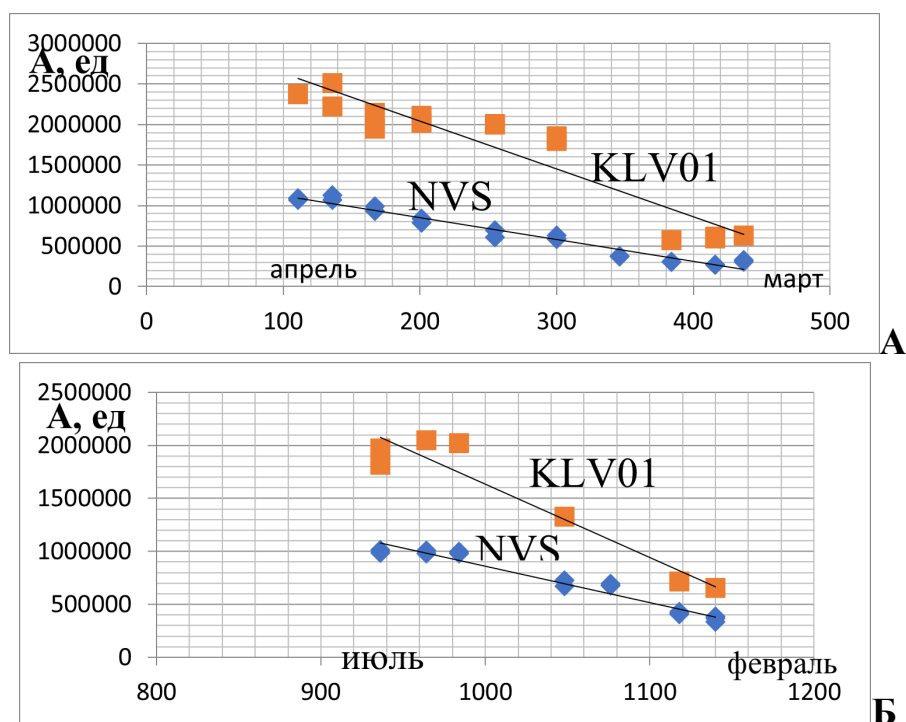


Рис. 3. Графики максимальных амплитуд продольных волн при режимных наблюдениях на сейсмостанциях NVS и KLV01 в 2022-2023 гг. (А) и 2024-2025 гг. (Б)

Поскольку данные получены от одного источника на близких расстояниях и по близкому азимуту (рис. 1), можно считать сезонные изменения в источнике

для обоих графиков одинаковыми, а все расхождения отнести за счет условий приемных станций.

Более стабильные, не подверженные влиянию сезонных изменений, условия приема обеспечены в термостатированном павильоне с/ст «Новосибирск» (NVS) с датчиками на постаменте на кристаллических породах. На станции «Елбаши» (KLV01) приемники находятся в осадочном слое Горловской впадины, низкоскоростная верхняя часть которой более подвержена условиям промерзания и оттаивания. В этом плане с/ст KLV01 представляется более «чувствительной» к локальным изменениям в среде под сейсмоприемниками, чем сейсмостанция NVS, которую при мониторинге можно принимать как опорную точку.

Временные изменения на станциях NVS и KLV01 в эти периоды не превышали 2-3% от полного времени пробега [10].

Результаты выполненных круглогодичных экспериментов в ближней и дальней зоне виброисточника ЦВ-40 показывают:

- сезонные изменения в среде под вибратором приводят к более сильному изменению динамических характеристик регистрируемых волновых полей в ближней и дальней зоне, по сравнению с вариациями кинематических параметров;

- сильные сезонные изменения в амплитудах регистрируемых сигналов происходят и из-за изменений характеристик условий приема, причем более сильные при размещении станций в низкоскоростных осадочных породах, по сравнению со станциями на высокоскоростных грунтах.

В этой связи, для выявления незначительных изменений упругих характеристик в просвечиваемой среде, где для их обнаружения «чувствительности кинематики» недостаточно, может оказаться более эффективным использование при анализе рядов вибромониторинга динамических параметров.

Необходима разработка методики использования вариаций динамических параметров для выявления незначительных изменений в среде при вибромониторинге слабоактивных сейсмогенных зон.

Ниже, на рисунке 4, представлен пример одного из подходов разрабатываемой методики, заключающийся в сравнительном анализе вариаций кинематических и динамических параметров с использованием рядов вибромониторинга в опорной точке (с/ст NVS, рис. 1) и в районе объекта просвечивания (с/ст KLV01 в районе угледобывающих разрезов Колыванский и Восточный, рис. 1).

На рисунке 4А (представленного ранее в работе [10]) на графике разности времен продольных волн на сейсмостанциях KLV01 и NVS выделяется минимум в конце 2023 года и начале 2024 года перед ощутимым землетрясением с магнитудой $M_L=4.7$ в северном окончании Колыванского разреза (рис. 1); для этого периода отмечено также уменьшение примерно в 2 раза количества зарегистрированных землетрясений и повышение суммарной энергии [10].

При анализе динамических параметров (рис. 4Б) рассматривались отношения амплитуд на станции KLV01 и NVS, что, как и при построении кинематических

графиков разности времен прихода продольных волн, позволяет убрать сильные сезонные изменения амплитуд в районе виброисточника.

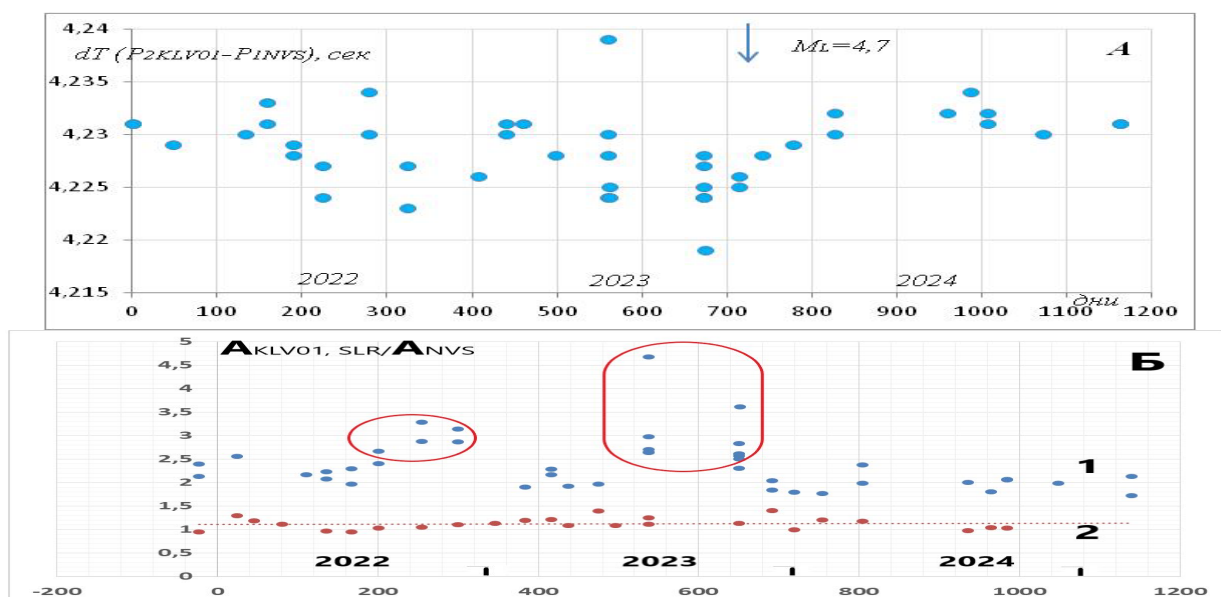


Рис. 4. К сравнительному анализу вариаций кинематических (А) и динамических (Б) параметров при вибромониторинге угледобывающих разрезов Горловской впадины. 1, 2 – графики отношений амплитуд на станциях KLV01 и NVS и «Салаир» и «Новосибирск»

Для сравнения рассматривался также график отношения амплитуд на станциях «Салаир» (SLR) и «Новосибирск» (NVS), удаленных на значительных расстояниях от угольных разрезов Колыванский и Восточный. Значения отношений амплитуд в анализируемый период мониторинга в 2022-2024 гг. на данном графике значительно не меняются и практически не превышают 1.1-1.3 при средних значениях 1.1-1.2; на графике отношений амплитуд для с/ст KLV01 и NVS явно выделяются два максимума с значениями >2.5 при средних значениях 2.1-2.2. Центральный максимум фактически совпадает с выделенным минимумом на графике разности времен в конце 2023 года (рис. 4А). С большей вероятностью выявленная корреляция не случайна; повышение амплитуд в этот период на станции KLV01 может быть также связано с повышением скорости упругих волн в верхней части земли в районе Колыванского разреза перед землетрясением с магнитудой 4.7, которое произошло под воздействием уплотнения пород при широкомасштабных угледобывающих разработках.

Локальный максимум амплитуд во второй половине 2022 года пока объяснить затруднительно; хотя на графике разности времен здесь также отмечено некоторое уменьшение (рис. 4А).

Заключение

По результатам круглогодичных экспериментов в ближней и дальней зоне виброисточника ЦВ-40 (на Быстровском полигоне) установлена повышенная

чувствительность динамических параметров (по сравнению с кинематическими) при сезонных изменениях характеристик верхней части разреза по трассе мониторинга; это диктует необходимость их использования при анализе рядов вибромониторинга просвечиваемых объектов.

По результатам режимных вибросейсмических наблюдений в районе разрезов Колыванский и Восточный в Горловской впадине выявлены вариации отношений амплитуд продольных волн на с/ст «Елбаши» (KLV01) и опорной с/ст «Новосибирск» (NVS), коррелирующие с графиком продольных волн на этих сейсмостанциях. Отмечается максимум отношений амплитуд в конце 2023 года и начале 2024 года, для которого отмечено уменьшение разности времен продольных волн примерно на 0.005-0.007 с, а также уменьшение примерно в 2 раза количества зарегистрированных землетрясений и повышение суммарной энергии. Данные графика амплитуд подтверждают высказанное ранее предположение, что при сильном увеличении угольных разработок в 2022-2023 гг. произошло уплотнение пород и накопление потенциальной энергии, которое привело к разрядке в виде крупного события с $M=4.7$ в конце 2023 года.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00609-26) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Авторы выражают признательность коллегам из Алтае-Саянского и Сейсмологического филиалов ФИЦ ЕГС РАН за участие в экспериментах и ценные замечания при обсуждении статьи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Ковалевский В.В. и др. Методы решения прямых и обратных задач сейсмологии, электромагнетизма и экспериментальные исследования в проблемах изучения геодинамических процессов в коре и верхней мантии Земли. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. -310 с.
2. Ковалевский В.В., Брагинская Л.П., Григорюк А.П., Тубанов Ц.А., Базаров А.Д. Выделение медленных вариаций времен вступлений волн при коррекции сезонных изменений вибросейсмограмм. Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Т. 1. С. 180-186.
3. Лукк А.А., Нерсесов И.Л. Природа временных вариаций скоростей упругих волн в земной коре Гармского района // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1978. № 6. С. 3-16.
4. МакЭвилли, ТВ; Джонсон, Л.Р. (апрель 1974 г.), «Стабильность скоростей Р и S, полученных при взрывах в карьерах Центральной Калифорнии», Бюллетень сейсмологического общества Америки, 64 (2): 343–353, Bibcode: 1974BuSSA.64..343M, doi: 10.1785/BSSA0640020343, S2CID 130963434.
5. Моги К. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988, 373 с.
6. Садовский М.А., Нерсесов И.Л. Вопросы прогноза землетрясений. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1978. N 9, с. 13-30.
7. Селезнев В.С., Соловьев В.М., Еманов А.Ф. и др. Глубинные вибросейсмические исследования на Дальнем востоке России // Проблемы информатики, №3 (20). 2013. С. 30-41.

8. Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Соловьев В.М. и др. Активная сейсмология и ГСЗ с мощными вибраторами в Сибири // Проблемы информатики, г. Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН. – 2018. N4. – С. 347-354.
9. Соловьев В.М., Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Еманов А.А., Корабельщиков Д.Г. Быстровский вибросейсмический полигон ФИЦ ЕГС РАН как уникальный объект для разработки и экспериментального опробования новых геофизических технологий. Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2.
10. Соловьев В.М., Селезнев В.С., Еманов А.Ф. и др. О длительности сезонных изменений среды под мощным виброисточником и вибромониторинг угледобывающих разрезов Горловской впадины // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. Новосибирск: СГУГиТ, 2025. Т 2. N 3. С. 132-139.
11. Цудзи, С., Ямаока, К., Икута, Р. и др. Вековые и косейсмические изменения скорости поперечных волн, обнаруженные с помощью ACROSS в регионе Токай. Earth Planets Space 70, 146 (2018), P. 1-10. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0917-2>.

© В. М. Соловьев, В. С. Селезнев, А. Ф. Еманов, А. А. Еманов, С. А. Елагин,
Н. А. Галева, 2026

К. В. Сухорукова¹✉, Д. В. Касплер², О. В. Нечаев¹

Результаты численного моделирования сигналов электрического микрокаротажа в нефтегазовых коллекторах терригенных отложений Западной Сибири

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: suhorukkv@gmail.com

Аннотация. С применением численного моделирования сигналов электрического микрокаротажа проведены расчеты в геоэлектрических моделях терригенных отложений Западной Сибири. Конечно-элементный алгоритм синтезирует сигналы микроградиент-зонда, микропотенциал-зонда и микробокового зонда с их произвольным положением в цилиндрически-слоистой геоэлектрической модели. Приведены результаты расчетов в базовых геоэлектрических моделях терригенных отложений Западной Сибири. Параметры моделей соответствуют значениям УЭС нижнемеловых нефтесодержащих коллекторов и глинистых флюидоупоров, а также условиям бурения на полимерных и глинистых растворах, включая формирование повышающих и понижающих зон проникновения и фильтрационных корок. Расчетные сигналы микроградиент и микропотенциал зонда характеризуются небольшой глубиной, микропотенциал и микробокового зондов – значительной зависимостью от УЭС бурового раствора. На сигналы влияют параметры глинистой корки и зоны проникновения, а также, в некоторых моделях, анизотропия УЭС пласта.

Ключевые слова: численное моделирование, конечно-элементный алгоритм, электрический микрокаротаж, удельное электрическое сопротивление, электрическая анизотропия

K. V. Sukhorukova¹✉, D. V. Kaspler², O. V. Nechaev¹

Results of numerical modeling of electrical microlog data in oil and gas reservoirs of western siberian clastic deposits

¹Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: suhorukkv@gmail.com

Abstract. Using numerical modeling of electrical microlog data, calculations were performed in geoelectric models of Western Siberian clastic deposits. A finite element algorithm synthesizes signals from a microgradient (or microinverse) probe, micropotential (or micronormal) probe, and microlateral probe with their arbitrary positions in a cylindrically layered geoelectric model. The results of calculations in basic geoelectric models of Western Siberian clastic deposits are presented. The model parameters correspond to the resistivity values of Lower Cretaceous oil and gas reservoirs and reservoir-hosting shales, as well as to drilling conditions with polymer and clay muds, including the invaded zones and filter cakes. The calculated signals of the microgradient and micropotential probes are characterized by shallow depths, while the signals of the micropotential and microlateral probes are significantly dependent on the resistivity of the drilling mud. The signals are affected by the

parameters of the mud cake and invaded zone, as well as, in some models, by the anisotropy of the formation resistivity.

Keywords: numerical modeling, finite element algorithm, electrical micrologging, resistivity, electrical anisotropy

Введение

Определение радиального распределения удельного электрического сопротивления ($УЭС$) в нефтегазовом коллекторе необходимо для его учета при постановке обратной электрогидродинамической задачи [1, 2, 3, 4]. Радиальное изменение $УЭС$ в пласте, насыщенном пластовой водой и нефтью или газом формируется в момент бурения скважины и проникновения в поровое пространство фильтрата бурового раствора (ФБР) и определяется фильтрационно-емкостными свойствами коллектора, соотношением и физическими свойствами пластовой воды и нефти, типом бурового раствора и параметрами бурения. При этом особо важна ближняя к стенке скважины область, свойства которой, с одной стороны, определяют процесс дальнейшей фильтрации, позволяя уточнить коэффициент пористости, проницаемость и содержание остаточных флюидов [5], а с другой – могут быть определены по данным зондов электрического микрокаротажа.

Зонды микрокаротажа разработаны более полувека назад и широко применяются при исследовании нефтегазовых скважин (рис. 1).

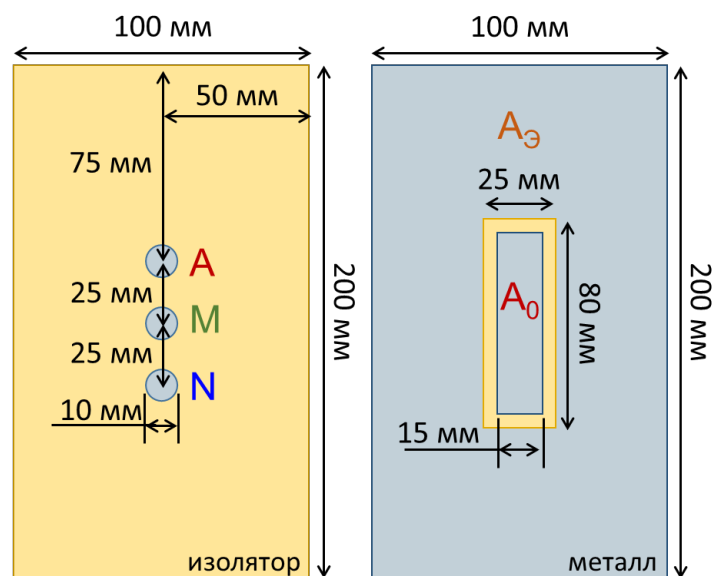


Рис. 1. Модели микрозондов: слева – микроградиент-зонд А0.025М0.025N и микропотенциал-зонд А0.05N (А – токовый электрод, М и N – измерительные электроды), справа – микробоковой зонд (центральный электрод А₀ и экранированный электрод А_Э разделены изолятором).

Это гальванические зонды, характеризующие область от 2–3 до 10–15 см от стенки скважины [6, 7, 8, 9, 10]. По данным микроградиент (МГЗ) и микропотенциал

(МПЗ) зондов (рис. 1 слева) выделяются проницаемые пласты – потенциальные коллекторы (рис. 2). По данным микробокового фокусирующего (МБК) зонда (рис. 1 справа) в некоторых случаях оценивается УЭС зоны, которая считается полностью промытой фильтратом. Это предположение иногда используется в методике интерпретации данных ГИС, потому что УЭС ФБР оценивается по палеткам и может быть пересчитано в коэффициент пористости или для оценки параметров формулы Арчи.

Рис. 2. Диаграммы данных ГИС из двух скважин. Буровой раствор: фильтрующий (слева, $\rho = 0.8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), нефилтрующий (справа, $\rho = 1.16$)

Применение новых буровых растворов, а также повышение качества записи электрокаротажных данных ставит задачу численного моделирования сигналов микрокаротажа в базовых геоэлектрических моделях, характерных для нефтегазовых коллекторов западносибирских месторождений.

Глубинность зондов МГЗ и МПЗ оценивается в 4 и 10 см соответственно [9]. При бурении на фильтрующемся буровом растворе на сигнал МГЗ влияют

свойства глинистой корки, а в сигнал МПЗ добавляется влияние зоны проникновения (ЗП), поры в которой содержат пресный ФБР и остаточные пластовую воду и углеводороды. УЭС фильтрационной корки обычно меньше, чем УЭС ЗП ($\rho_{зп}$), поэтому кажущееся сопротивление (ρ_k) по данным МГЗ меньше, чем по данным более глубинного МПЗ, что считается надежным признаком фильтрации бурового раствора вглубь пласта, а значит – признаком наличия пористости и проницаемости породы. В непроницаемых пластах проникновения нет, глинистая корка не формируется, поэтому считается, что значения ρ_k для всех микрозондов должны быть примерно равны. При бурении на нефилтующемся полимерном растворе практические данные микрозондов часто различаются минимально и могут одинаково выглядеть в интервалах как коллектора, так и глинистого пласта. Однако в современных данных микрокаротажа встречаются другие соотношения сигналов: ρ_k для МПЗ ($\rho_{k\text{ МПЗ}}$) меньше, чем для МГЗ, а ρ_k для МБК ($\rho_{k\text{ МБК}}$) близко к ρ_k для МГЗ ($\rho_{k\text{ МГЗ}}$), что отлично от "классического" случая и требует численного исследования. Особенный интерес представляют сигналы, измеряемые в интервалах анизотропных пород, ранее частично рассмотренные Е.В. Чадаевым [11].

Для моделирования сигналов электрического микрокаротажа в ИНГГ СО РАН созданы программы, основанные на конечно-элементных алгоритмах [12].

Результаты

Сигналы МГЗ, МПЗ и МБК для геоэлектрических моделей, описывающих свойства флюидоупоров и коллекторов разреза Западной Сибири и типичные условия измерения в скважинах, приведены на рис. 3–4.

В модели "скважина – пласт" (верхний левый график на рис. 3) значение ρ_k растет с увеличением УЭС бурового раствора ($\rho_{бр}$) для всех микрозондов, однако в большей степени для МПЗ и МБК. Небольшое влияние $\rho_{бр}$ на сигналы МГЗ объясняется тем, что этот зонд измеряет разность потенциалов между близко расположенными измерительными электродами М и N, поэтому изменение $\rho_{бр}$ практически не влияет. Значения $\rho_{k\text{ МПЗ}}$ и $\rho_{k\text{ МБК}}$ ниже, чем $\rho_{k\text{ МГЗ}}$ в практически важном диапазоне значений $\rho_{бр}$, меньших, чем значения ρ_p . Такое соотношение сигналов зондов встречается в современных практических данных на интервалах как непроницаемых глинистых отложений, так и коллекторов при отсутствии фильтрационной корки на стенке скважины.

При повышающем проникновении ФБР (нижний левый график на рис. 3) отсутствие глинистой корки обеспечивает быстрый выход $\rho_{k\text{ МГЗ}}$ на уровень $\rho_{зп}$: $\rho_{k\text{ МГЗ}} = 19.5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ при $h_{зп} > 0.06 \text{ м}$. Значения $\rho_{k\text{ МПЗ}}$ выходят на значения, соответствующие $\rho_{зп}$, при $h_{зп} > 0.07\text{--}0.1 \text{ м}$, значения $\rho_{k\text{ МБК}}$ – при $h_{зп} > 0.15 \text{ м}$. Значение $\rho_{бр}$ занижает кажущееся УЭС МПЗ и МБК на 20% относительно ρ_p при $h_{зп} \approx 0.0 \text{ м}$ и на 25% относительно $\rho_{зп}$ при $h_{зп} > 0.15 \text{ м}$. Понижающее проникновение сильнее влияет на сигналы (нижний правый график на рис. 3): при $h_{зп} > 0.07 \text{ м}$ все зонды выходят на значение $\rho_{зп}$.

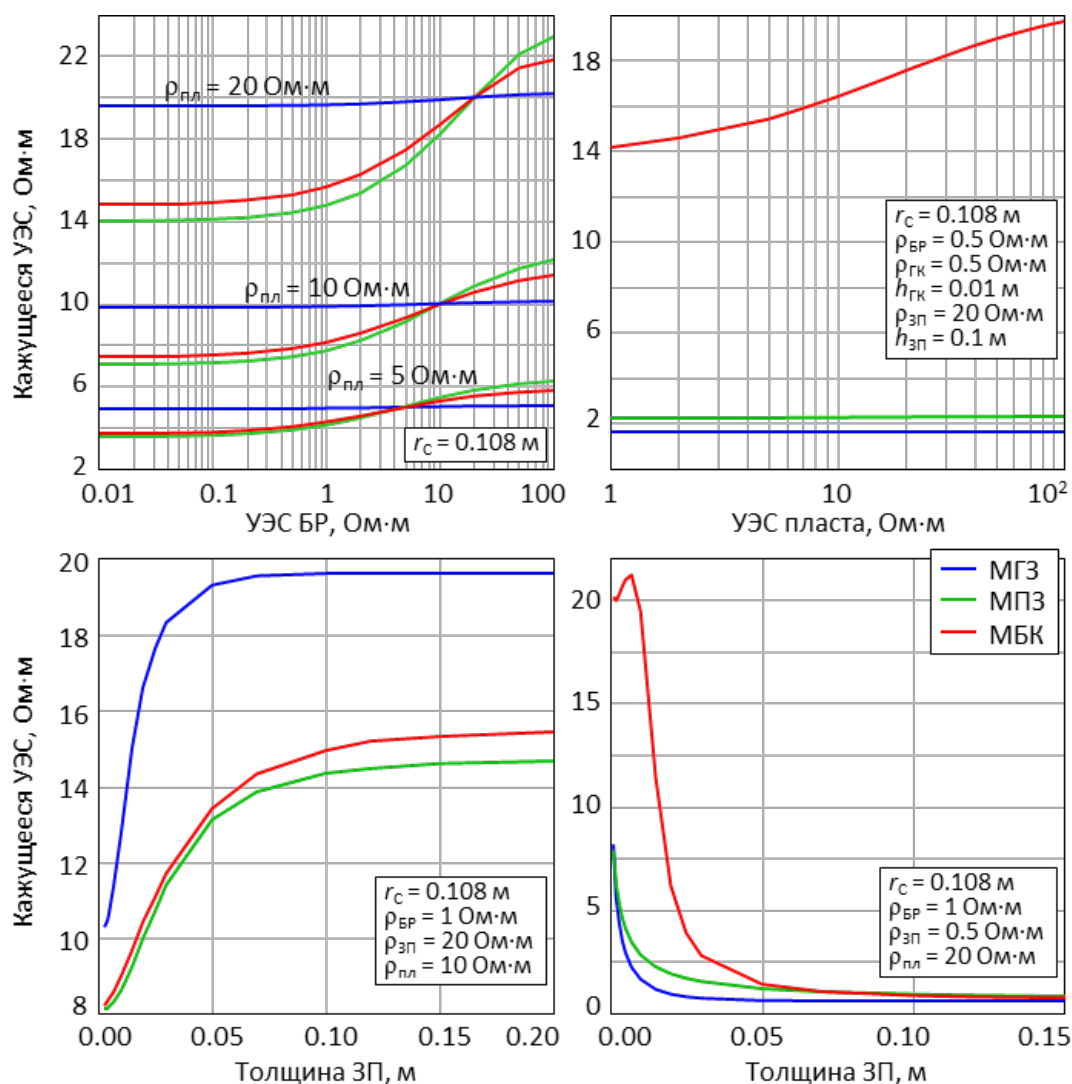


Рис. 3. Графики зависимости сигналов микрозондов, сверху: от УЭС пласта ($\rho_{пл}$) и бурового раствора ($\rho_{БР}$) в моделях «скважина – пласт» и «скважина – глинистая корка – ЗП – пласт»; внизу: от толщины ЗП ($h_{ЗП}$) в модели «скважина – ЗП – пласт». Параметры моделей приведены на графиках.

Соотношению ρ_k МГЗ, ρ_k МПЗ и ρ_k МБК, наблюдаемому при измерении в интервалах коллекторов с глинистой коркой (рис. 2 слева), соответствуют результаты расчетов в модели на верхнем правом графике (рис. 3). Влияние корки толщиной 1 см и ЗП толщиной 10 см практически лишает МГЗ и МПЗ чувствительности к изменяющемуся УЭС пласта. Изменяется только ρ_k МБК, незначительно возрастающая при изменении $\rho_{пл}$ на два порядка.

Сигналы, рассчитанные в моделях с электрически анизотропным пластом ($\rho_h = 6 \text{ Ом·м}$), показаны на рис. 4. В модели «скважина – анизотропный пласт» моделирующей глинистые отложения, зависимость от $\rho_{БР}$ сильная у сигналов МПЗ и МБК и практически незначимая у сигналов МГЗ. Сигналы всех зондов

повышаются с увеличением значения ρ_v пласта, но сигналы МПЗ – в меньшей степени, чем сигналы МГЗ и МБК.

При тех же значениях ρ_{br} и ρ_h пласта наличие тонкой пятимиллиметровой изотропной глинистой корки ($\rho_{ГК} = 1$ Ом·м одинаково для всех ρ_{br}) существенно снижает чувствительность зондов к анизотропии пласта и уменьшает сигналы зондов МПЗ и МГЗ, меняя их соотношение по сравнению с сигналами в первой модели. При такой слабой зависимости практическая точность реальных измерений, скорее всего, недостаточна для выявления влияния анизотропии при наличии глинистой корки.

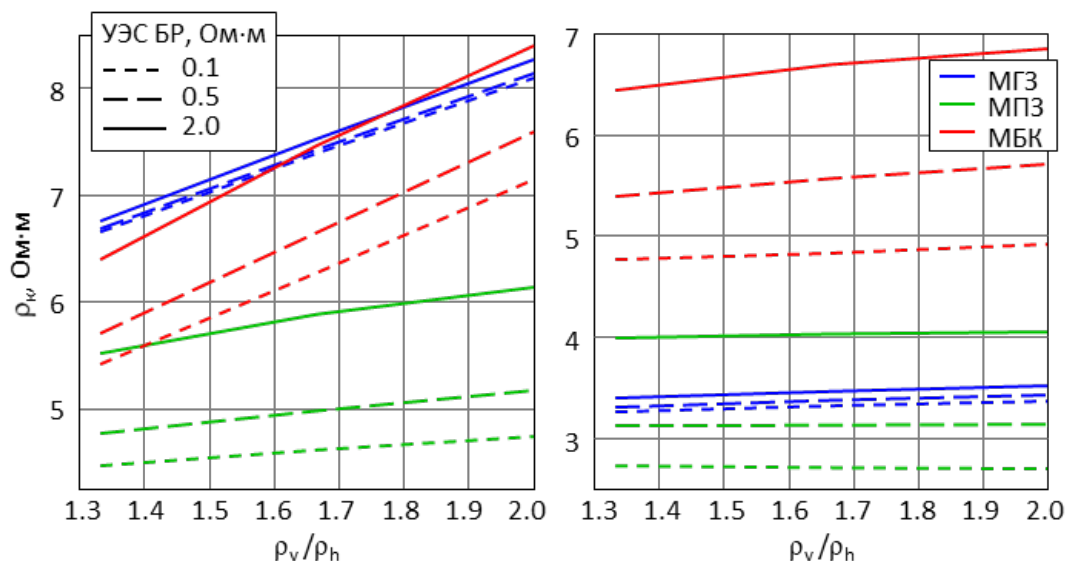


Рис. 4. Зависимость сигналов микрозондов от отношения ρ_v/ρ_h пласта.

Слева: Модель слева «скважина – анизотропный пласт», справа «скважина – глинистая корка – анизотропный пласт».

Заключение

С применением программ численного моделирования, реализующих конечно-элементный алгоритм в цилиндрически-слоистой постановке с произвольным положением зондов, проведены серии тестовых расчетов сигналов электрического микрокаротажа. Геоэлектрические модели описывают условия нижнемеловых коллекторов Западно-Сибирской НГП, вскрытых на глинистом и полимерном буровых растворах. Выявлены основные зависимости для моделей непроницаемых пластов, моделей с глинистой коркой и зоной проникновения при разных значениях параметров.

Анализ сигналов показывает небольшую глубинность МГЗ и МПЗ, сильную зависимость сигналов МПЗ и МБК от УЭС бурового раствора и параметров глинистой корки. Соотношение сигналов зондов в моделях с глинистой коркой и без нее соответствует измеренным в скважинах сигналам. В моделях без зоны проникновения и развитой глинистой корки выявлена чувствительность всех зондов

к анизотропии пласта, при наличии корки и тонкой изотропной зоны проникновения слабая чувствительность наблюдается только у зонда МБК.

Благодарности

Исследование в части моделирования сигналов в электрически анизотропных средах выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2026-0049.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Eпов M., Yeltsov I., Kashevarov A., Sobolev A., Ulyanov V. (2002). Time evolution of the near borehole zone in sandstone reservoir from the data of repeated high-frequency electromagnetic logging // SPWLA 43rd Annual Logging Symposium. June 2–5, Paper ZZ, 10 p.
2. Кашеваров А.А., Ельцов И.Н., Эпов М.И. Гидродинамическая модель формирования зоны проникновения при бурении скважин // Прикладная механика и техническая физика, 2003, т. 44 (6), с. 148–157.
3. Эпов М.И., Ельцов И.Н., Кашеваров А.А., Соболев А.Ю., Ульянов В.Н. Эволюция зоны проникновения по данным электромагнитного каротажа и гидродинамического моделирования // Геология и геофизика, 2004, № 8, с. 1033–1044.
4. Нестерова Г.В., Кашеваров А.А., Ельцов И.Н. Эволюция зоны проникновения по данным повторного каротажа и гидродинамического моделирования // Каротажник, №1(166), 2008, с. 52–68.
5. Сухорукова К.В., Нестерова Г.В., Примаков С.А. Выявление окаймляющей зоны при совместной инверсии сигналов гальванического и электромагнитного каротажного зондирования, измеренных одновременно и в разное время // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири, 2022, № S11, с. 77–86.
6. Doll H.G. (1950). The Microlog – a New Electrical Logging Method for Detailed Determination of Permeable Beds // Petroleum Transactions, AIME, v. 189, p. 155–164.
7. Doll H.G. (1953). The Microlaterolog // Petroleum Transactions, AIME, v. 189, p. 17–32.
8. Пирсон С.Д. (1961). Учение о нефтяном пласте. Москва, Гостоптехиздат, 580 с.
9. Итенберг С.С. (1987). Интерпретация результатов геофизических исследований скважин. Москва, Недра, 375 с.
10. Ellis, D.V., Singer, J.M. (2008). Well Logging for Earth Scientists. 2nd Edition, Springer, Berlin, 685 p.
11. Чаадаев Е.В. (1989). Теория электрического и электромагнитного каротажа. Калинин, ВНИГИК, НПО "Союзпромгеофизика" Министерства геологии СССР, 445 с.
12. Сухорукова К.В., Нечаев О.В., Суродина И.В., Касплер Д.В. Численное моделирование сигналов электрического микрокаротажа в нефтегазовых коллекторах терригенных отложений Западной Сибири // Геология и геофизика. – 2026. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_89003383_86725442.pdf

© К. В. Сухорукова, Д. В. Касплер, О. В. Нечаев, 2026

В. Ю. Тимофеев¹✉, Д. Г. Ардюков¹, А. В. Тимофеев¹, Д. Н. Голдобин²

Модели строения Монголо-Байкальского региона по данным спутниковых гравиметрических миссий

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация

E-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе рассмотрено глубинное строение земной коры для территории южной части Сибири России, Монголии и северо-западной части Китая от 43°N на юге до 61°N на севере и от 88°E на западе до 120°E на востоке. Построение положения границы Мохо выполнено с использованием спутниковой модели геопотенциала EIGEN-6C4, модели рельефа EARTH-2014, данных наземных гравиметрических измерений и известных сейсмических материалов. Интерпретация проводилась в рамках двухслойной модели кора-мантия при разности плотностей $0.5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Мощность земной коры для исследуемой территории изменяется от 35 км для Байкальских впадин, до 60 км, в районе Монгольского Алтая и Хангая. Ошибка определения глубины поверхности Мохо составляет от 2 км до 4 км. Наиболее контрастная часть исследуемой территории расположена на юго-западной части территории в зоне сочленения отрогов Тянь-Шаня (высоты до 4925 м) и Турфанской впадины (-155 м). Здесь мощность коры, по нашим оценкам, местами достигает 70 км.

Ключевые слова: гравиметрические модели, аномалии Буге, граница Мохо, Гоби-Алтай, Байкальский рифт, Сибирская платформа

V. Yu. Timofeev¹✉, D. G. Ardyukov¹, A. V. Timofeev¹, D. N. Goldobin²

Models of Mongolia-Baikal region by space gravity mission data

¹Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Abstract. Structure of earth crust for the territory extending from 43° to 61° north latitude and from 88° to 120° east longitude, covering south Siberia - Russia, Mongolia and south-western part of China. Position of Moho boundary constructed using data from satellite gravimetric missions as EIGEN-6C4 geopotential model with EARTH-2014 relief model, the results of ground-based gravity measurements and seismic data. Interpretation was developed in frame of two-layers model crust-mantle with density contrast $0.5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. Research has shown that the depth of the Moho boundary varied from 35 km for Baikal to 60 km for Mongolian Altai and Hangai. Error of estimation vary from 2 km to 4 km. More contrast part of territory situated at south-west where Tian-Shan range (up to 4925 meters) connected with Turfan gully (-155 meters). There the thickness of the crust is maximum near 70 km.

Keywords: gravity models, Bouguer anomalies, Moho boundary, Gobi Altai, Baikal rift, Siberian platform

Введение

Сибирская платформа и расположенный южнее Монголо-Сибирский складчатый пояс, включающий Байкальскую рифтовую систему и западную часть Амурской тектонической плиты, имеют интересную геологическую историю, отличаются сейсмической активностью и являются предметом активного изучения современными методами геофизики [1-9]. В последние десятилетия появились новые оригинальные данные, полученные в ходе спутниковых гравиметрических миссий и многочисленные модели гравитационного потенциала Земли, что предоставляет новые возможности для геофизического изучения региона. Гравитационные модели, построенные по спутниковым данным, широко используются для изучения глубинной структуры Земли, в частности, структуры земной коры.

Задача нашей работы показать возможности спутниковых гравитационных миссий при построении гравитационного поля Земли, моделировании пространственного распределения границы Мохо для Монголо-Байкальского региона, на территории, простирающейся от 43 до 61 градуса северной широты и от 88 до 120 градуса восточной долготы, выделяющейся различным геологическими объектами (Сибирская платформа, Байкальский рифт, Алтай, Хангай и другие), сравнить и оценить результаты с известными материалами, полученными сейсмическими и гравиметрическими методами.

Спутниковые миссии и модели гравитационного поля

Современная эпоха спутниковых гравиметрических миссий стартовала в начале двухтысячных годов. С космодрома Плесецк (Россия), начиная с 2000 года, запущены последовательно спутники миссии CHAMP, миссии GRACE и спутник миссии GOCE. Спутники гравиметрических миссий GRACE и GOCE имеют высоту орбиты 260 км, 500 км и CHAMP (450 км – 300 км). Чем ниже высота полета спутников, тем точнее результаты измерений. Пространственное разрешение моделей зависит от максимальной степени разложения потенциала, так для высокостепенных моделей (степень от 2000 до 5000) оно составляет от 5 км до 12 км. Из современных моделей гравитационного поля отметим модели EGM2008 и EIGEN-6C4. По результатам тестирования многими авторами, модель EGM2008, созданная в 2008 году, до настоящего времени считается опорной для дальнейших вычислений характеристик глобального гравитационного поля Земли (Таблица 1). Тестирование моделей проводилось, используя данные наземных гравиметрических пунктов 1-4 класса, расположенных на территории Новосибирской области. Использована глобальная топографическая модель рельефа EARTH-2014 [10]. Оценки аномалии в свободном воздухе, по данным для Новосибирской области (27 пунктов), показали минимальное расхождение (3,44 мГал) модельных и наземных данных для модели EIGEN-6C4. Остальные высокостепенные модели подобны, но отличаются небольшими расхождениями (от 5 мГал до 9 мГал).

Таблица 1. Модели глобального геопотенциала, составленные по комплексу данных: S – данные спутниковые гравиметрических миссий, G – данные наземных гравиметрических измерений, A – данные альтиметрических измерений, Т – топография

Номер	Модель	Год создания	Максимальная степень разложения	Исходные данные, методы
1	EGM2008	2008	1845	A, G, S (GRACE)
2	EIGEN-6C4	2014	2190	A, G, S (GOCE), S(GRACE), S (Lageos)
3	GECO	2015	2190	EGM2008, S (GOCE)
4	GOCO05C	2016	720	A, G, S
5	XOM2016	2017	719	A, G, S (GOCO05S)
6	SGG-UGM-1	2018	2159	EGM 2008, S (GOCE)
7	XGM2019e	2019	5540	A, G, S (GOCO06s), T
8	XGM2019e 2190	2019	2190	A, G, S (GOCO06s), T
9	XGM2019	2019	760	A, G, S (GOCO06s)
10	SGG-UGM-2	2020	2190	A, EGM 2008, S (GOCE), S (Grace)
11	GOCO2025s	2025	300	S (GOCE), S (GRACE), S (Lageos), S (Champ)

Используя данные по 48 пунктам России, расположенным в европейской части, на юге Сибири и Дальнего Востока, для модели EIGEN-6C4 получено отклонение 5,24 мГал, что оказалось также лучшим результатом [11-14]. Дополнительно проверка модели проводилась на шести пунктах, расположенным в Алтае-Саянской горной области. Согласно инструкции по оборудованию гравиметрических пунктов, средняя квадратическая погрешность определений ускорения силы тяжести на фундаментальных гравиметрических пунктах и исходных (главных) гравиметрических пунктах абсолютным методом, не должна превышать 0,008 мГал. Ошибка определений на пунктах Алтая составляла 0.001-0.002 мГал. Используя данные, полученные с помощью абсолютного гравиметра ГАБЛ и двухчастотных приёмников космической геодезии TRIMBLE, для разности экспериментальных и модельных значений отклонение составило $3,6 \pm 2,9$ мГал [15]. Сравнение для трёх пунктов Байкальского региона, где, как и в Алтае-Саянском регионе, многолетние измерения на пункте выполнялось с помощью гравиметра ГАБЛ различных модификаций и двухчастотных приёмников космической геодезии, показало отклонение в $5,8 \pm 3.3$ мГал, что обусловлено точечным характером измерений на пунктах. В результате построена карта аномалий Буге, по гравиметрической модели EIGEN-6C4 и топографической модели EARTH-2014, с учетом топографической поправки. Для расчётов выбрана плотность промежуточного слоя $2.67 \cdot 10^3$ кг/м³, для воды в озёрах плотность 1.0 кг/м³. Если правильно определена средняя плотность промежуточного слоя, то аномалия Буге - это аномальное поле, отражающее на 95% пространственное распределение мощности земной коры, при однородной модели с увеличением плотности с глубиной. Отрицательные аномалии Буге выше

200 мГал зарегистрированы в области нагрузки на земную кору крупных форм рельефа. Мелкие формы рельефа с горизонтальными размерами от 10 до 100 километров не вызывают прогиба коры и не приводят к аномалиям Буге. Аномалии в свободном воздухе связаны с расчлененностью рельефа в зоне хребтов с малыми горизонтальными размерами. Контуры озера Байкал хорошо проявляется в аномальных полях Буге и в свободном воздухе. Изменение высоты рельефа, аномалии в свободном воздухе и Буге по профилю в 2000 км с юга на север по долготе 100 градусов от 43 до 61 градуса северной широты показаны на Рис. 1. На графике на широте 53.5 градуса отлично проявляется Главный Саянский Разлом - граница Сибирской платформы и расположенных южнее горных районов.

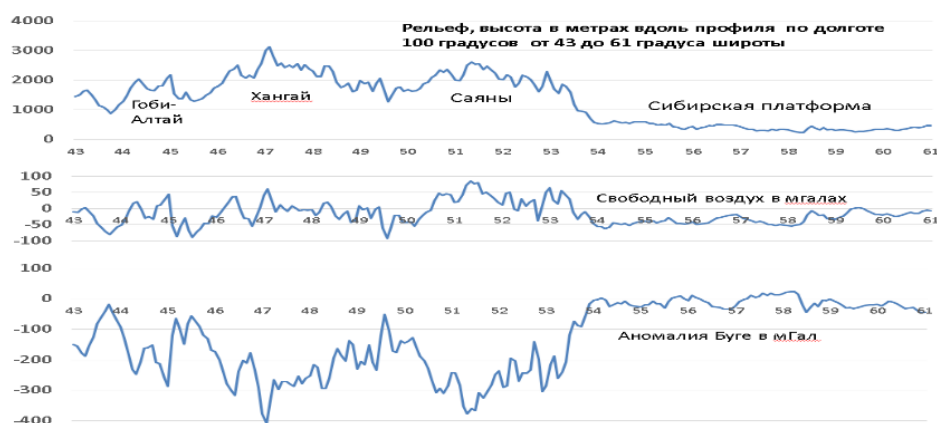


Рис. 1. Профиля с юга на север по долготе 100 градусов от 43 до 61 градуса широты. На графиках сверху вниз: рельеф в метрах; аномалия в свободном воздухе и Буге в мГал.

Определение положения границы Мохо

Технология решения обратных задач гравиметрии рассматривается во многих работах. [16, 17]. В работе [18] для определения параметров слоя предложена аналитическая модель, описывающая корреляционные функции стохастических потенциальных полей через геометрические параметры носителя масс. В статье [19] описывается технология решения обратной структурной задачи гравиметрии на основании комплексной интерпретации гравитационных и сейсмических данных. В этом случае способ решения основан на модифицированном методе локальных поправок. Известна классическая задача о контактной поверхности. Контактная поверхность разделяет две среды с различной плотностью, а это может быть и граница кора-мантия. Известно нелинейное интегральное уравнение для аномалии от контактной поверхности, которое имеет множество решений. Следовательно, требуется определить математическую постановку задачи, чтобы получить приближенное решение. На практике это выполняется, используя различные предположения о положении контактной поверхности. Например, в работе [20, 21] при построении моделей GEMMA принято, что глобальная гравитационная инверсия заключается в аппроксимации с использованием сферических координат: широты, долготы и радиуса Земли. Согласно такому подходу,

отклонение поверхности Мохо может определяться, как неровность поверхности относительно базовой сферы радиусом R . Это означает, что отклонение поверхности Мохо - $D(\theta, \lambda)$ относительно радиуса R_E можно записать как:

$$D(\theta, \lambda) = R_E - [R + \delta R(\theta, \lambda)] = D - \delta R(\theta, \lambda), \quad (1)$$

где $\delta R(\theta, \lambda)$ вариации поверхности Мохо и D глубина до референц-сферы.

Авторы работы [20, 21], используя информацию по спутниковой миссии GOCE, дополняют её данными о границе Мохо, представленной моделями CRUST-2.0 или CRUST-1.0, созданными по сейсмологическим материалам [22, 23, 24]. Таким образом, имея данные о границе Мохо на отдельном участке и карту гравитационных аномалий, задача о контактной поверхности для региона может быть решена. В вычислениях используем средние значения плотности для каждого слоя, при этом, в коре плотность монотонно возрастает с глубиной. В двухслойной модели при одной поверхности раздела используем приближенное соотношение для глубины Мохо:

$$z = z_0 + (\Delta g - \Delta g_0) / (2\pi \cdot G \cdot \Delta \sigma), \quad (2)$$

где Δg_0 и Δg – аномалии Буге, над реперной точкой и точкой, лежащей на глубине z ; σ_1 и σ_2 – средние плотности пород выше и ниже раздела соответственно, $\Delta \sigma$ разность плотностей слоёв, z_0 и z – глубины залегания поверхности раздела на реперной точке и в точке, где оценивается глубина поверхности раздела коры и мантии.

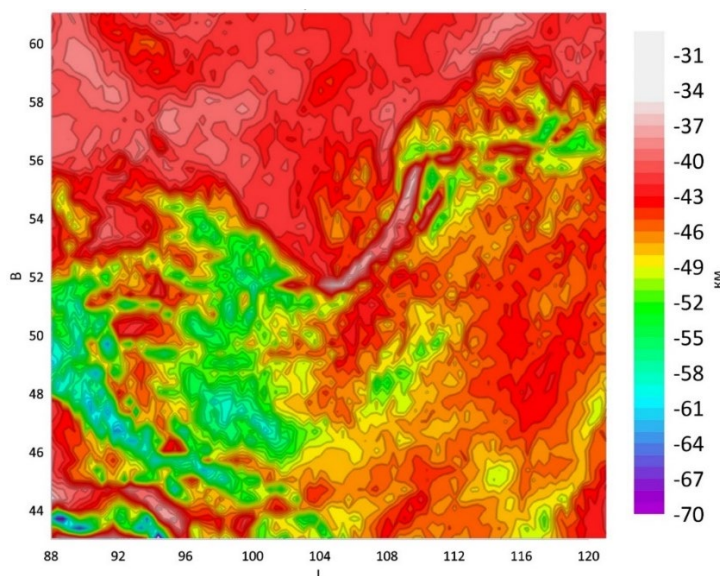


Рис. 2. Карта глубин поверхности Мохо в км, построенная по гравиметрическим данным.

Выбор параметров, используемых при вычислениях, проводился на основе результатов сейсмических работ на юге Западной Сибири и Горном Алтае [25,

26]. Ещё одна оценка параметров по материалам исследований методом ГСЗ, выполнена с использованием данных по профилю РИФТ на юге Сибирского кратона, полученных при мирных ядерных взрывах [27], на самой юго-восточной его части, от точки с координатами 58°N-102°E до точки 54°N-104°E, средняя глубина поверхности Мохо здесь составляет 42 км. Средние значения аномалии Буги по модели EIGEN-6C4 достигают - 40 мГал. Известно, что аномалии Буге на суше конформны пространственному распределению границы Мохо. В общем случае существует линейная связь между мощностью коры M и величиной аномалий Буге Ag_B , для суши: $M = M_0 + K \cdot Ag_B$, что соответствует соотношению (2) [28]. Используя соотношение (2) и данные по аномалиям Буге при разности плотностей на контакте $0.5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ построена карта глубины поверхности Мохо (Рис. 2). Авторами работ [20, 21] предложено использовать на отдельных участках другие разности, таким образом в дальнейшем можно оценки приближать к профильным сейсмическим результатам. Ошибку построения модели поверхности Мохо, учитывая сферичность Земли и приближенный характер вычислений можно оценить в 2 км - 4 км в разных частях исследуемой территории.

Заключение

Карта мощности земной коры на территории от 43 градуса до 61 градуса широты и от 88 градуса до 120 градуса долготы, представленная на рисунках (Рис. 2), показывает большой контраст в значениях мощности земной коры от 35 км (Байкальские впадины) до 70 км (Тянь-Шань на юго-западе территории). Области Монгольского Алтая, Гоби-Алтая и Хангая отличаются глубинами Мохо 55 км - 60 км. Саяны и Прихубсугулье - глубины 45 км - 55 км, Становое нагорье - глубины 45 км - 50 км. Сибирская платформа характеризуется положением границы Мохо на уровне 40 км - 45 км. Районы к юго-востоку от озера Байкал отличаются глубинами Мохо от 45 км до 50 км.

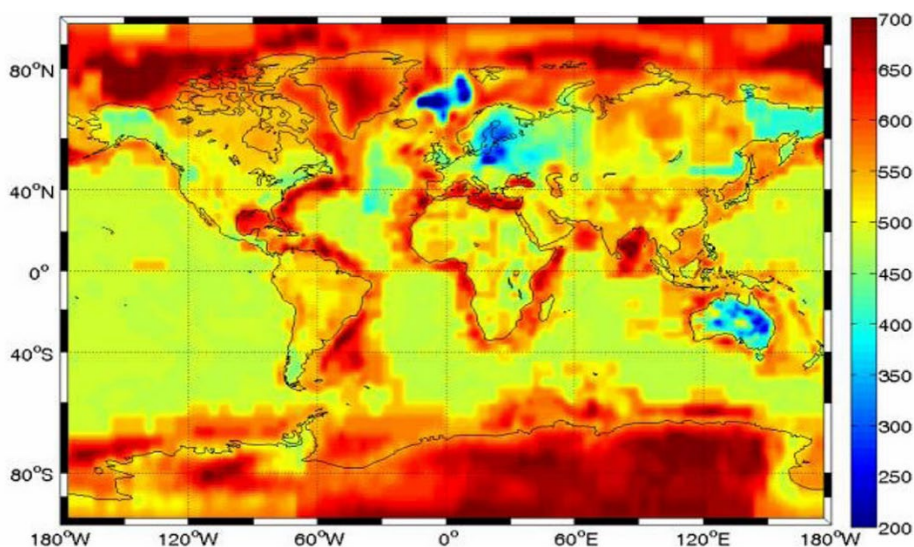


Рис. 3. Вариации разности плотностей коры и мантии, используемые при построении гравитационной модели GEMMA2012C для всей Земли [21].

Цветная шкала в кг/м^3 .

Оценки мощности земной коры соответствуют результатам, полученным при интерпретации наземных гравиметрических съёмок [29]. По впадинам озера Байкал максимальные значения глубин с запада на восток: Южно-Байкальская – 34.5 км, Средне-Байкальская – 38.4 км, Северо-Байкальская – 38.9 км, Баргузинская – 39.0 км, Нижнеангарская – 39.5 км и Муйская – 40.9 км. Положение поверхности Мохо под впадинами озера хорошо выделяется на фоне окрестностей Байкала и в целом соответствует сейсмическим данным [30, 31, 32]. На отдельных участках территории имеются расхождения с сейсмическими данными. В Тункинской впадине его можно объяснить не учётом влияния осадков, мощность которых учитывались в Байкальских впадинах. Известно более гибкое использование контраста плотностей кора-мантия (Рис.3), что также может исправить расхождения в оценках.

Работа выполнена в рамках проекта НИР ИНГГ СО РАН «Повышение точности сетевых методов наземных геофизических наблюдений в Сибири, на Дальнем Востоке и в Арктической зоне РФ для прогноза и снижения риска чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» номер FWZZ-2026-0051.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Molnar, P., and P. Tapponnier (1975), Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. // *Science*, 189, 419–426.
2. Zonenshain, L. P., and L. A. Savostin (1981), Geodynamics of Baikal rift zone and plate tectonics of Asia. // *Tectonophysics*, 76, 1–45.
3. Logatchev, N. A., and Y. A. Zorin (1992), Baikal rift zone: Structure and geodynamics // *Tectonophysics*, 208, 273–286.
4. Скляр Е.В., В.Г. Беличенко, Е.П. Васильева. Палеогеодинамика Центрально-Азиатского складчатого пояса и зон его сочленения с Сибирским кратоном // *Литосфера Центральной Азии* - Новосибирск: Наука. - 1996. – С.16 – 26.
5. Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта. // *Геология и геофизика*. – 2003. – Т.44. – № 5. – С.91 – 106.
6. Джурик В.И., А.В. Ключевский, С.П. Серебренников, В.М. Демьянович, Ц. Батсайхан, Г. Баяраа. Сейсмичность и районирование сейсмической опасности территории Монголии // Иркутск: Институт земной коры СО РАН. - 2009. – 420 с.
7. Саньков В.А. А.В. Лухнев, А.И. Мирошниченко, С.В. Ашурков, Л.М. Бызов, М.Г. Дембелов, Э. Кале, Ж. Девершер. Растяжение в Байкальском рифте: современная кинематика пассивного рифтогенеза // *Доклады РАН*. – 2009. - Т.424. - № 5. - с. 664–668.
8. Егорова Т. П., Павленкова Г.А. Сейсмоплотностные модели земной коры и верхней мантии Северной Евразии по сверхдлинным сейсмическим профилям “КВАРЦ”, “КРАТОН” И “КИМБЕРЛИТ” // *ФИЗИКА ЗЕМЛИ*. – 2015. - № 2. - с. 98–115.
9. Демберел С. Сейсмичность и напряженно-деформированное состояние литосферы Монголии // Диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. - Улаанбаатар-2017. - Институт астрономии и геофизики Академии наук Монголии. - С. 374.
10. Hirt, C. and M. Rexer (2015), Earth2014: 1 arc-min shape, topography, bedrock and ice-sheet models - available as gridded data and degree-10,800 spherical harmonics. // *International Journal of Applied Earth Obs. and Geoinf.* 39, 103–112.
11. Shako R., C. Förste, O. Abrikosov, S. Bruinsma, J. Marty, J. Lemoine, F. Flechtner, H. Neumayer, C. Dahle. (2014) EIGEN-6C: A High-Resolution Global Gravity Combination Model

Including GOCE Data / // In Observation of the System Earth from Space – CHAMP, GRACE, GOCE and future missions. Science Report. no. 20. p. 155–161.

12. Канушин В.Ф., Карпик А.П., Ганагина И.Г., Голдобин Д.Н., Косарева А.М., Косарев Н.С. Исследование современных глобальных моделей гравитационного поля Земли // Монография. - Новосибирск. - СГУГиТ. - 2015. - 270 с.

13. Zingerle P., R. Pail, T. Gruber. The combined global gravity field model XGM2019e // Journal of Geodesy. – 2020. – Vol. 94, № 66. DOI : 10.1007/s00190-020-01398-0.

14. Канушин В. Ф., Д. Н. Голдобин, Н. Н. Кобелева Исследование точности глобальных моделей геопотенциала EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2, XGM2019 на территории Российской Федерации // Вестник СГУГиТ. - Том 28. - № 3. -2023. - с. 16-22.

15. Тимофеев В. Ю., А. В. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, Д.Н. Голдобин, Д. А. Носов, И. С. Сизиков. Модели гравитационного поля и глубинное строение Алтае-Саянского региона и Северо-западной Монголии // Физика Земли. -№ 1. – 2025. – с. 151-165

16. Миронов В.С. Курс гравиразведки. – Ленинград: Недра. – 1973. - 512 с.

17. Гравиразведка. Справочник геофизика // Под ред. Е.А. Мудрецов и К.Е. Веселова. -Москва: Недра. – 1990. - 607 с.

18. В.Н. Глазнев, О.М. Муравина, Т.А. Воронова, В.М. Холин. Оценка мощности гравитационного слоя земной коры Воронежского кристаллического массива // ВЕСТНИК ВГУ. - СЕРИЯ: ГЕОЛОГИЯ. – 2014. - № 4. –с.78-84.

19. П. С. Мартышко, И. В. Ладовский, А. Г. Цидаев. Построение региональных геофизических моделей на основе комплексной интерпретации гравитационных и сейсмических данных // ФИЗИКА ЗЕМЛИ. – 2010. - № 11. - с. 23–35.

20. Reguzzoni M, Sampietro D, Sansò F (2013) Global Moho from the combination of the CRUST 2.0 model and GOCE data. // Geophysical Journal International, ggt247.

21. Reguzzoni M, Sampietro D (2015) GEMMA: An Earth crustal model based on GOCE satellite data. // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 35, 31-43.

22. Pail R., Bruinsma S., Migliaccio F., Förste Ch., Goiginger H., Schuh W.D., Höck E., Reguzzoni M., Brockmann J.M., Abrikosov O., Veicherts M., Fecher Th., Mayrhofer R., Kras butter I., Sansò F., Tscherning C.C. (2011) First GOCE gravity field models derived by three different approaches // J. Geodesy. V. 85. P. 819–843.

23. Laske G., Masters G., Ma Z., Pasyanos M. (2013) Update on CRUST1.0 -A 1-degree Global Model of Earth's Crust // Geophys. Res. Abstracts. 15. Abstract EGU2013-2658. 2013. <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/rem.html>

24. Sampietro D. (2016) Crustal Modelling and Moho Estimation with GOCE Gravity Data. // In Remote Sensing Advances for Earth System Science (pp. 127-144). Springer International Publishing.

25. Алексеев А.С., Геза Н.И., Глинский Б.М., Еманов А.Ф. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками // Цибульчик Г.М. (ред.). Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН. - Фил. "Гео" изд. - 2004. - 387 с.

26. Еманов А.А., Еманов А.Ф., Фатеев А.В., Лескова Е.В. Оценка глубины поверхности Мохо по данным МОВЗ профиля Сайлюгем – Ельцовка // Материалы международного конгресса ГЕОСИБЕРЬ. - ИНГГ СО РАН. –СГУГиТ. - г. Новосибирск. – 2017. - 121-126.

27. Pavlenkova, G. A., K. Priestley, and J. Cipar (2002), 2D model of the crust and uppermost mantle along rift profile, Siberian craton. // Tectonophysics, 355, 171–186.

28. Грушинский Н.П. Основы гравиметрии. М.: Наука. - 1983. - 352 с.

29. Зорин Ю.А., Новоселова М.Р., Рогожина В.А. Глубинная структура территории МНР // Новосибирск: Наука. - 1982. -93 с.

30. Недра Байкала (по сейсмическим данным) / Ред. Н.Н. Пузырев, – Новосибирск: Наука. - 1981. – 105 с.

31. Suvorov, V. D., Z. M. Mishenkina, G. V. Petrick, I. F. Sheludko, V. S. Seleznev, and V. M. Solovyov (2002), Structure of the crust in the Baikal Rift Zone and adjacent areas from Deep Seismic Sounding data // *Tectonophysics*, 351, 61–74.

32. В. М. Соловьев, В. С. Селезнев, А. С. Сальников, В. В. Чечельницкий, Н. А. Гилёва, А. В. Лисейкин, А. А. Брыксин, Н. А. Галёва. Глубинное скоростное строение и сейсмичность Забайкалья (в створе опорного геолого-геофизического профиля 1-СБ) // *Вулканология и сейсмология*, 2023, № 2, с. 83–96.

© В. Ю. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев, Д. Н. Голдобин, 2026

А. Н. Шейн¹✉, А. А. Башкова^{1,2}

Влияние коммунальных аварий на тепловой режим многолетнемёрзлого грунта в основании свайных фундаментов капитальных зданий в г. Салехард

¹Научный центр изучения Арктики, г. Салехард, Российская Федерация

²Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Российская Федерация
e-mail: A.N.Shein@yandex.ru

Аннотация. Многолетнемёрзлые породы (ММП) занимают более 60% территории России. Климатические изменения увеличивают риски для инфраструктуры, возведённой на этой территории ввиду деградации ММП. Отдельно стоит выделить коммунальные аварии, влияние которых на температурный режим грунтовых оснований изучено недостаточно. В работе проанализированы две аварии под зданиями в г. Салехард с использованием данных системы автоматизированного мониторинга, которая включает более 50 зданий, где оборудовано свыше 370 скважин. Первая авария (зима 2020/21 г.) привела к образованию наледи высотой до 1,8 м в проветриваемом подполье. При наличии качественной бетонной стяжки тепловой режим оснований сохранился в равновесии. Вторая авария (ноябрь 2024 г.) с прорывом горячей воды вызвала локальную тепловую аномалию, которая стабилизировалась после устранения утечки. Показано, что коммунальные аварии могут быть не критичны для состояния мерзлоты в основании зданий при соблюдении норм эксплуатации и ненарушенном режиме работы всех проектных решений термостабилизации грунта.

Ключевые слова: свайный фундамент, мерзлота, температурный мониторинг, коммунальная авария

A. N. Shein¹✉, A. A. Bashkova^{1,2}

The impact of municipal accidents on the thermal regime of permafrost at the base of pile foundations of capital buildings in Salekhard

¹Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug, Salekhard, Russian Federation

²Institute of the Earth's Cryosphere of the Tyumen Scientific Center SB RAS,
Tyumen, Russian Federation
e-mail: A.N.Shein@yandex.ru

Abstract. Permafrost occupy more than 60% of the territory of Russia. Climatic changes increase the risks for the infrastructure built on this territory due to the degradation of permafrost. Separately, it is necessary to consider communal accidents, the effect of which on the temperature regime of the frozen bases of buildings has not been sufficiently studied. The paper analyzes two accidents under buildings in Salekhard using data from an automated monitoring system that includes more than 50 buildings with over 370 wells. The first accident (winter 2020/21) led to the formation of ice up to 1.8 m high in the ventilated underfloor space. In the presence of high-quality concrete screed, the thermal regime of the foundations remained in balance. The second accident (November 2024) with a hot water breakthrough caused a local thermal anomaly, which stabilized after the leak was eliminated. It is shown that communal accidents may not be critical for the state of permafrost at the base

of buildings if the operating standards are observed and all engineering solutions for soil thermal stabilization are undisturbed.

Keywords: piling foundations; permafrost; temperature monitoring, municipal accidents

Введение

Многолетнемёрзлые породы (ММП) занимают более четверти земной коры, а в России – 60–65 % территории, имеющей стратегическое значение для экономики страны. Вместе с тем на состояние ММП в значительной степени влияют происходящие климатические изменения, и, по прогнозам, тенденция к потеплению сохранится [1–2]. В связи с этим в последние годы активно развивается изучение состояния криолитозоны и внедряются системы геотехнического мониторинга капитальных объектов [3–4].

Значительная часть инфраструктуры в криолитозоне возводятся по принципу сохранения мерзлого состояния грунтов оснований и в первую очередь зависит от состояния мёрзлых пород. Однако климатические изменения – это не единственный фактор, влияющий на устойчивость Арктической инфраструктуры. Комплекс изысканий и проектирования в области ММП находится в кризисе, а мероприятия по контролю параметров надёжности объектов носят необязательный характер и часто не выполняются. В будущем актуализация и соблюдение правил может исправить ситуацию. Тем не менее коммунальные аварии неизбежны, а изучение их влияния на тепловой режим мерзлого грунтового основания свайного фундамента необходимо для предотвращения опасных геокриологических процессов. В работе рассмотрено влияние двух коммунальных аварий под зданиями в г. Салехард на температуру мерзлых грунтов основания.

Методы и материалы

В Ямало-Ненецком АО для безопасной эксплуатации зданий и сооружений в зоне многолетних мерзлых грунтов Научным центром изучения Арктики при поддержке правительства ЯНАО с 2018 г. разрабатывается система автоматизированного температурного мониторинга. Система содержит элементы – термометрические косы, интегрированные в информационную систему сбора и передачи информации «Ямал-Арктика», для первичного анализа, выгрузки и визуализации данных [5–8]. В систему включено уже более 50 объектов в г. Салехард, под которыми оборудовано свыше 370 термометрических скважин, где ведутся регулярные наблюдения. Для большинства скважин выполнены описание, отбор образцов грунта и сделаны их лабораторные анализы, что позволит строить модели грунтовых оснований объектов и проводить качественные расчёты температурного поля под зданием и оценивать текущее и прогнозное состояние грунтового основания.

Скважины системы оснащены термометрическим оборудованием до глубин 9–15 м – отметок, превышающих длину свай. Скважины оборудованы термометрическими косами производства ИП Кураков (г. Томск) и ООО Русгеотех, НТП «Горизонт», ООО «Криолаб» с логгерами. Датчики до 5 м располагаются через 0.5 м, ниже – через 1 м на всю оставшуюся глубину термометрической

скважины. Логгеры автоматически записывают значения температур грунтов каждые 3 ч с инструментальной погрешностью 0.1°C и отправляются на сервера производителей и затем аккумулируются в ИС «Ямал-Арктика». Ведётся постоянный анализ поступающих данных, а для специалистов и всех заинтересованных лиц предусмотрен доступ к ресурсу.

В зимний сезон 2020/21 г. произошла коммунальная авария под зданием I в г. Салехард, в результате чего образовалась наледь в проветриваемом подполье (ПП). Под данным капитальным объектом в декабре 2020 г. было оборудовано 16 скважин по плотной равномерной сети, что позволяет детально проследить влияние аварии на тепловой режим грунтового основания здания.

На рисунке 1 показано развитие аварии в феврале-апреле 2021 года. К 7 апреля 2021 года утечка воды привела к формированию ледяного слоя высотой 1.8 метра в самой высокой точке (рис. 1, слева), расположенной в окрестности термометрической скважины 50-4.



Рис. 1. Фото коммунальной аварии под зданием I в г. Салехард 02 февраля 2021 и 7 апреля 2021 года

Под зданием II появилась тепловая аномалия, зафиксированная скважиной 33554564 и связанная с коммунальной аварией в виде прорыва горячей воды, возникшей в начале ноября 2024 г. Рассмотрим влияние этих двух аварий на изменение температурного режима под зданиями.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 2 показано изменение температуры воздуха в ПП и уровне дневной поверхности, расположенных на термокосах 50–1, 50–2, 50–3, 50–4. Эти скважины находятся вблизи источника питания наледи, которая оказывает непосредственное влияние на температурные данные. Термодатчик 50–4(0) на уровне поверхности ПП (рис. 2) дольше всех находится в области отрицательных температур, что означает максимальное влияние образовавшегося ледового слоя на область вблизи этой скважины. Наледь полностью растаяла не ранее 19 июля 2021 года (рис. 2, зелёная кривая). Почти два месяца летнее тепло сдерживалось льдом, что влияло на тепловой режим верхней части грунтового основания.

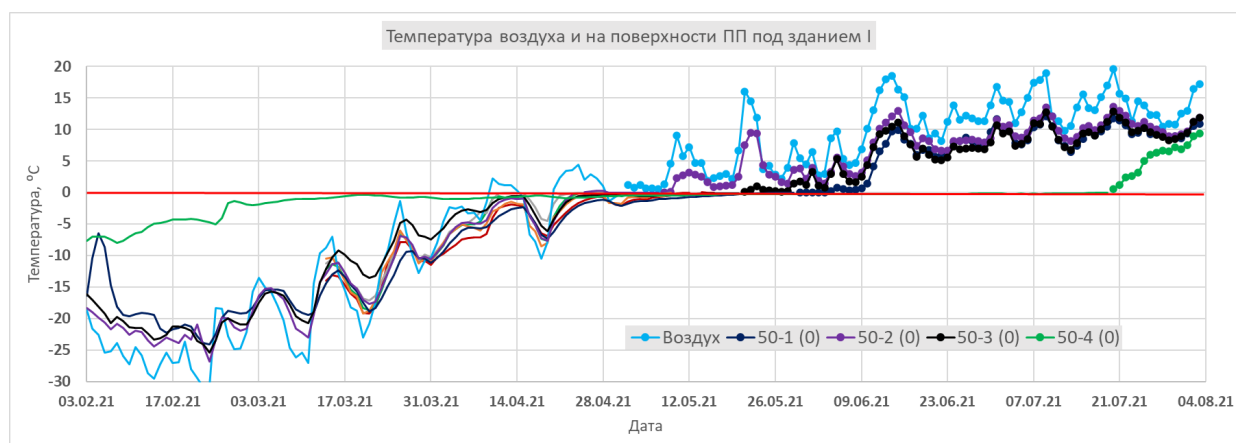


Рис. 2. Показания температуры воздуха в ПП и датчиков на уровне поверхности подполья, расположенных на термокосах 50–1, 50–2, 50–3, 50–4 под зданием I за период с 03.03.21 по 04.08.21 г.

Чтобы узнать влияние наледи на всю толщу основания, построены температурные профили по глубине для всех скважин, обработанных под зданием I (рис. 3). Рассмотрим моменты близкие к минимальным и максимальным температурам грунтов основания за год – 1 июня (рис. 3а) и 1 ноября (рис. 3б) 2021 г. соответственно. Значения температуры в скважине 50-4 не отличаются от средних значений по дому как в июне, так и в ноябре. Исключение – первые 1.5 метра грунтового основания в июне 2021 г. (рис. 3а, оранжевая кривая): если во всех скважинах грунты к 1 июня уже оттаяли до глубин 1-1.5 метра, то вблизи скважины 50-4 ещё сохранились отрицательные температуры даже в верхней части.

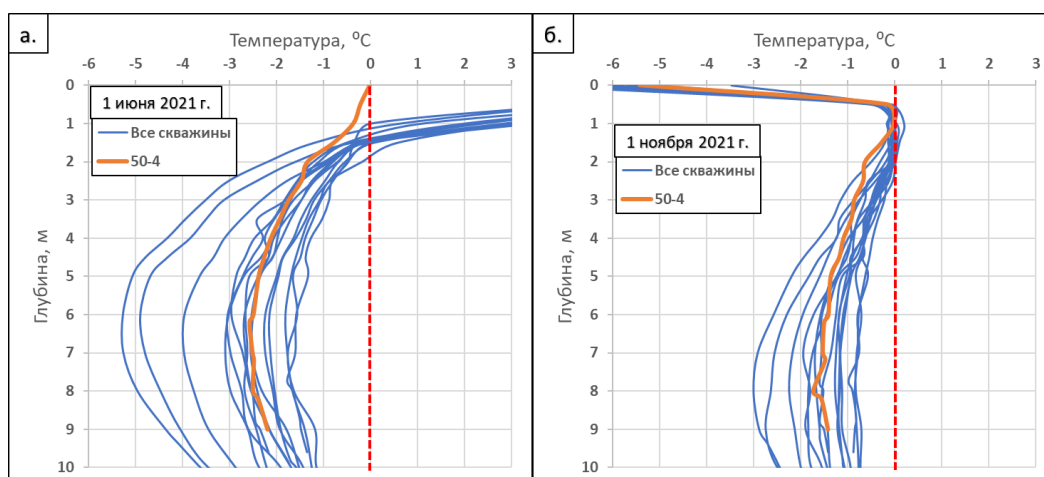


Рис. 3. Температура грунтов под зданием I во всех скважинах (синие кривые) по сравнению со скважиной 50-4 (оранжевая кривая) 1 июня (а) и 1 ноября (б) 2021 г.

Помимо сравнения области максимального влияния наледи с общим температурным фоном по зданию I (рис. 3), были построены температуры в один и тот же момент времени для разных лет (рис. 4). В мае 2021 года можно наблюдать отличие температурной кривой от последующих лет в тот же момент времени (рис. 4а) – грунты в 2021 году теплее на 2-3⁰С. Такое отличие может быть связано с отопляющим эффектом наледи в зимний период – холодный воздух не проникает в грунты через лёд. Кроме того, залитые льдом сезонные охлаждающие устройства (см. рис. 1) перестали функционировать. Тем не менее, в ноябре 2021 г., когда температура грунтов в основании здания I близка к максимальной за год, значения в скважине 50-4 не отличаются от последующих лет. Что говорит о стабилизации ситуации. Можно предположить, что не проникшая за зимний сезон 2020/21 волна холода и блокировка летнего тепла наледью оставили тепловой режим грунтового основания здания I в равновесии.

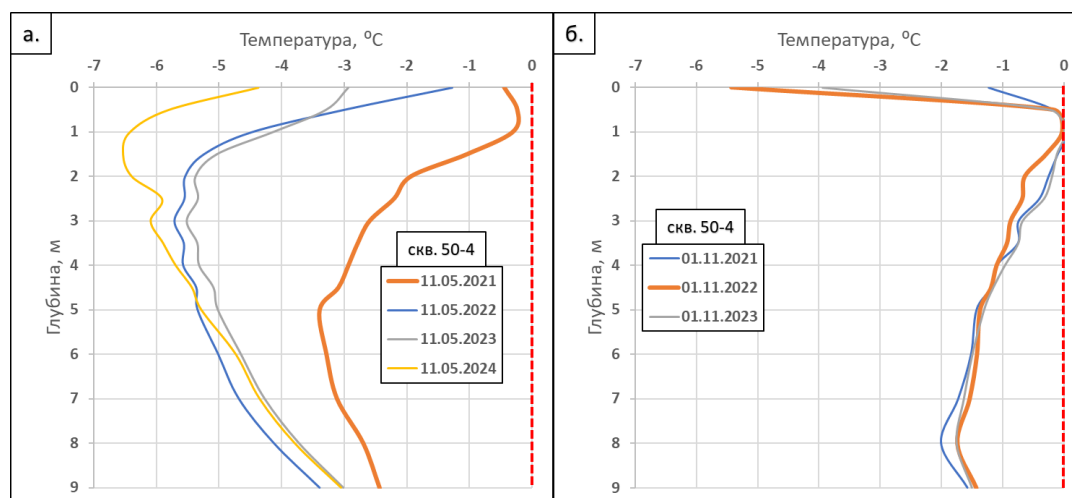


Рис. 4. Температура грунтов под зданием I в скважине 50-4 за 11 мая и 01 ноября для разных лет

Таким образом, образовавшаяся техногенная наледь под зданием I в г. Салехард не вызвала критических изменений теплового режима грунтового основания на рассмотренном временном отрезке. Вероятно, одна из основных причин стабилизации – это хорошее качество бетонной стяжки в ПП, которая не позволила массе воды при оттаивании наледи проникать в грунты основания.

В 2024 году под зданием II появилась тепловая аномалия, зафиксированная скважиной 33554564 (рис. 5), где произошёл скачок температур последовательно на датчиках до 5 метров в глубину. Это связано с коммунальной аварией в виде прорыва горячей воды, возникшей в начале ноября 2024 г. и устранённой только в конце года.

Моменты начала аварии и её устранение чётко видно на показаниях датчиков (рис. 5, красная полупрозрачная область): резкий скачок – прорыв, переход к понижению температуры – момент устранения. После устранения аварии грунты стабилизировались, но за зимний период не остыли до исходных, зафиксированных до аварии, температур.

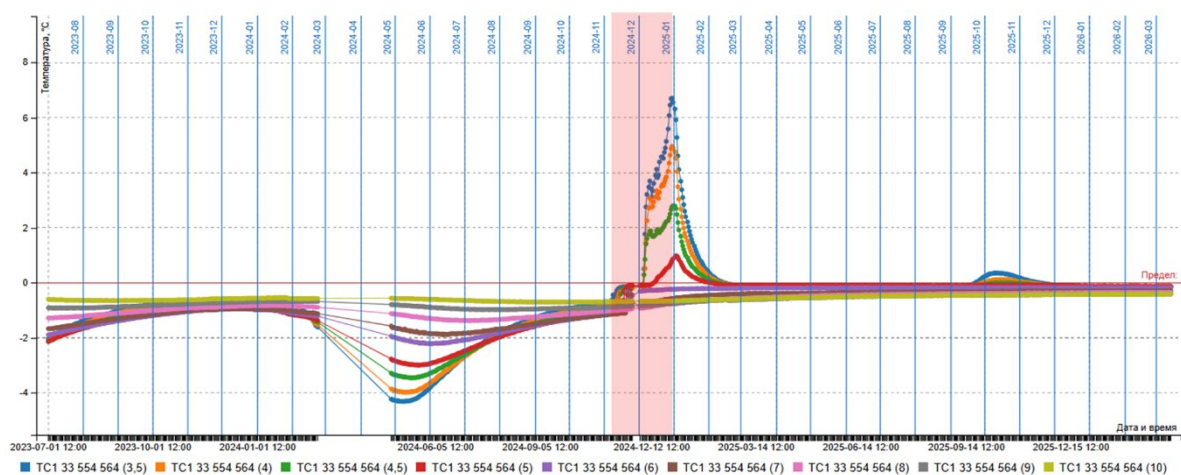


Рис. 5. Среднедневные температура грунтов в основании здания II в скважине 33554564 за период 25.06.2023 г. - 13.03.2025 г.

Шифр кривых – номер термокосы со значением глубины в скобках

На рис. 6. построены среднемесячные температуры грунтов в основании здания II в скважине 33554564 в феврале 2024-2026 гг. Видно, что после аварии в 2025 году (рис. 6, красная кривая) грунты оттаяли до 5 метров. В 2026 году температура грунтов на всю контролируемую глубину продолжают охлаждаться и уже перешла в отрицательную зону (рис. 6, синяя кривая), но ещё не достигла доаварийных значений (рис. 6, зелёная кривая). Этому способствует технологии термостабилизации грунтов: проветриваемое подполье и сезонные охлаждающие устройства.

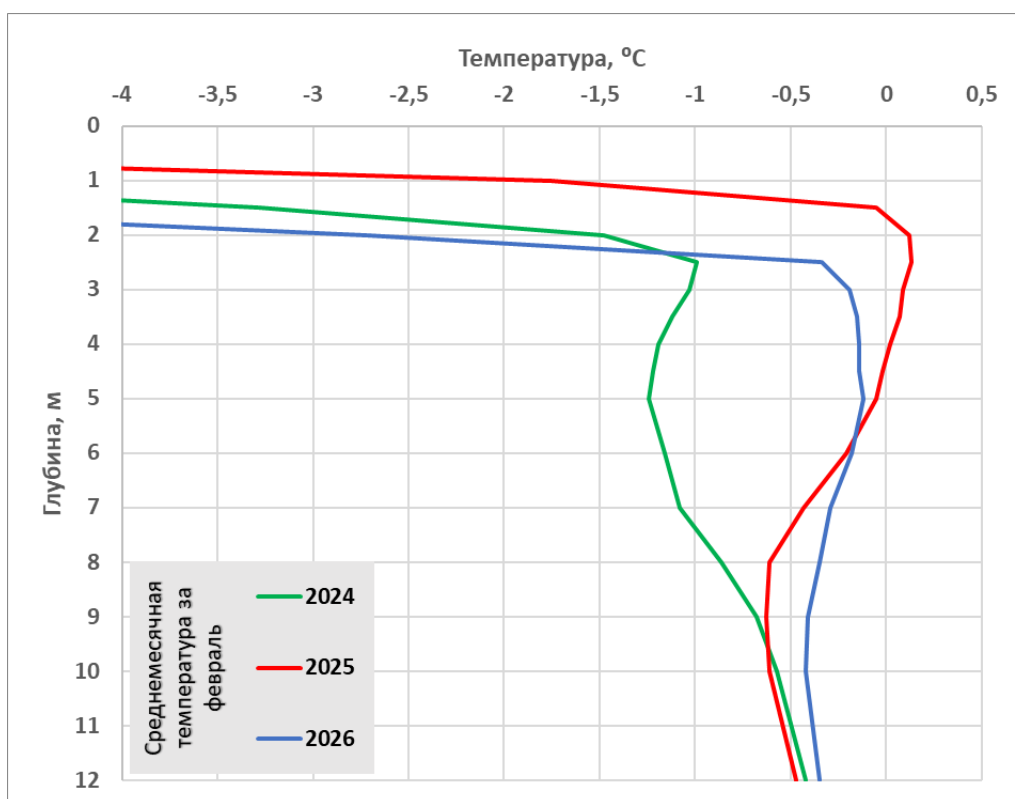


Рис. 6. Среднемесячная температура грунтов в основании здания II в скважине 33554564 в феврале 2024-2026 гг.

Таким образом, на двух объектах капитального строительства в г. Салехард, возведённых по принципу сохранения ММГ в основании показано, что неукоснительное соблюдение норм и правил эксплуатации зданий, позволяют нивелировать негативное воздействие коммунальных авария на тепловой режим мерзлоты в основании свайного фундамента. Тем не менее, коммунальные аварии неизбежны, а изучение их влияния на тепловой режим мёрзлого грунтового основания свайного фундамента необходимо для предотвращения опасных для устойчивости сооружений геокриологических процессов.

Заключение

На примере здания I в г. Салехард, показано, что при образовании наледей в ПП не проникшая за зимний сезон 2020/21 волна холода и блокировка летнего тепла наледью летом оставляют тепловой режим грунтовых оснований в равновесии. Условие стабилизации – это качественная бетонная стяжка в ПП, которая не позволяет массе воды при оттаивании наледи проникать в грунты основания.

При прорыве горячей воды и нарушенной целостности стяжки могут возникнуть локальные тепловые аномалии. Тем не менее, при оперативном устранении утечки, состояние грунтового основания может стабилизироваться за коротки отрезок времени, который зависит от климатических показателей, состояния СОУ и режима работы ПП, что можно наблюдать во втором примере под зданием II данной работы.

В качестве общего вывода можно сказать, что коммунальные аварии могут быть не критичны для состояния грунтового основания капитального объекта, возведённого на мёрзлых грунтах при соблюдении норм и правил эксплуатации объектов капитального строительства и ненарушенном режиме работы всех проектных решений (режим работы ПП, стяжка подполья, исправные СОУ).

Техногенные образования должны учитываться при теплотехническом численном моделировании, которое в свою очередь необходимы для более точного детального прогноза стабильности грунтового основания.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке правительства Ямало-Ненецкого автономного округа. Авторы благодарны специалистам участка инженерных изысканий ГАУ ЯНАО Научный центр изучения Арктики за создание мониторинговой инфраструктуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Brown J., Ferrians O., Heginbottom J.A., Melnikov E. Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions, Version 2 [Electronic resource]. – Boulder, Colorado USA : NSIDC: National Snow and Ice Data Center, 2002. – DOI: 10.7265/skbg-kf16. – URL: <https://nsidc.org/data/ggd318/versions/2> (accessed: 20.04.2023).
2. Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A., [et al.]. Spatial and Temporal Variability of Permafrost in the Western Part of the Russian Arctic // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, no. 7. – P. 1-19. – DOI: 10.3390/en15072311.
3. Шеин А.Н., Камнев Я.К. Обзор научных и производственных работ по изучению многолетнемерзлых пород в естественных и антропогенных условиях // *Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа*. – 2020. – № 3(108). – С. 42–50. – DOI: 10.26110/ARCTIC.2020.108.3.007.
4. Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V., [et al.]. Development of geocryological monitoring of undisturbed and disturbed Russian permafrost areas on the basis of geotechnical monitoring systems of the energy industry // *Earth's Cryosphere*. – 2022. – Vol. XXVI, no. 4. – P. 3–15.
5. System of automated geocryological monitoring [Electronic resource]. – URL: <https://monitoring.arctic.yanao.ru/> (accessed: 22.03.2026).
6. Громадский А.Н., Арефьев С.В. [и др.]. Дистанционный контроль за температурным режимом вечномёрзлых грунтов под зданиями г. Салехард // *Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа*. – 2019. – № 3(104). – С. 17-21. – DOI: 10.26110/ARCTIC.2019.104.3.003.
7. Kamnev Y.K., Filimonov M.Yu., Shein A.N., Vaganova N.A. Automated Monitoring The Temperature Under Buildings With Pile Foundations In Salekhard // *Geography, Environment, Sustainability*. – 2021. – Vol. 14, no. 4. – P. 75-82. – DOI: 10.24057/2071-9388-2021-021.
8. Башкова А.А., Шеин А.Н., Горелик Я.Б. Мониторинг грунтов основания здания на искусственном новообразовании мерзлоты // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2025. – № 2. – С. 41-51. – DOI: 10.33622/0869-7019.2025.02.41-51.

© А. Н. Шеин, А. А. Башкова, 2026

Н. В. Штабель^{1,2}✉

Нейросетевой подход к оценке глубины залегания кровли проводящего объекта

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: orlovskayanv@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Рассмотрена задача оценки глубины залегания кровли проводящих объектов в слабопроводящей среде с помощью полносвязной нейросети. Выявленные ранее зависимости между параметрами распределения аномалии сигналов ЭДС от проводящих объектов и параметрами объекта позволили сформулировать задачу регрессии для нейросети. После обучения нейросети на небольшой выборке сигналов ЭДС от модельных задач с пластообразными объектами, были получены оценки глубины залегания для объектов такой же формы, а также для объектов, имеющих форму шара и полусферы. Погрешность нейросетевого прогноза составила от 2 до 30%.

Ключевые слова: численное моделирование, зондирование становлением, рудные тела, машинное обучение

N. V. Shtabel^{1,2}✉

Neural network approach to estimating the depth of the roof of a conducting o-bject

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy
of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: orlovskayanv@ipgg.sbras.ru

Abstract. The problem of estimating the depth of the roof of conducting objects buried in poorly conducting medium was investigated using a fully connected neural network. Previously identified dependencies between the parameters of the distribution of EMF anomaly signals from conductive objects and the object's parameters made it possible to formulate a regression task for the neural network. After training the neural network on a small dataset of EMF signals from model problems involving layer-like objects, depth estimates were obtained for objects of the same shape, as well as for objects shaped as a sphere and a hemisphere. The error of the neural network's prediction ranged from 2 % to 30 %.

Keywords: numerical modeling, time-domain electromagnetic sounding, ore bodies, machine learning

Введение

Методы электромагнитных зондирований чувствительны к проводящим телам в исследуемой среде. Сигналы ЭДС над проводящими телами отличаются повышенными амплитудами значений, времена проявления которых коррелируют с

глубиной расположения кровли объекта и индукционной массой объекта [1]. Индукционная масса проводящего тела — это величина равная произведению объема тела на его электропроводность. Эти два параметра определяют амплитуду и длительность воздействия вторичных наведенных токов на измеряемые сигналы, однако выделить в явном виде зависимость между сигналом ЭДС и каждым из параметров достаточно затруднительно, но можно определить связь между обобщенным параметром индукционной массы и аномалией сигналов ЭДС [2]. Для оценки глубины залегания кровли проводящего объекта можно воспользоваться аналитическими зависимостями, полученными эмпирически по расчетным данным [3], но в таком подходе необходима коррекция коэффициентов зависимости с учетом сопротивления внешней среды. Поскольку скорость распространения электрического поля в слабопроводящих средах достаточно высока, а времена начала взаимодействия поля с кровлей объекта достаточно малы и малые колебания параметров среды могут приводить к значительным погрешностям в оценке глубины залегания. Прогноз глубины залегания с использованием полносвязной нейросети позволит обобщить зависимость между аномальным сигналом ЭДС и параметрами глубины залегания кровли объекта, сопротивления внешней среды.

Постановка задачи

Рассматривается задача регрессии параметра глубины залегания кровли проводящего объекта в слабопроводящем пространстве по аномальным сигналам ЭДС с помощью полносвязной нейросети.

Рассматриваемая модель сети показана на рисунке 1. Сеть имеет один входной слой, состоящий из 5 нейронов (голубой цвет), т.к. на вход подается четыре параметра аномального сигнала ЭДС и сопротивление вмещающей среды. В качестве параметров аномального сигнала используются времена достижения минимума и максимума аномалии, а также амплитуды этих экстремумов. Далее идет слой нормализации сигналов (светло-зеленый цвет), три скрытых слоя из 64 нейронов (зеленый цвет) и выходной слой из одного нейрона, значение на выходе которого будет предсказанной оценкой глубины залегания объекта. Реализация работы с нейросетью выполнена с использованием библиотеки Keras. Для оценки результатов обучения сети использовался критерий среднеквадратичной ошибки между предсказанными и тестовыми данными.

Для корректной работы нейросети для оценки глубины объекта необходимо определить весовые коэффициенты нейронов путем обучения сети на некоторой обучающей и тестовой выборках. Для формирования обучающей и тестовой выборки были использованы результаты моделирования электрического поля и сигналов ЭДС в приемных петлях для модели слабопроводящего пространства с локальным проводящим объектом, представляющим пластообразное рудное тело. Зондирующая установка представляет собой генераторную петлю со стороной 500м и соосную приемную петлю со стороной 100м. Глубина кровли проводящего объекта для выборки варьировалась от 40 до 300 метров с шагом 50м. Объем тела был фиксирован на уровне 60000 м³ и был представлен в двух размерах 300x200x10 м и 200x100x30 м. Электропроводность объекта изменялась от

0.05 См/м до 0.3 См/м, а сопротивление среды выбиралось в диапазоне 250 – 1250 Ом·м.

Полученная выборка содержала 125 вариантов комбинаций параметров. Зависимость искомого параметра от входных параметров представлена на рисунке 2.

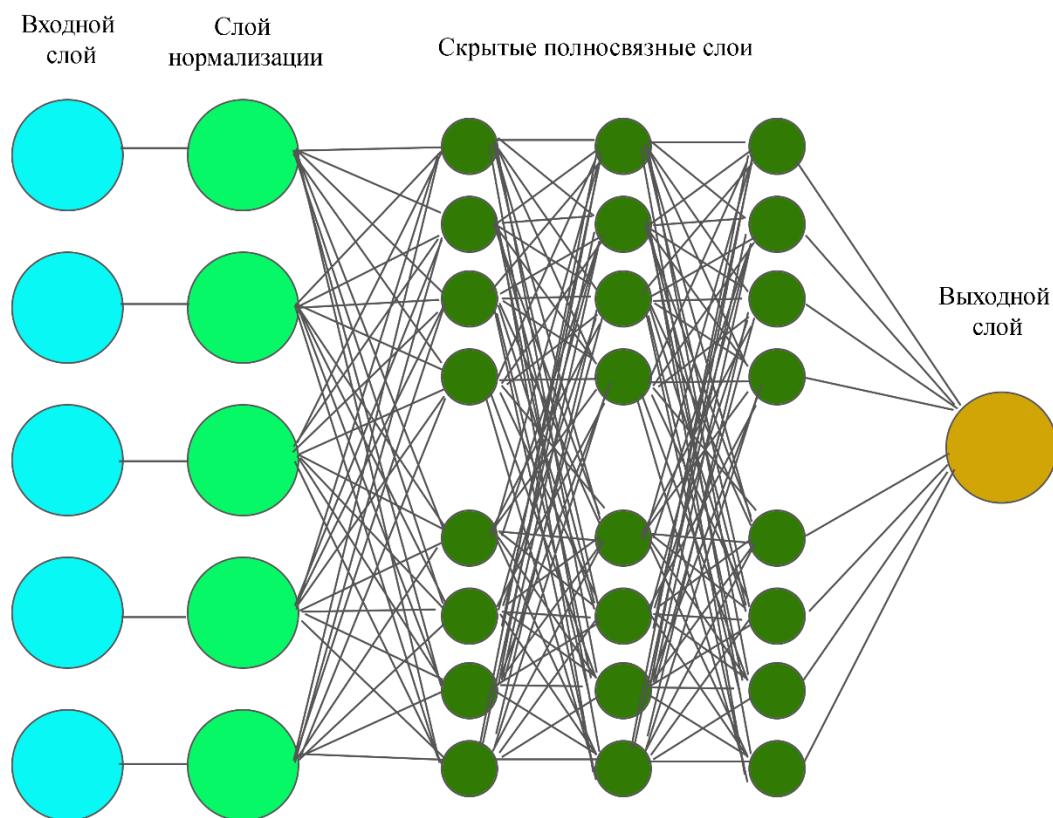


Рис. 1. Схема реализуемой нейросети

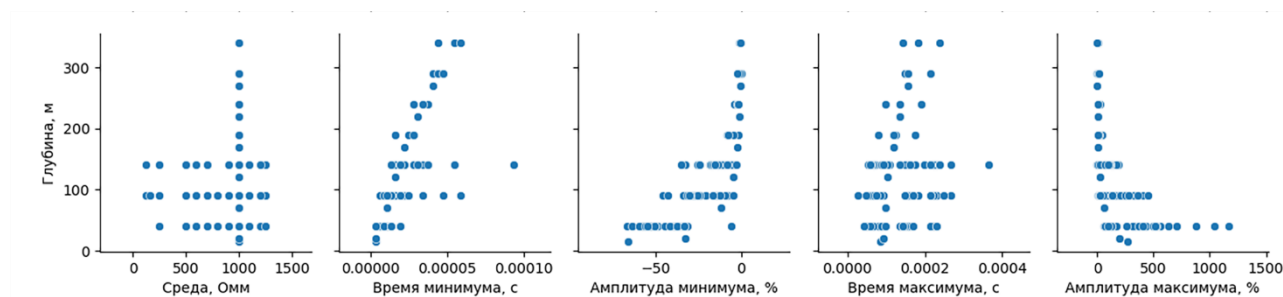


Рис. 2. Зависимость глубины залегания кровли объекта от параметров входных данных нейросети

Математическая модель

Для решения задачи зондирования среды методом становления поля систему уравнений Максвелла представляют в виде параболического уравнения второго порядка относительно напряженности электрического поля:

$$\operatorname{rot} \mu^{-1} \operatorname{rot} \vec{E} + \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\frac{\partial \vec{J}}{\partial t}, \quad (1)$$

где $\vec{E}$ - напряженность электрического поля, $\vec{J}$ - ток в генераторной петле, t - время моделирования, μ - магнитная проницаемость среды, ε - диэлектрическая проницаемость среды, σ - электропроводность среды. Для исследуемых сред $\mu = \mu_0$, $\varepsilon = \varepsilon_0$, поэтому токами смещения $\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$ можно пренебречь, т.к. эта величина много меньше токов проводимости $\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$.

Определим условия на границах области моделирования Ω .

$$\vec{E} \times \vec{n} \Big|_{\partial\Omega} = 0 \quad (2)$$

Условия (2) – так называемые условия «большого бака»: требования обращения в ноль тангенциальной компоненты электрического поля на внешней границе среды.

Для решения уравнения воспользуемся векторным методом конечных элементов. Определим ряд функциональных пространств, в которых будем искать решение [4, 5]:

$$\begin{aligned} H(\operatorname{rot}, \Omega) &= \{\vec{u} \in L^2(\Omega) \mid \nabla \times \vec{u} \in L^2(\Omega)\} \\ H_0(\operatorname{rot}, \Omega) &= \{\vec{u} \in H(\operatorname{rot}, \Omega) \mid \vec{u} \times \vec{n} \Big|_{\partial\Omega} = 0\} \end{aligned}$$

Для задачи (1)-(2) сформулируем вариационную постановку:

Для заданного $\vec{J} \in L^2(\Omega) \times (0, T)$ найти $\vec{E} \in H_0(\operatorname{rot}, \Omega) \times (0, T)$ такое, что $\forall \vec{W} \in H_0(\operatorname{rot}, \Omega) \times (0, T)$ выполняется

$$(\mu^{-1} \operatorname{rot} \vec{E}, \operatorname{rot} \vec{W})_{\Omega} + \sigma \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \vec{W} \right)_{\Omega} = - \left(\frac{\partial \vec{J}}{\partial t}, \vec{W} \right)_{\Omega} - \int_{\partial\Omega} \mu^{-1} (\vec{W} \times \vec{n}) \operatorname{rot} \vec{E} dS \quad (3)$$

С учетом краевых условий (2), представляя напряженность $\vec{E}$ в виде разложения по базисным функциям $\vec{W}_i$, $i = 1, N_e$, ассоциированными с ребрами тетраэдрального разбиения (N_e) запишем задачу (3) в матричном виде:

$$A\vec{e} + \sigma C \frac{\partial \vec{e}}{\partial t} = -\frac{\partial \vec{F}}{\partial t} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} [A]_{ij} &= \int_{\Omega} \mu^{-1} \operatorname{rot} \vec{W}_i \cdot \operatorname{rot} \vec{W}_j d\Omega, \quad i, j = 1, N_e \\ [C]_{ij} &= \int_{\Omega} \vec{W}_i \cdot \vec{W}_j d\Omega, \quad i, j = 1, N_e \\ [F]_i &= \int_{\Omega} \vec{J} \cdot \vec{W}_i d\Omega, \quad i = 1, N_e \end{aligned}$$

Для аппроксимации задачи (4) по времени использовалась неявная трех-
слойная схема с изменяющимся шагом по времени [6]:

$$\begin{cases} A\mathbf{e}^n + C \frac{\mathbf{e}^n - \mathbf{e}^{n-1}}{\Delta t} = -\frac{\mathbf{F}^n - \mathbf{F}^{n-1}}{\Delta t}, & \text{в момент работы источника} \\ A\mathbf{e}^n + \frac{\Delta t_2 + \Delta t_0}{\Delta t_2 \Delta t_0} C \mathbf{e}^n - \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1 \Delta t_0} C \mathbf{e}^{n-1} + \frac{\Delta t_0}{\Delta t_1 \Delta t_2} C \mathbf{e}^{n-2} = 0, & t \in (0, T_1) \end{cases}$$

где T_1 – время окончания моделирования после отключения тока в источнике,
 $\Delta t, \Delta t_0, \Delta t_1, \Delta t_2$ – шаги аппроксимации по времени. Достаточно малые шаги по
времени в начале измерений постепенно увеличиваются и позволяют за неболь-
шое количество итераций достигать больших времен измерений.

Обсуждение результатов

Из рисунка 2 видно, что параметры аномального сигнала достаточно хорошо
коррелируют с глубиной залегания кровли и можно проследить возрастающую зави-
симость для времен достижения минимума аномалии с ростом глубины и экспонен-
циальное снижение амплитуды минимального экстремума с ростом глубины. Сопро-
тивление вмещающей среды никак не коррелирует с глубиной залегания объекта, но
оказывает существенное влияние на времена и амплитуды аномального сигнала. В
результате чего наблюдается размытие времен достижения минимума аномалии для
объектов на одной глубине залегания. Полученные данные были поделены в соотно-
шении 80:20 на обучающую выборку и тестовую. На обучающей выборке было про-
ведено обучение нейросети в течении 1000 и 10000 эпох. Большое количество эпох
связано с небольшим количеством данных. В каждую эпоху фиксировалась ошибка
результатов на данных из обучающих и тестовых выборок. На рисунке 3 представ-
лено снижение абсолютной ошибки по эпохам на двух выборках. Малое количество
обучающих данных не позволяет снизить ошибку меньше, чем 5.8 на тестовой вы-
борке при обучении в 1000 эпох. При большом количестве эпох обучения на малом
количестве данных происходит переобучение сети, и ошибка предсказания на тесто-
вой выборке возрастает до 8.2. На обучающей выборке ошибка медленно снижается,
но на тестовой выборке наблюдается рост ошибки. На рисунке 4 показано распре-
деление предсказанных нейросетью глубин залегания на тестовой выборке и распре-

деление относительных ошибок. Видно, что большая часть тестовой выборки попадает в 10% коридор относительной ошибки. Максимальная ошибка достигает 43%.

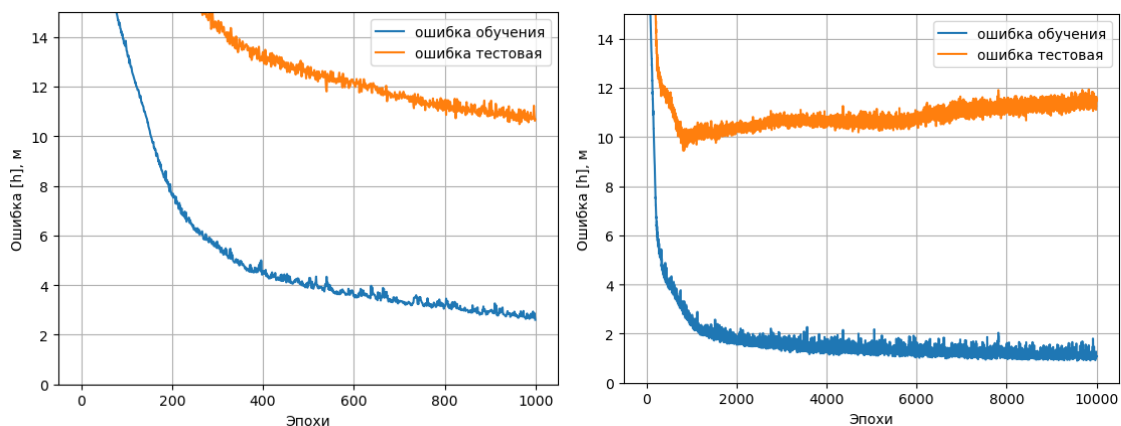


Рис. 3. Ошибка предсказания нейросети на обучающей и тестовой выборках в процессе обучения

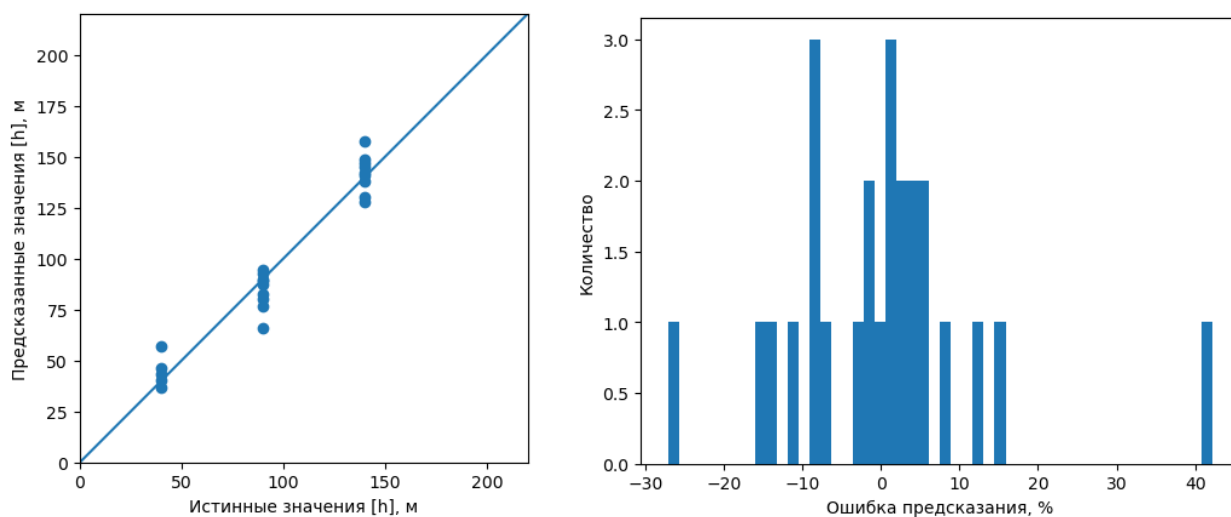


Рис. 4. Предсказания нейросети глубины залегания кровли (справа) и относительная ошибка предсказания (слева) на тестовой выборке при обучении сети в течение 1000 эпох

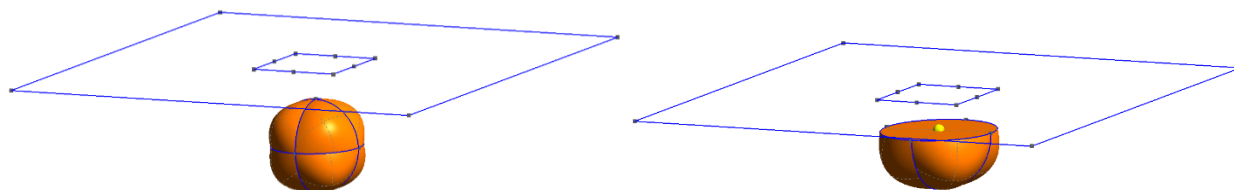


Рис. 5. Взаимное расположение зондирующей установки и объектов для контрольной выборки

Чтобы проверить возможности оценки глубины залегания кровли с помощью нейросети, оценим глубину залегания объектов не пластообразной формы: шара радиусом 52 м с электропроводностью 0.1 См/м, половине шара радиусом 63.5 м с электропроводностью 0.1 См/м и половине шара радиусом 52 м с электропроводностью 0.2 См/м (рис. 5). Размеры объектов выбраны таким образом, чтобы примерно сохранить объем и индукционную массу по сравнению с объектами обучающей выборки. Из рисунка 6 можно видеть, что для не пластообразных объектов с компактным распределением объема оценка глубины залегания имеет тенденцию к завышению значений. Наименьшие погрешности определения глубин были получены для объектов с формой половины шара. Наименьшая контрольная глубина (40 м) была предсказана нейросетью хуже остальных на всех объектах. Для шара на глубине 40 м оценка нейросети составила 68.6 м, что отличается почти на 71% от истины. Остальные глубины и варианты объектов показали относительные ошибки прогноза от 2 до 30% по модулю.

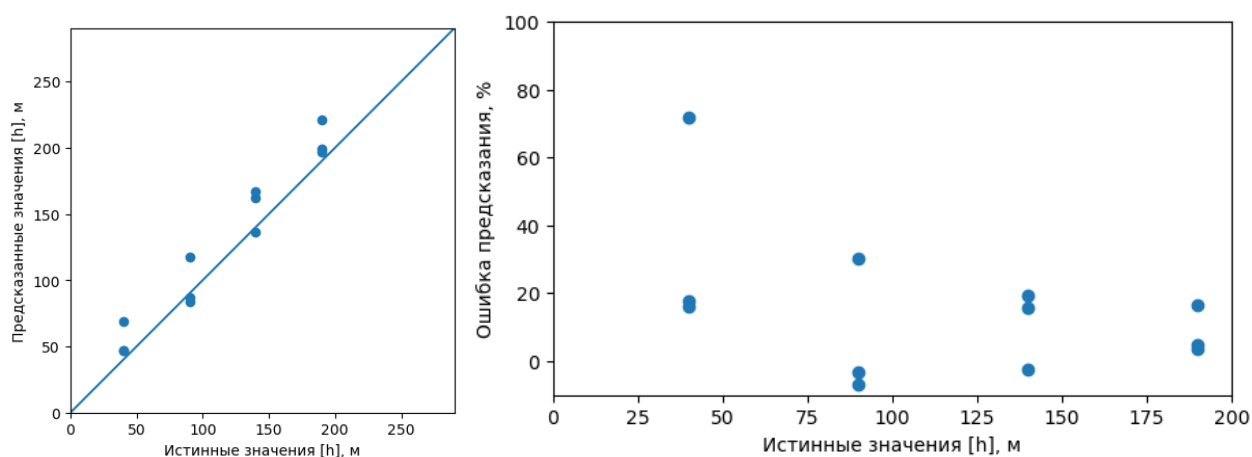


Рис. 6. Предсказания нейросети глубины залегания кровли на произвольной выборке (справа) и относительная ошибка предсказания (слева)

Заключение

Для небольшой выборки данных (125 вариантов) сигналов ЭДС от проводящих объектов пластообразной формы в слабопроводящем пространстве построена полносвязная нейросеть для предсказания глубины залегания кровли объекта. После обучения нейросеть способна предсказывать глубину залегания пластообразных объектов с точностью $\pm 15\%$ в большинстве случаев, а также для объектов другой формы с точностью от 2 до 30% по модулю. Для повышения точности прогноза нейросети необходимо расширить обучающую выборку и повторить процесс обучения, не допуская переобучения модели.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ФНИ FWZZ-2026-0054.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Личная А.Е., Штабель Н.В. Оценка влияния глубины залегания рудного тела на электромагнитные сигналы ЗСБ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь - XX Международный научный конгресс. Международная научная конференция "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 8 т. – СГУГиТ – Новосибирск – том Т. 2 – № 4 – С. 224-232 – 2024
2. Штабель Н.В., Эпов М.И. Влияние индукционных масс проводящих объектов по данным численного трехмерного моделирования сигналов в методе переходных процессов // Физика Земли – № 5 – С. 77-92 – 2025
3. Штабель Н.В., Личная А.Е. Оценка влияния пластообразных проводящих объектов на сигналы электромагнитного зондирования по данным трехмерного моделирования // IX Всероссийская школа семинар по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского, Л.Л. Ваньяна и В.И. Дмитриева: тезисы докладов – М. – 2025
4. Nedelec J.C. Mixed finite elements in R^3 // Numerische Mathematik, 1980, v. 35, № 3, p. 315—341.
5. Nedelec J.C. A new family of mixed finite elements in R^3 // Numer. Mathem., 1986, v. 50, p. 57—81.
6. Штабель Н.В., Эпов М.И., Антонов Е.Ю., Корсаков М.А. Аппроксимация субвертикальной границы в задачах импульсных электромагнитных зондирований // Геология и геофизика – том 55 – № 1 – С. 108-118 – 2014

© Н. В. Штабель, 2026

А. Д. Штейн¹✉, М. И. Протасов¹

Частотно-зависимые лучевые решения: исследование на модельных примерах

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: shteynad@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Численно исследован алгоритм расчёта частотно-зависимых лучевых решений, основанный на структурно-ориентированном сглаживании скоростной модели. На реалистичных синтетических моделях проведено сравнение лучевых траекторий и годографов времён пробега. Полученные результаты качественно согласуются с «точными» частотно-зависимыми лучевыми решениями, что подтверждает корректность разработанного алгоритма.

Ключевые слова: лучевое трассирование, структурно-ориентированное сглаживание, частотная зависимость

A. D. Stein¹✉, M. I. Protasov¹

Frequency dependent ray solutions: investigation on model examples

¹Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of the Siberian Branch
of the RAS, IPGG SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: shteynad@ipgg.sbras.ru

Annotation. A numerical study is performed for an algorithm for computing frequency-dependent ray solutions based on structure-oriented smoothing of the velocity model. A comparison of ray trajectories and traveltime hodographs is carried out using realistic synthetic models. The obtained results qualitatively agree with the “exact” frequency-dependent ray solutions, confirming the correctness of the developed algorithm.

Keywords: ray tracing, structure-oriented smoothing, frequency dependence

Введение

В основе лучевого метода лежит представление волнового поля в виде лучей – траекторий, ортогональных волновым фронтам, вдоль которых энергия переносится в соответствии с принципом Ферма. Для перехода от системы уравнений динамической теории упругости к лучевому методу вводятся два приближения: первое предполагает, что фаза линейно зависит от частоты, а второе заключается в том, что решение получают в виде асимптотического лучевого ряда, что соответствует приближению высоких частот [1]. Лучевой метод является более вычислительно эффективным, но менее точным по сравнению с методами расчёта волнового поля, которые не используют подобных упрощений.

Вследствие введения приближений лучевой метод имеет ряд ограничений. Основными ограничениями являются численная неустойчивость при рассмотрении геологических сред с резкими контрастами скоростей сейсмических волн, а

также несоответствие лучевых решений на низких частотах волновому полю. Для преодоления ограничений и повышения устойчивости лучевого метода используют частотно-зависимые модификации.

В рамках развития лучевого метода был разработан алгоритм расчёта частотно-зависимых времён пробега сейсмических волн [2], состоящий из двух модулей: модуля структурно-ориентированного частотно-зависимого сглаживания скоростной модели и модуля двухточечного лучевого трассирования на основе решения уравнения эйконала. Частотная зависимость для лучевого трассирования учитывается при сглаживании скоростной модели в зависимости от частоты. Алгоритм был использован для получения решений в ряде реалистичных синтетических моделей, где частотно-зависимые лучи сравнивались с высокочастотными решениями и с волновыми полями.

В работе [3] рассматривается алгоритм получения лучевых решений при известном решении уравнения Гельмгольца. Также показано, что траектории «точных» лучей значительно отличаются от траекторий высокочастотных лучей при рассмотрении на средних и низких частотах. В работе [4] было проведено сравнение между «точными» и высокочастотными лучевыми решениями на ряде синтетических моделей – метод, разработанный в работе [3], был программно реализован и проверен.

В рамках данной работы выполнено сравнение лучевых решений, полученных алгоритмом расчёта частотно-зависимых времён пробега сейсмических волн, с «точными» лучевыми решениями в ряде синтетических моделей, которые были рассмотрены в работе [4].

Методы и материалы

Структурно-ориентированное частотно-зависимое сглаживание

В условиях ограниченного частотного диапазона энергия сейсмической волны распространяется не только вдоль луча, но и в окружающей его области, известной как зона Френеля [5]. Реализован алгоритм сглаживания, позволяющий учитывать влияние зоны Френеля.

При сглаживании по зоне Френеля используется модификация сглаживания на основе функции Гаусса. В результате скорость в точке рассчитывается по формуле:

$$c_{sm}(x_{i_0}, z_{j_0}) = \frac{\sum_{i=i_0-N_x}^{i_0+N_x} \sum_{j=j_0-N_z}^{j_0+N_z} w_{ij} \cdot c(x_i, z_j)}{\sum_{i=i_0-N_x}^{i_0+N_x} \sum_{j=j_0-N_z}^{j_0+N_z} w_{ij}}, \quad (1)$$

где $c_{sm}(x_{i_0}, z_{j_0})$ – сглаженная скорость в точке; $c(x_i, z_j)$ – скорость в точке (i, j) окна сглаживания; w_{ij} – весовая функция, состоящая из двух экспонент, отвечающих за сглаживание вдоль и поперёк градиента поля времён. Она рассчитывается по формуле:

$$w_{ij} = e^{-4\alpha_{ij}|p|^2(\cos \beta)^2} \cdot e^{-\alpha_{ij}|p|^2(\sin \beta)^2}, \quad (2)$$

где $\cos \beta$ – угол между вектором $\vec{p}$ из точки (x_{i_0}, z_{j_0}) в точку (x_i, z_j) и вектором $\vec{n}$ градиента поля времён в точке (x_i, z_j) ; α_{ij} – коэффициент, вносящий зависимость от физических свойств. Он вычисляется по формуле

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{\left(\frac{m\lambda_{ij}}{2}\right)^2} = \frac{4\nu^2}{m^2 c_{ij}^2}, \quad (3)$$

где ν – частота, m – номер зоны Френеля. Угол β задаёт направление сглаживания и вычисляется по формуле:

$$\beta(x_i, z_j) = \arccos\left(\frac{(\vec{p} \cdot \vec{n})}{|\vec{p}||\vec{n}|}\right); \quad \vec{p} = (x_i - x_0, z_j - z_0); \quad \vec{n} = \left(\frac{\partial T(x_i, z_j)}{\partial x}, \frac{\partial T(x_i, z_j)}{\partial z}\right), \quad (4)$$

где $T(x_i, z_j)$ – поле времён, известное в каждой точке скоростной модели $c(x_i, z_j)$. Константа в экспоненте, которая отвечает за сглаживание вдоль градиента поля времён, выбрана равной 4 в соответствии с границами зоны Френеля.

Трассирование лучей на основе решения уравнения эйконала

После получения сглаженной модели скоростей на определённой частоте, для источников решается уравнение эйконала и выполняется двухточечное трассирование лучей.

При решении одноточечной задачи происходит расчёт лучевых решений из источника при разных направлениях распространения лучей. Такой подход не позволяет получать лучи, которые попадут точно в приёмник. Для получения лучевого решения в приёмнике обычно выполняется интерполяция значений ближайших к нему лучевых решений. Это требует расчёта большого количества лучей, а также затрат на интерполяцию лучевых решений в каждый приёмник. Решение двухточечной задачи трассирования лучей, расчёт лучей от источника в приёмники, является более эффективным и более сложным подходом по сравнению с решением одноточечной задачи. Эффективность обусловлена тем, что нужно рассчитывать значительно меньше лучей, их количество определяется количеством пар источник-приёмник. Также не требуется интерполяция лучевых решений в приёмники.

Принцип Ферма заключается в том, что сейсмическая волна распространяется между источником A и приёмником B по такой кривой l (называемой лучом), которая обеспечивает минимум времени пробега T в интеграле Ферма [1]:

$$T(l) = \int_A^B \frac{ds}{c(x, z)}. \quad (5)$$

Для расчёта лучей можно использовать подход, описанный в статье [6]. Он заключается в том, что рассчитанное поле времён соответствует минимальному времени в интеграле Ферма, и траектория кривой может быть получена при трассировании луча от приёмника в источник, при этом направление трассирования вычисляется через производные от поля времён:

$$\vec{p} = -\nabla T. \quad (6)$$

Лучи являются решениями системы уравнений Эйлера [1], которая с учётом уравнения (6) приводится к следующему виду:

$$\begin{cases} \frac{dx}{ds} = -c(x, z) \cdot \frac{\partial T(x, z)}{\partial x}; \\ \frac{dz}{ds} = -c(x, z) \cdot \frac{\partial T(x, z)}{\partial z}. \end{cases} \quad (7)$$

Важным уточнением является тот факт, что трассирование при данном подходе от источника в приёмник невозможно, так как в источнике производная времени пробега не существует. Однако согласно принципу взаимности, если источник и приёмник поменять местами, параметры рассчитанного луча не изменятся, поэтому трассирование проводится от приёмника в источник.

Для вычисления поля времён используется реализация метода быстрой маршрутизации второго порядка аппроксимации [7], доступная в пакете программного обеспечения с открытым доступом и исходным кодом Madagascar [8]. Расчёт производных поля времён выполняется конечно-разностным методом со вторым порядком аппроксимации.

Результаты

Приведены результаты сравнения лучевых решений в двух моделях однородной среды с включениями: в первой модели включение представляет собой отрицательную аномалию скорости, а во второй – положительную. Модели были приближены к использованным в работе [4], чтобы траектории лучевых решений также были близкими.

На рисунке 1 показаны результаты численных экспериментов для модели с отрицательной аномалией скорости. Траектории высокочастотных лучевых решений (20 Гц) огибают низкоскоростную аномалию, времена пробега на частоте 20 Гц близки к временам пробега лучевых решений для приближения бесконечной частоты. На частоте 1 Гц лучевые решения распространяются сквозь низкоскоростную аномалию. Наблюдается значительное различие между годографами, причём не только количественное, но и качественное – годограф времён пробега для частоты 1 Гц имеет одну точку минимума на интервале приёмников от 1000 до 3000, а годограф высокочастотных времён пробега имеет две таких точки.

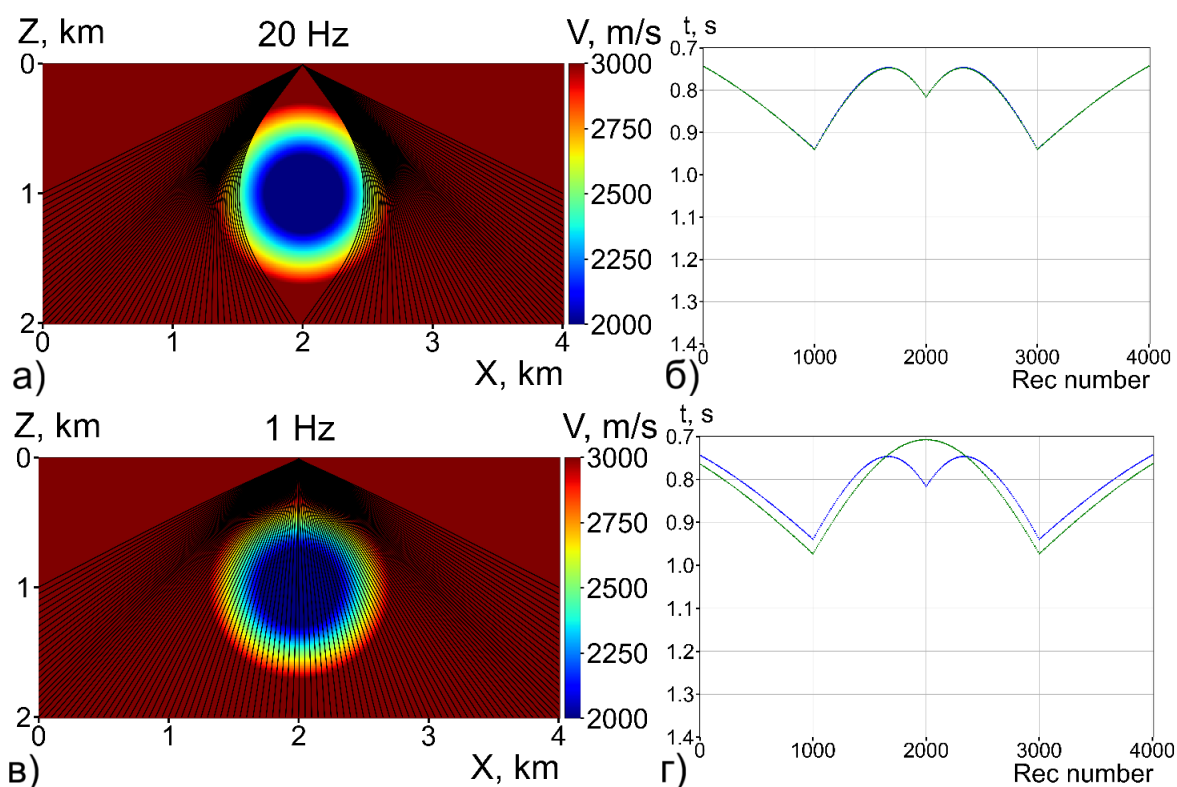


Рис. 1. Результаты численных экспериментов для модели с отрицательной аномалией скоростей: лучевые решения на частоте: а) 20 Гц, в) 1 Гц и годографы времён пробега на частоте: б) 20 Гц, г) 1 Гц. Синим цветом показан годограф первых вступлений для приближения бесконечной частоты, зелёным цветом показаны частотно-зависимые времена пробега. Приемники расположены на левой границе (на глубине от 1 до 2 км), на первых 1000 м на графике времён пробега, на нижней границе (от 1000 до 3000 м на графике времён пробега) и на правой границе (последние 1000 м на графике времён пробега).

На рисунке 2 показаны результаты численных экспериментов для модели с положительной аномалией скорости. Траектории высокочастотных лучевых решений (20 Гц) сгущаются в области аномалии. Времена пробега на частоте 20 Гц близки к временам пробега лучевых решений для приближения бесконечной частоты. На частоте 1 Гц лучевые решения имеют регулярные траектории, охватывая всю область нижней части модели. Наблюдается значительное различие между годографами высокочастотных и низкочастотных лучевых решений.

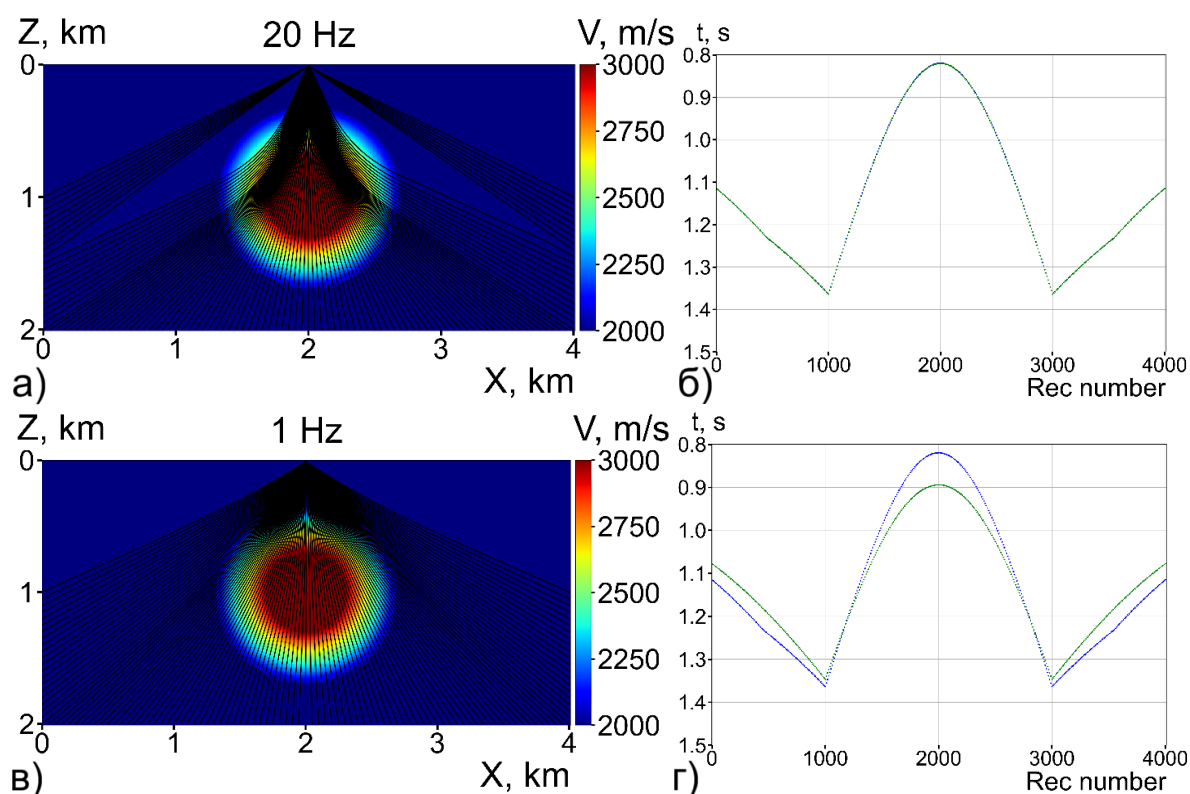


Рис. 2. Результаты численных экспериментов для модели с положительной аномалией скоростей:

лучевые решения на частоте: а) 20 Гц, в) 1 Гц и годографы времён пробега на частоте:

б) 20 Гц, г) 1 Гц. Синим цветом показан годограф первых вступлений для приближения бесконечной частоты, зелёным цветом показаны частотно-зависимые времена пробега. Приемники расположены на левой границе (на глубине от 1 до 2 км), на первых 1000 м на графике времён пробега, на нижней границе (от 1000 до 3000 м на графике времён пробега) и на правой границе (последние 1000 м на графике времён пробега).

Заключение

В работе на модельных примерах исследованы траектории лучевых решений и времена пробега, полученные с использованием алгоритма расчёта частотно-зависимых времён пробега сейсмических волн. Предлагаемый подход позволяет учитывать конечную ширину зоны Френеля и, как следствие, воспроизводить эффекты распространения сейсмических волн на низких частотах, которые принципиально отличаются от высокочастотного приближения. В модели с отрицательной аномалией скорости низкочастотные лучи (1 Гц) проходят сквозь аномалию, тогда как высокочастотные (20 Гц) огибают её, что приводит к качественному различию годографов времён пробега. В модели с положительной аномалией высокочастотные лучи фокусируются внутри аномалии, тогда как низкочастотные демонстрируют регулярное поведение, охватывая всю область модели. Полученные результаты качественно согласуются с «точными» лучевыми решениями, рассчитанными на основе решения уравнения Гельмгольца в работе [4], что подтверждает корректность предложенного алгоритма.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ FWZZ-2026-0050.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Popov M. M. Ray theory and gaussian beam method for geophysicists. – Salvador : EDUFBA, 2002. – 172 p.
2. Foreman T. L. An exact ray theoretical formulation of the Helmholtz equation // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1989. – Vol. 86, No. 1. – P. 234–246.
3. Protasov M., Gadyshin K. Computational method for exact frequency-dependent rays on the basis of the solution of the Helmholtz equation // Geophysical Journal International. – 2017. – Vol. 210, No. 1. – P. 525–533.
4. Штейн А. Д., Протасов М. И. Алгоритм расчета частотно-зависимых времен пробега сейсмических волн // Геофизика. – 2025. – № 6. – С. 10–15.
5. Červený V., Soares J. E. P. Fresnel volume ray tracing // Geophysics. – 1992. – Vol. 57, No. 7. – P. 902–915.
6. Сердюков А. С., Протасов М. И. Двухточечное трассирование лучей на основе решения уравнения эйконала // Геофизика. – 2012. – № 3. – С. 13–18.
7. Rickett J., Fomel S. A second-order fast marching eikonal solver // Stanford Exploration Project, Report 100. – 1999. – P. 287–293.
8. Главная страница Madagascar – программного пакета с открытым исходным кодом для многомерного анализа данных и воспроизводимых вычислительных экспериментов [Электронный ресурс]. – URL: https://ahay.org/wiki/Main_Page (дата обращения: 27.04.2026).

© А. Д. Штейн, М. И. Протасов, 2026

Т. А. Янушенко^{1✉}, Н. А. Голиков¹

Зависимость поверхностной релаксивности от типа глинистости и удельной поверхности по данным ЯМР-релаксометрии

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: YanushenkoTA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Поверхностная релаксивность является необходимым параметром для успешного получения распределения пор по размерам из спектров времен поперечной релаксации ядерно-магнитной резонансной (ЯМР) релаксометрии. К сожалению, сложность в определении поверхностной релаксивности для каждого образца и ее неоднозначная зависимость от минералогического состава не позволяет корректно получать распределение пор по размерам. В работе проведены ЯМР эксперименты с оценкой поверхностной релаксивности для искусственных насыпных образцов различных видов глин и для образцов керна Южно-Покамасовского месторождения. Для искусственных насыпных образцов глин получена логарифмическая зависимость поверхностной релаксивности от удельной поверхности. Для реальных образцов керна такой очевидной зависимости зафиксировано не было, однако образцы хорошо делятся на группы методом k-средних по таким параметрам как глинистость, удельная поверхность, коэффициент проницаемости и средневзвешенное значение времени поперечной релаксации. Зависимости поверхностной релаксивности от глинистости и удельной поверхности внутри групп не обнаружено, однако по мере увеличения проницаемости поверхностная релаксивность уменьшается.

Ключевые слова: ядерный магнитный резонанс, поверхностная релаксивность, удельная поверхность, глинистость

T. A. Yanushenko^{1✉}, N. A. Golikov¹

Dependence of surface relaxivity on the type of clay content and specific surface area according to NMR relaxometry data

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS), Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: YanushenkoTA@ipgg.sbras.ru

Abstract. Surface relaxivity is a necessary parameter for successfully obtaining pore size distributions from transverse relaxation time spectra of nuclear magnetic resonance (NMR) relaxometry. Unfortunately, the complexity of determining surface relaxivity for each sample and its ambiguous dependence on mineralogical composition prevents accurate pore size distributions. In this study, NMR experiments were conducted to evaluate surface relaxivity for artificial bulk samples of various clay types and for core samples from the Yuzhno-Pokamasovskoye deposit. For artificial bulk clay samples, a logarithmic dependence of surface relaxivity on specific surface area was obtained. No such obvious dependence was observed for real core samples; however, the samples are easily divided into groups using the k-means method based on parameters such as clay content, specific surface area, permeability coefficient, and weighted average transverse relaxation time. No dependence of surface relaxivity on clay content and specific surface area within groups was found, however, as permeability increases, surface relaxivity decreases.

Keywords: nuclear magnetic resonance, surface relaxivity, specific surface area, clay content

Введение

В последние несколько десятков лет метод ядерно-магнитной резонансной (ЯМР) релаксометрии приобрел широкое применение для получения коэффициентов общей и эффективной пористости, а также для оценки коэффициента проницаемости и доли свободного и связанного флюида. Помимо этого спектры времен поперечной релаксации позволяют оценивать в первом приближении структуру порового пространства [1], что является одной из важнейших характеристик структуры порового пространства.

На скорость поперечной релаксации влияют 3 процесса (формула 1) – объемная релаксация, поверхностная релаксация и релаксация, вызванная диффузией в присутствии градиентов магнитного поля. В нашем исследовании работа прибора осуществлялась в постоянном магнитном поле, поэтому диффузионной составляющей можно пренебречь. Объемной релаксацией в поровом пространстве также можно пренебречь. Тогда основной вклад будет вносить поверхностная релаксация. Она в свою очередь зависит от двух переменных – удельной поверхности и поверхностной релаксивности (формула 2) [1]

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2 \text{ bulk}}} + \frac{1}{T_{2 \text{ surface}}} + \frac{1}{T_{2 \text{ diffusion}}} \quad (1)$$

$$\frac{1}{T_2} \approx \frac{1}{T_{2 \text{ surface}}} \approx \rho \frac{S}{V} = \rho * S_{\text{уд}} \quad (2)$$

Для непосредственного перехода к распределению пор по размерам от спектра времен поперечной релаксации существует несколько моделей. Самыми распространенными из них являются модели цилиндрической формы пор и сферической. Для терригенных горных пород наиболее часто используют модель сферических форм пор:

$$r = 3\rho * T_2 \quad (2)$$

Таким образом, для получения распределения пор по размерам необходимо знать поверхностную релаксивность – свойство, определяющее интенсивность релаксационных процессов на границе порода-флюид. В виду сложности определения значения поверхностной релаксивности переход от спектров времен поперечной релаксации к распределению пор по размерам в большинстве случаев не используется. В случае неопределенности используют осредненное значение поверхностной релаксивности [2] или принимают ее равной 1 [3], что влечет за собой ошибки в определении распределения пор по размерам.

В литературных источниках данная проблематика освещена слабо, особенно в отечественных публикациях [4, 5]. В иностранной литературе информации содержится больше, но крупных статистических исследований не проводилось. Тем не менее исследователи указывают, что для большинства типов глин зависимость поверхностной релаксивности от содержания глинистых минералов

существует [6, 7]. Помимо этого, имеются исследования, показывающие связь поверхностной релаксивности и удельной поверхности [8].

Для уточнения этой связи в рамках нашего исследования были проведены эксперименты как на искусственных насыпных образцах разных типов глин, так и на образцах керна Южно-Покамасовского месторождения.

Методы и материалы

Работа была разделена на две части. В первой части объектом исследования являлись 5 искусственных насыпных образцов разного состава: гранулы кварцевого стекла (модель идеально круглых и гладких зерен), речная, каолиновая и монтмориллонитовая глины и крошка терригенных гнейсовых горных пород. Для проведения исследований одинаковое по объему количество материала засыпалось в стеклянные герметично закрывающиеся пробирки. В них с шагом 0,5 мл добавлялась вода до полного насыщения. На каждом шаге образец выдерживался 24 часа, чтобы вода равномерно распределилась в поровом пространстве. Для каждого образца была измерена удельная поверхность методом БЭТ и выполнены ЯМР-измерения.

Во второй части работы объектом исследования являлись 70 образцов керна Южно-Покамасовского месторождения. Для каждого образца имела информация по удельной поверхности, глинистости, проницаемости и типу глинистости. Для полностью насыщенных образцов были получены спектры времен поперечной релаксации, после чего исходя из формулы 2 была проведена оценка поверхностной релаксивности и последующий анализ связей с другими характеристиками.

ЯМР-измерения проводились на ЯМР анализаторе с частотой резонанса 12 МГц (Nuimag, Китай), расстояние между эхо-импульсами составляло 100 мкс. Кластерный анализ результатов измерений на образцах керна проводился методом k-средних с использованием R-пакета factextra.

Результаты и обсуждение

По результатам измерения удельной поверхности разных типов глин (табл. 1) все образцы можно разделить на две группы: с высоким значением удельной поверхности (среднее значение $16 \text{ м}^2/\text{г}$) и с низким значением (среднее значение $0,84 \text{ м}^2/\text{г}$).

Таблица 1. Характеристики образцов разных типов глин

Образец	Плотность, г/см ³	Средний размер частиц, мкм	Удельная поверхность, м ² /г	T ₂ среднее геометрическое, мс	Поверхностная релаксивность, мкм/с
Гранулы кварцевого стекла	2,51	44	0,22	81,38	22,05
Речная глина	2,67	37	15,38	5,73	4,25
Монтмориллонитовая глина	2,67	9,25	18,57	8,29	2,43
Каолиновая глина	2,49	4,62	13,93	15,06	1,91
Крошка горной породы	2,77	31,11	1,46	11,42	21,58

По величине сдвига максимума спектра времен поперечной релаксации по мере насыщения водой образцы делятся на 2 группы – со слабым смещением (не более чем в 1,5 раза) и большим смещением (больше, чем в 1,5 раза). При этом значения удельной поверхности не коррелируют с величиной смещения максимумов.

Большие значения поверхностной релаксивности соответствуют гранулам кварцевого стекла и крошке горной породы (среднее значение 21,8 мкм/с). Глины же имеют малые значения поверхностной релаксивности (среднее значение 2,9 мкм/с). Таким образом, зависимость поверхностной релаксивности от удельной поверхности имеет логарифмический вид с коэффициентом корреляции 0,88 (рис.1). Увеличение удельной поверхности приводит к резкому уменьшению как времен поперечной релаксации, так и поверхностной релаксивности.

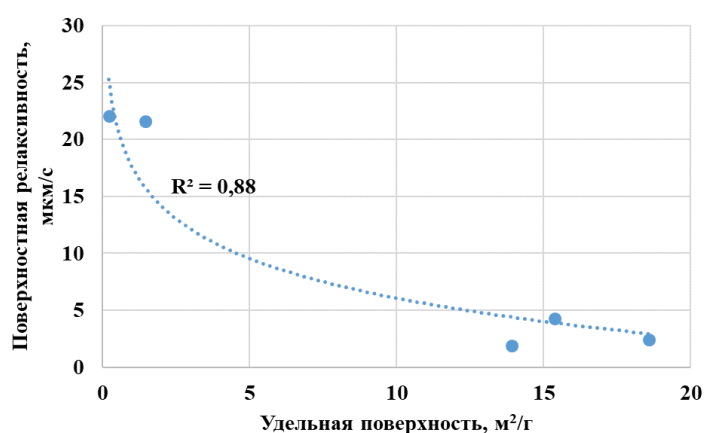


Рис. 1. Зависимость поверхностной релаксивности от удельной поверхности

Для образцов керна точных зависимостей полученной поверхностной релаксивности от удельной поверхности или глинистости обнаружено не было. Поэтому образцы были разбиты на 3 группы методом к-средних на основе параметров средневзвешенного времени поперечной релаксации, глинистости, удельной поверхности и проницаемости по газу (рис.2). Средние значения для каждой из групп приведены в таблице 2.

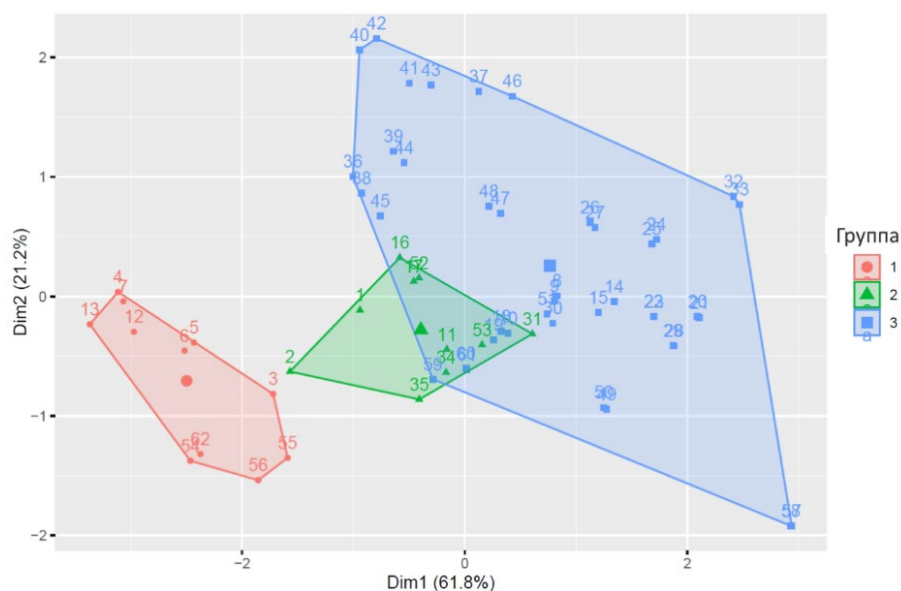


Рис. 2. Разбиение образцов на группы методом к-средних

Таблица 2. Средние значения параметров по группам

Группа	T ₂ среднегеометрическое, мс	Удельная поверхность, м ² /г	Глинистость, %	Проницаемость, мД
1	19,45	2,33	1,89	378,93
2	10,07	2,73	3,34	112,98
3	8	3,12	6,24	10,56

Группы значимо различаются по проницаемости, среднегеометрическому времени поперечной релаксации и глинистости (критерий Манна-Уини с поправкой Бенджамини-Хохберга, скорректированное значение $p < 0,05$). Удельная поверхность от группы к группе отличается слабо, что вероятно, связано с незначительными изменениями глинистости (среднее содержание глины в образцах керна составляет 5,5%).

При обработке данных расчетов поверхностной релаксивности явных зависимостей от удельной поверхности или глинистости не выявлено. При анализе зависимости поверхностной релаксивности от проницаемости можно с большой уверенностью выделить три группы точек (рис. 3). Большим значениям проницаемости, а соответственно, пониженному содержанию глинистости (среднее значение 378,9 мД) соответствуют малые значения поверхностной релаксивности (среднее значение 8,83 мкм/с), и наоборот, малым значениям проницаемости (среднее значение 10,56 мД) соответствуют большие значения поверхностной релаксивности (среднее значение 21,61 мкм/с).

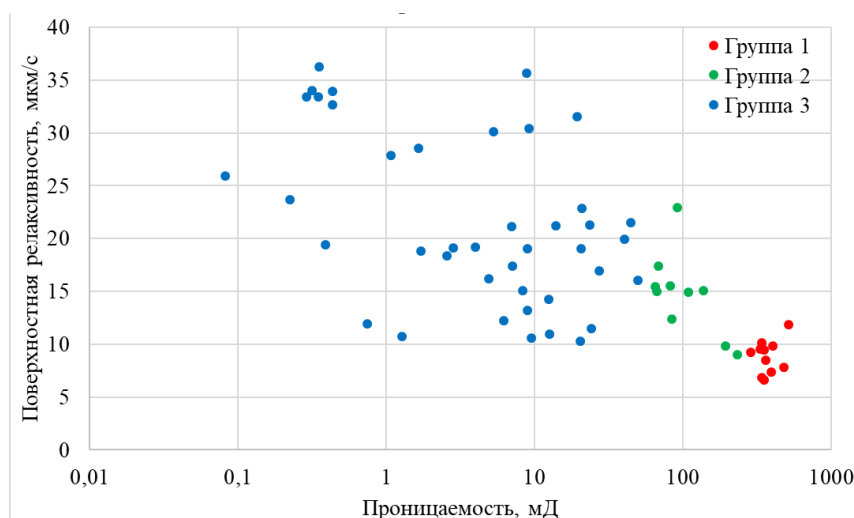


Рис. 3. Зависимость поверхностной релаксивности от проницаемости

Заключение

С целью расширения возможностей применения метода ЯМР-релаксометрии для изучения структуры порового пространства требуется точно определять поверхностную релаксивность. Показано, что для насыпных глинистых образцов существенное влияние оказывает удельная поверхность. Высокой удельной поверхности соответствуют малые значения поверхностной релаксивности. Для образцов керна Южно-Покамасовского месторождения связь поверхностная релаксивность-удельная поверхность не такая очевидная. Образцы достаточно явно разбиваются на группы по глинистости, проницаемости и средневзвешенному значению времен поперечной релаксации. Явной зависимости поверхностной релаксивности от удельной поверхности не было выявлено, однако анализ зависимости поверхностной релаксивности от проницаемости позволяет разбить образцы на отдельные три группы, для которых по мере увеличения проницаемости происходит уменьшение значения поверхностной релаксивности.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2026-0049 «Электродинамика многомасштабной геологической среды как основа наукоемких технологий в нефтяной и рудной геологоразведке и инженерной геологии в Сибири и Арктической зоне РФ».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Coates G.R., Prammer M.G., Xiao L. NMR Logging Principles and applications – Houston: Hulliburton Energy Services Publishing, 2001. – 342 p.
2. Stingaciu L. R., Weihermüller L., Haber-Pohlmeier S., Stapf S., Vereecken H., Pohlmeier A. Determination of pore size distribution and hydraulic properties using nuclear magnetic resonance relaxometry: A comparative study of laboratory methods // Water Resources Research – 2010. – Vol. 46. – P. 11.

3. Zhang N., Wang S., Xun X., Wang H., Sun X., He M. Pore Structure and Fractal Characteristics of Coal-Measure Sedimentary Rocks Using Nuclear Magnetic Resonance (NMR) and Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – № 9. – P. 17.
4. Рогозин А.А., Игнатьева Т.С., Чурков А.В. Комплексирование данных ЯМР-релаксометрии и электрометрических исследований на примере пород-коллекторов месторождений Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции // *Экспозиция Нефть Газ*. – 2021. – № 6. – С. 62–66.
5. Шумская М.И., Глинских В.Н. Экспериментальное исследование зависимости ЯМР-характеристик от удельной поверхности и удельного электрического сопротивления песчано-алевритоглинистых образцов // *Геология и геофизика*. – 2016. – Т. 57. – № 10. – С. 1911–1918.
6. Li J., Wang M., Jia W. A modified surface to volume (SVR) method to calculate nuclear magnetic resonance (NMR) surface relaxivity: Theory and a case study in shale reservoirs // *Marine and Petroleum Geology*. – 2024. – Vol. 170. – P. 13.
7. Saidian M., Prasad M. Effect of mineralogy on nuclear magnetic resonance surface relaxivity: A case study of Middle Bakken and Three Forks formations // *Fuel*. – 2015. – Vol. 161. – P. 10.
8. 11. P. Zhao, Wanga L., Xuc C., Fud J., Shid Y., Maoa Z., Xiaoe D. Nuclear magnetic resonance surface relaxivity and its advanced application in calculating pore size distributions // *Marine and Petroleum Geology*. – 2020. – Vol. 111. – P. 9.

© Т. А. Янушенко, Н. А. Голиков, 2026

A. B. Azarov¹✉, A. A. Niukkanen¹

Моделирование гидроразрыва вблизи полостей в среде, содержащей естественные трещины

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: antonazv@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается задача распространения гидроразрыва вблизи полостей в среде, которая содержит естественные трещины. Описывается подход, основанный на методе конечных элементов (МКЭ) с помощью которого можно моделировать гидроразрыв при таких условиях. Приводятся возможности разработанной программы, которая реализует данный подход, и которая позволяет строить двумерные модели с круговым отверстием и с различными и различными конфигурациями естественных трещин: одиночная трещина, трещиноватый слой, а также среда с заданной ориентацией системы трещин. Приводятся и анализируются результаты численных экспериментов. Показано, как наличие коротких трещин в среде влияет на траектории гидроразрывов вблизи полостей в условиях всестороннего сжатия. Продемонстрированы особенности распространения гидроразрывов в модели, содержащей трещиноватый слой, примыкающий к круговому отверстию. Выявлены некоторые закономерности распространения разрывов в таких условиях.

Ключевые слова: породный массив, горная выработка, напряженное состояние, гидравлический разрыв, естественная трещина, пересечение трещины и гидроразрыва, гидроразрыв вблизи полости, численное моделирование, метод конечных элементов

A. V. Azarov¹✉, A. A. Niukkanen¹

Modeling of hydraulic fracturing near cavities in a medium containing natural fractures

¹Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: antonazv@mail.ru

Abstract. The paper considers the problem of hydraulic fracturing propagation near cavities in a medium containing natural cracks. A finite element method (FEM) approach for simulating hydraulic fractures under these conditions is described. The capabilities of the developed program implementing this approach are discussed, enabling the construction of two-dimensional models with a circular opening and various configurations of natural fractures: a single fracture, a fractured layer, and a medium with a specified orientation of the fracture system. The results of numerical experiments are presented and analyzed. It is shown how the presence of short fractures in the medium affects the trajectories of hydraulic fractures near cavities under uniform compression. Features of hydraulic fracture propagation are demonstrated in a model containing a fractured layer adjacent to a circular opening. Some patterns of fracture propagation under these conditions are identified.

Keywords: rock mass, mine working, stress state, hydraulic fracturing, natural fracture, intersection of fracture and hydraulic fracturing, hydraulic fracturing near a cavity, numerical modeling, finite element method

Введение

Гидроразрыв пласта (ГРП) является широко используемой технологией в горном деле. Она применяется для решения таких задач, как дегазация угольных пластов [1], измерение напряжений в среде [2], разупрочнение кровли горных выработок [3,4] и т.д. Суть данной технологии заключается в закачивании в горную породу жидкости под высоким давлением с целью создания в ней трещин.

Известно, что на создаваемые трещины оказывает влияние множество факторов. Например, свойства и строение среды, напряженно-деформированное состояние среды, свойства жидкости разрыва и режимы её закачки, параметры инициатора разрыва/начальной трещины. Тем не менее из-за своей сложности процесс гидроразрыва до конца не изучен, особенно в случаях, когда геологическая среда содержит естественные трещины или полости. Именно такие условия могут возникать при использовании ГРП при разработке полезных ископаемых подземным способом. Поэтому возникает задача изучения закономерностей распространения гидроразрыва в среде с естественными трещинами вблизи полостей. Её решение позволит повысить эффективность рассматриваемой технологии. В данной работе предлагается решать эту задачу численно с помощью подхода реализованного на базе метода конечных элементов, который будет описан ниже.

Выбранный подход не является новым и ранее уже предлагался различными авторами при исследованиях распространения гидроразрывов в трещиноватых средах [5-7]. Он является усовершенствованием подхода, когда направление роста гидроразрыва и естественная трещина задаются с помощью специальных заранее проложенных с модели слоев [8-11]. К недостаткам выбранного подхода можно отнести сильную зависимость траекторий от сетки, её структуры. Тем не менее его может оказаться достаточно в некоторых случаях. Отметим, что наряду с этим подходом при решении подобных задач в настоящее время используются другие методы, такие как расширенный метод конечных элементов (XFEM) [12-15], метод дискретных элементов дискретных элементов (DEM) [16,17] или метод фазового поля (FFM) [18-20]. Но все они обладают своими недостатками и не могут применяться как универсальный инструмент.

Метод моделирования гидроразрыва в среде с трещинами

С целью изучения распространения гидроразрыва в среде с трещинами был реализован специальный подход на базе метода конечных элементов. Заключается он в использовании двух типов элементов при построение конечно-элементной модели. Первый тип предназначен для моделирования напряженно-деформированного состояния материала. Это классические элементы, которые применяются в методе конечных элементов. Второй тип предназначен для моделирования процессов разрушения, разрывов в среде и потока жидкости в них. Т.е. с помощью этих элементов в численной модели можно реализовывать естественные трещины и рост трещины гидроразрыва. Для простоты изложения далее будем их называть соединительными элементами.

Реализация данного подхода проходит в два основных шага. Первый заключается в построение сетки расчетной области. Второй – во внедрении в сетку соединительных элементов между всеми основными элементами. Схематично процесс преобразования сетки изображен на рисунке 1. Желтым цветом обозначены начальные элементы (элементы первого типа, классические), зеленым – соединительные. Последние определяются четырьмя основными узлами, задающими им форму (обозначены синим цветом) и двумя дополнительными узлами (обозначены черным цветом), через которые производится моделирование потока жидкости. Соединительные элементы имеют нулевую ширину h , чтобы не влиять на координаты начальных узлов сетки, длину равную длине ребра основного элемента, к которому он примыкает. Из этого следует, что они ориентированы и их разрушение происходит только вдоль направления, в котором измеряется длина. Помимо этого, соединительные элементы, вставленные между соседними основными элементами, обладают одним общим узлом (см рис.1), через который производится моделирование потока жидкости. Этот узел обеспечивает связность потока, передачу его параметров из одного соединительного элемента к другому.

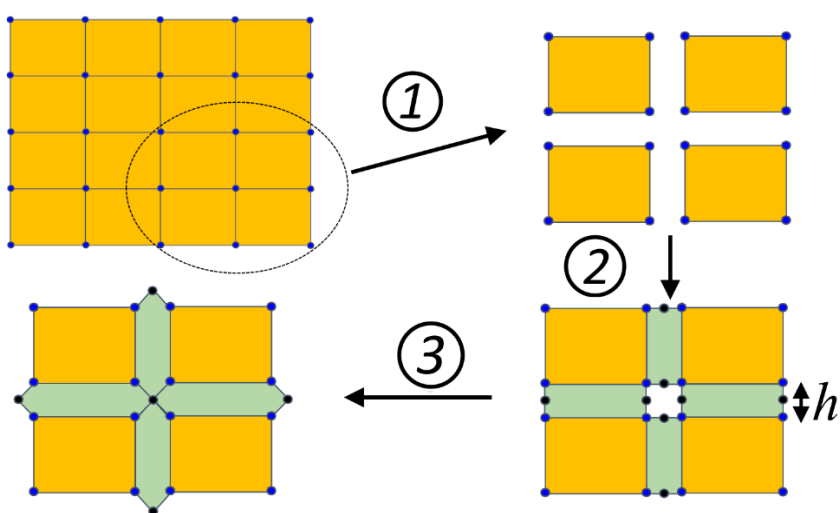


Рис. 1. Схема преобразование начальной конечно-элементной сетки:
 1 – выбор набора основных элементов; 2 – введение между ними дополнительных элементов; 3 – введение общего узла для смежных введенных элементов. Желтым цветом обозначены основные элементы для моделирования напряженно-деформированного состояния, зеленым – дополнительные элементы для моделирования разрушения, разрывов в среде и потока жидкости в них. Узлы, обозначенные черным цветом необходимы только для моделирования потока жидкости.

В конечно-элементной модели, построенной по такой схеме гидроразрыв, может распространяться только по соединительным элементам. Естественные трещины задаются путем выбора группы соединительных элементов и задание на них низкой или нулевой прочности.

Для реализации описанной выше схемы была реализована специальная программа. С помощью неё можно преобразовывать двумерные сетки, построенные из четырехугольных и треугольных элементов. Помимо это функционал программы позволяет в моделях задавать различные варианты трещин/сети трещин. На рисунке 2 представлены основные конфигурации моделей с круговым отверстием, которые можно построить с помощью программы: рис. 2а - одна трещина (в модели она может быть ориентирована произвольно); рис. 2б – слой ширины H с трещинами, которые ориентированы вдоль него; рис. 2в – среда с трещинами, ориентированными под некоторым углом α к горизонтальной плоскости. В последних двух случаях трещины могут задаваться либо вручную, либо автоматически случайным образом. В последнем варианте задается вероятность выбора соединительных элементов из всех элементов направление которых совпадает с направлением трещиноватости. Здесь важно, чтобы на построенной сетки грани основного числа элементов были сориентированы по направлению трещиноватости.

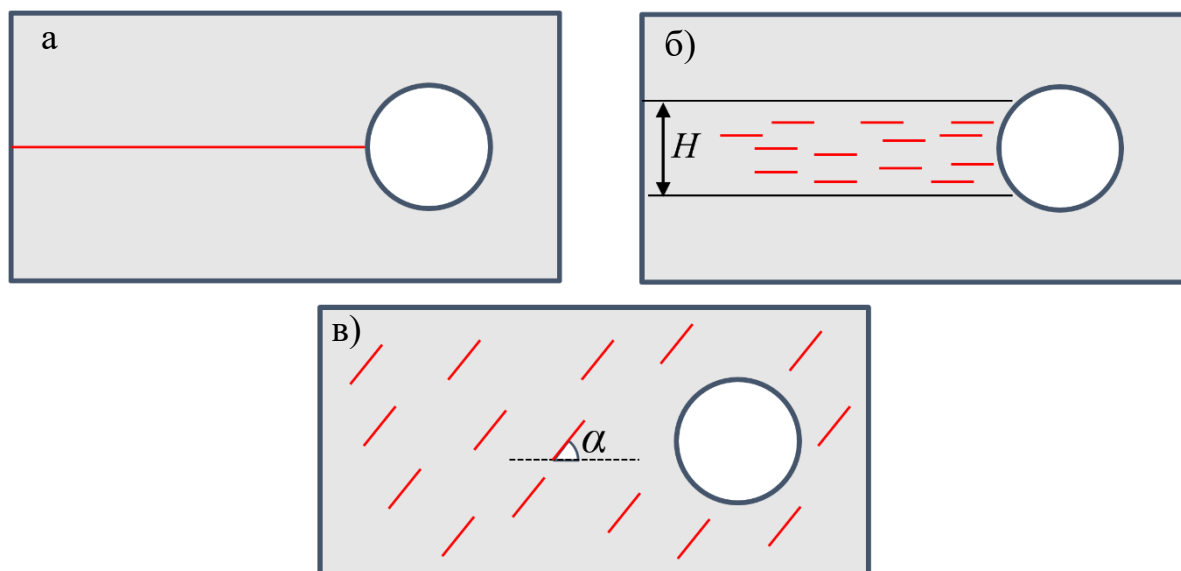


Рис. 2. Различные модели содержащие естественные трещины и полость которые можно реализовать в созданной программе:

- а) модель с одной трещиной; б) трещиноватый слой, примыкающий к полости;
- в) трещиноватая среда с выбранным направлением трещиноватости.

Постановка задачи

Так как в исследованиях используется метод конечных элементов, то расчетная область имеет конечные размеры. На её границах устанавливаются условия изображенных на рисунке 3: к левой и верхней границе приложены давления P_1 и P_2 соответственно, на правой и нижней границе условия нулевых перемещений по горизонтали и вертикали соответственно. На круговом отверстии радиуса R действует условие свободной поверхности.

В рамках данного подхода позиция начальной трещины гидроразрыва может быть любой. Для удобного её задания в модели вводится два три параметра: d – смещение в сторону от полости, b – смещение вниз, β – угол поворота начальной трещины относительно вертикального направления. В начальную трещину вводится поток жидкости. Среда считается упругой. Расчет распространения трещины гидроразрыва производится в квазистатическом приближении.

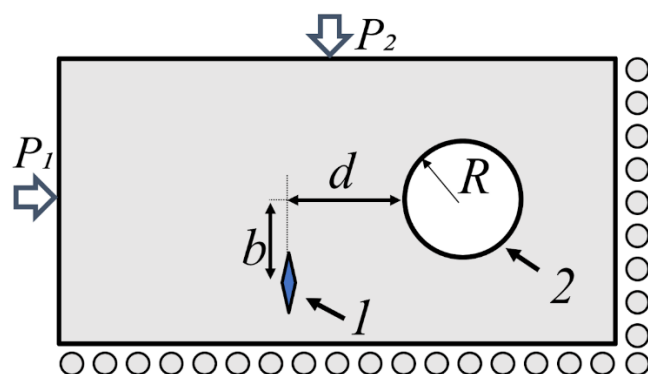


Рис. 3. Постановка задачи, где показана начальная трещина гидроразрыва (цифра 1), полость (цифра 2) и граничные условия.

Численные эксперименты

При численных расчетах использовались следующие основные параметры: размеры расчетной области 150х150 метров (выбран большим для снижения влияния границ на результаты), радиус полости 2.5 метра, модуль упругости материала 10 ГПа, коэффициент Пуассона 0.2, прочность материала на растяжение 1 МПа, вязкость жидкости разрыва 0.001 Па*с. Остальные параметры изменялись.

Далее приведем результаты некоторых численных экспериментов. Вначале рассмотрим среду с горизонтальной трещиноватостью (модель из рис. 2в, где угол α равен нулю). Позиции коротких трещин выбирались случайным образом. Их прочность задавалась равной 0.001 МПа, т.е. на три порядка меньше, чем у основного материала. Размер элементов вблизи полости составлял 0.2 метра. На рисунке 5а показана траектория гидроразрыва на сетке, построенной из четырехугольных элементов при $P_1=P_2=5$ МПа, $d=2R$. На рисунке 5б на сетке из треугольных элементов при $P_1=P_2=5$ МПа, $d=R$. В данных примерах гидроразрыв при развитии смещался в сторону полости. Смещение происходило по естественным трещинам, введенных в модель. При высоком уровне сжатия (давления P_1 и P_2 выше, чем прочность материала введенных элементов на растяжение) это поведение сохранялось. При низком напряжении в среде (P_1 и P_2 сравнимо или меньше прочности материала) гидроразрыв ориентировался вдоль направления трещиноватости и распространялся от кругового отверстия. Выход в отверстие наблюдался при P_1 и P_2 на порядок меньше, чем прочность материала.

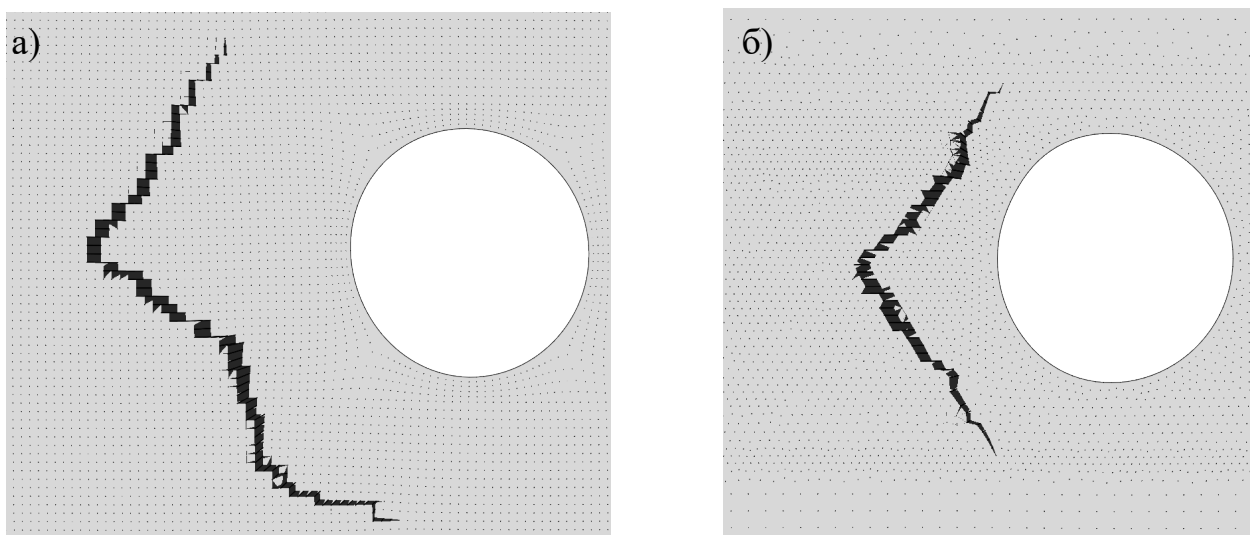


Рис. 4. Траектории гидроразрыва в трещиноватой среде при различных условиях:

- а) сетка из четырехугольных элементов, $P_1=P_2=5$ МПа, $d=2R$;
- б) сетка из треугольных элементов, $P_1=P_2=5$ МПа, $d=R$. Короткие трещины ориентированы горизонтально.

Далее рассмотрим пример пересечения трещиноватого слоя, примыкающего к полости. Пусть слой имеет ширину H равную 1 метр (см. рис. 2б), короткие трещины ориентированы вдоль него. На рисунке 5 показаны траектории гидроразрывов, когда начальная трещина располагалась вне этого слоя и была ориентирована вертикально (параметры позиции $d=R$, $b=R$). В первом случае на рис.5а гидроразрыв пересек этот слой, при этом при прохождении через него произошло смещение вдоль введенных трещин. Этот результат был получен на сетке, построенной из четырехугольных элементов и $P_1=P_2=2$ МПа. Во втором случае (рис. 5б) также произошло пересечение, но наблюдаются более значительные смещения вдоль слоя. Здесь использовалась треугольная сетка и значения сжатия среды ниже, чем в первом примере ($P_1=P_2=2$ МПа).

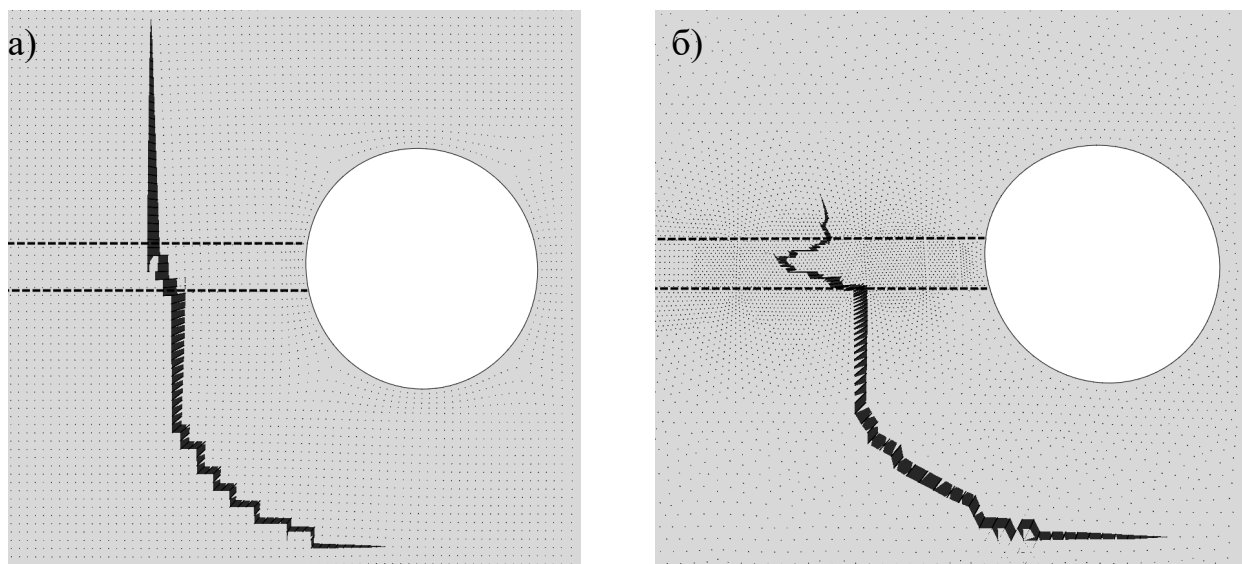


Рис. 5. Траектории гидроразрыва в модели с трещиноватым слоем примыкающим к полости при различных условиях:

а) сетка из четырехугольных элементов, $P_1=P_2=5$ МПа; б) сетка из треугольных элементов, $P_1=P_2=2$ МПа, $d=R$. Начальная трещина гидроразрыва располагалась вне слоя ($d=R$, $b=R$) и ориентирована вертикально. Пунктиром обозначены границы слоя.

Численные эксперименты показывают, что снижение сжатия среды приводит к условиям, при которых гидроразрыв не пересекает трещиноватый слой. Повышение сжатия среды или увеличение сжатия в направлении нормальном к слою наоборот, улучшают условия его пересечения. При этом смещения траектории гидроразрыва вдоль него уменьшаются (при высоком сжатии среды смещения не наблюдаются).

Выводы

В работе был представлен метод моделирования распространения гидроразрыва в среде, содержащей трещины и полости. Описаны возможности разработанной программы, которая его реализует. Приведены результаты численных экспериментов. Показано, что наличие трещин в модели может существенно влиять на траектории получаемых разрывов. В частности, продемонстрировано, что в трещиноватой среде гидроразрыв при распространении смещается в сторону полости по введенным в модель коротким трещинам. Приведены примеры моделирования гидроразрыва в модели с трещиноватым слоем, примыкающего к полости. Показано, что при его пересечении наблюдается смещение траекторий. Величина смещений зависит от сжатия среды: чем выше сжатие и выше напряжение действующие по нормали к слою, тем меньше смещение. При низких значениях сжатия среды пересечений не наблюдается.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-00145, <https://rscf.ru/project/25-17-00145>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Леконцев Ю. М., Сажин П. В., Темиряева О. А. Дегазация угольного пласта методом поинтервального гидроразрыва и оборудование для его реализации // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. – 2018. – Т. 5. – № 2. – С. 89–92
2. Сердюков С. В., Курленя М. В., Патутин А. В. К вопросу об измерении напряжений в породном массиве методом гидроразрыва // *ФТПРПИ*. – 2016. – №. 6. – С. 6–14.
3. Yang, J., Liu, B., Bian, W., Chen, K., Wang, H., Cao, C. Application Cumulative Tensile Explosions for Roof Cutting in Chinese Underground Coal Mines // *Archives of Mining Sciences*. – 2021. – Vol. 66. – №. 3. – P. 421–435.
4. Леконцев Ю. М., Сажин П. В., Темиряева О. А. Дегазация угольного пласта методом поинтервального гидроразрыва и оборудование для его реализации // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. – 2018. – Т. 5. – № 2. – С. 89–92.
5. Li, Y., Deng, J. G., Liu, W., & Feng, Y. Modeling hydraulic fracture propagation using cohesive zone model equipped with frictional contact capability // *Computers and geotechnics*. – 2017. – T. 91. – C. 58-70.
6. Wang H. Y. Hydraulic fracture propagation in naturally fractured reservoirs: Complex fracture or fracture networks // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2019. – T. 68. – C. 102911.
7. Xia B. et al. Numerical simulation of multiple hydraulic fracture propagation in heterogeneous coal reservoirs based on combined finite-discrete element method // *Frontiers in Earth Science*. – 2024. – T. 12. – C. 1411129.
8. Sanchez E. C. M., Cordero J. A. R., Roehl D. Numerical simulation of three-dimensional fracture interaction // *Computers and Geotechnics*. – 2020. – T. 122. – C. 103528.
9. Xi X. et al. Mixed-mode fracture modelling of the near-wellbore interaction between hydraulic fracture and natural fracture // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2022. – T. 55. – №. 9. – C. 5433-5452.
10. Wang, D., Dong, Y., Sun, D., & Yu, B. A three-dimensional numerical study of hydraulic fracturing with degradable diverting materials via CZM-based FEM // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2020. – T. 237. – C. 107251.
11. Азаров А.В., Сказка В.В., Сердюков С.В. Численное моделирование взаимодействия трещины гидроразрыва и проницаемой трещины вблизи полости // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. -2025. -№6. – С. 84-94
12. Tan P., Jin Y., Pang H. Hydraulic fracture vertical propagation behavior in transversely isotropic layered shale formation with transition zone using XFEM-based CZM method // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2021. – T. 248. – C. 107707.
13. Zhou Y., Yang D. A fast simulation method for hydraulic-fracture-network generation in fractured rock based on fully coupled XFEM // *Computers and Geotechnics*. – 2022. – T. 150. – C. 104892.
14. Zhang J. N. et al. A hybrid numerical approach for hydraulic fracturing in a naturally fractured formation combining the XFEM and phase-field model // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2022. – T. 271. – C. 108621.
15. Wang Y., Javadi A. A., Fidelibus C. A hydro-mechanically-coupled XFEM model for the injection-induced evolution of multiple fractures // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. – 2023. – T. 47. – №. 9. – C. 1539-1558.
16. Seok Yoon J. et al. Discrete element modelling of hydraulic fracture propagation and dynamic interaction with natural fractures in hard rock // *ISRM EUROCK*. – ISRM, 2017. – C. ISRM-EUROCK-2017-130.
17. Yang, W. M., Geng, Y., Zhou, Z. Q., Li, L. P., Gao, C. L., Wang, M. X., & Zhang, D. S. DEM numerical simulation study on fracture propagation of synchronous fracturing in a double

fracture rock mass //Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. – 2020. – T. 6. – №. 2. – C. 39.

18. Li X. et al. Phase-field modelling of interactions between hydraulic fractures and natural fractures //Rock mechanics and rock engineering. – 2022. – T. 55. – №. 10. – C. 6227-6247.

19. Peng G. Fracture propagation laws of staged hydraulic fracture in fractured geothermal reservoir based on phase field model //International Journal of Coal Science & Technology. – 2023. – T. 10. – №. 1. – C. 52.

20. Wu D., Tang X., Shao Z. A novel phase-field model for investigating the interaction between hydraulic fractures and natural fractures //Engineering Analysis with Boundary Elements. – 2026. – T. 188. – C. 106774.

© *A. B. Азаров, A. A. Ниукканен, 2026*

С. Е. Алексеев¹✉, Б. Кубанычбек¹

Совершенствование конструкций погружных пневмударников высокого давления

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, г. Новосибирск, Российская федерация.
e-mail: Alex@misd.ru

Аннотация: Показаны преимущества использования энергоносителя высокого давления. Представлена схема погружных пневмударников высокого давления ПВ170 и ПВ130. Приведены результаты их испытаний. Для данной схемы есть возможность введения разрядного клапана, который опорожняет камеру прямого хода во время движения ударника на обратном ходу, уменьшает препятствие движению и обеспечивает большой рабочий ход ударника. Приведена конструкция пневмударника ПВ254 с разрядным клапаном. Произведен анализ прочности наиболее нагруженной детали – ударника. Для увеличения прочностных характеристик рассматривается выбор высокопрочных сталей и усовершенствование технологии термообработки.

Ключевые слова: энергия удара, давление, клапан, порода, скважина, буровой инструмент.

S. E. Alekseev¹✉, B. Kubanychbek¹

Design improvement of high air pressure DTH hammers

¹Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia
e-mail: Alex@misd.ru

Abstract: The advantages of application of a high pressure energy source are demonstrated. The schematic of high air pressure DTH hammer models PV170 and PV130 is described. Their test data are reported. This schematic allows introduction of an unloading valve which empties the forward stroke chamber during the backward travel of the piston, decreases the piston travel obstruction and ensures a longer power stroke of the piston. The design of air hammer PV254 with an unloading valve is presented. The strength of the most loaded part—the piston—is analyzed. For the enhancement of the strength characteristics, a set of high-strength steels and the amendment of the thermal treatment technology are discussed.

Keywords: impact energy, pressure, valve, rock, borehole, drilling t

Введение

Использование пневматических машин ударного действия имеет ряд положительных качеств. Это надежность работы в различных условиях, мобильность, простота обслуживания, относительно невысокая стоимость.

Такие машины разрабатываются для бурения скважин в породах средней и высокой крепости, для проходки скважин в уплотняемых грунтах, для вертикальной и горизонтальной забивки труб, в экскаваторных ковшах активного

действия и других областях. В мировой практике направление создания этих машин остается актуальным и активно развивается [1-3].

В настоящее время выражена тенденция все большего повышения давления используемого сжатого воздуха. Ведущие зарубежные фирмы достаточно давно перешли на давление 0,9 – 1,8 МПа. Сейчас применяется сжатый воздух давлением до 3,5 МПа.

Для погружных пневмоударником технико-экономическими преимуществами повышения давления являются увеличение на порядок скорости бурения и ресурса – скорость бурения с 90 – 150 мм/мин. увеличивается до 800 – 1000 мм/мин. (при бурении по крепким гранитам), а ресурс с 300 – 500 пог. метров скважин до 5000 пог. м. и более. Появляется возможность существенного увеличения глубины бурения, снижается энергоемкость разрушения горных пород. Улучшаются удельные показатели. Так увеличение ударной мощности приходящейся на единицу массы машины для погружных пневмоударником, работающих в ограниченном пространстве скважины, имеет большое значение, поскольку позволяет выполнить машину компактной с обеспечением высокой производительности. Повышается экономичность [4].

В последнее время все большее распространение в России получают зарубежные буровые станки с погружными пневмоударниками высокого давления. Создание отечественных конструкций способствует решению проблемы импортозамещения.

Для молотов для забивки труб повышение рабочего давления также позволяет увеличить производительность и расширить диапазон диаметров забиваемых труб для каждого типоразмера молота.

С изменением давления энергоносителя меняется и конструкция машин. Изменяются система воздухораспределения, конструкция отдельных деталей, технология изготовления, марки применяемых материалов. Образуется иной рабочий цикл. Необходима модернизация и инструмента. Расширяется сфера использования машин. Все это требует изучения.

Для России данная тема наиболее актуальна, т.к. пока основным рабочим давлением для пневмоударных машин, особенно в подземных условиях, остается давление 0,5 – 0,7 МПа.

Объект исследования

В ИГД СО РАН разработана схема, соответствующая требованиям, предъявляющим к пневмоударникам высокого давления, с камерой постоянного давления обратного хода, представленная на рис.1 Это схема пневмоударника закрытого типа с выхлопом отработанного воздуха на забой скважины [5].

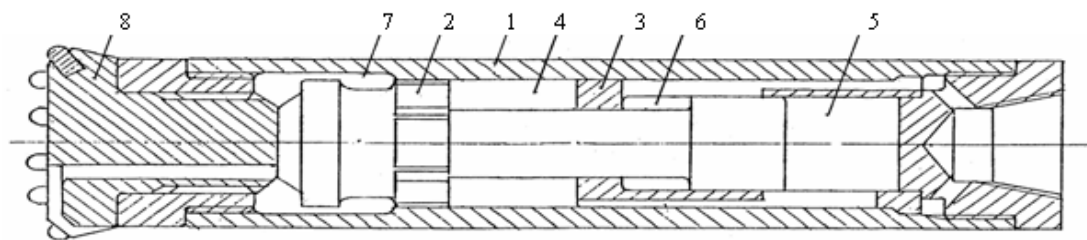


Рис. 1. Схема погружного пневмударника с камерой обратного хода постоянного давления

1 – цилиндр; 2 – ударник; 3 – гильза; 4 – кольцевая камера прямого хода; 5 – торцевая камера прямого хода; 6 – камера постоянного давления обратного хода; 7 – расточка; 8 – буровой инструмент

По данной схеме (пневмударники ПВ170, ПВ130) испытывались в различных условиях.

Испытания погружных пневмударников ПВ170 и ПВ130

Пневмударник ПВ170

На карьере «Борок» г. Новосибирск бурились взрывные скважины диаметром 170 мм глубиной 12 м по гранитам крепостью $f = 12 \dots 14$ по шкале М.М. Протодьяконова. Скважины значительно обводнены. Работа осуществлялась на импортном буровом станке повышенного давления SWDB165. Станок оборудован компрессором производительностью 21,2 м³/мин на давление 1,38 МПа.

На Коенском карьере Тогучинского района Новосибирской области работа осуществлялась на этом же станке. Бурились взрывные скважины диаметром 170 мм глубиной 13 м по диабазам крепостью $f = 14 \dots 16$ по шкале проф. М.М. Протодьяконова пробурено 17 скважин. Пневмударник показал также хорошую работоспособность. При работе давление на компрессоре не превышало 1,2 МПа, что связано с расходной характеристикой пневмударника. Механическая скорость бурения составила 320 мм/мин. Было израсходовано 2 буровых коронки. Выход из строя коронок происходил по причине износа периферийных штырей. Нарботка на коронку в этих условиях составила 110,5 м скважин.

Проверка показала работоспособность конструкции.

Пневмударник ПВ130 под импортную буровую коронку DHD350 (рис. 2).



Рис. 2. Импортная буровая коронка DHD350 и опытный образец пневмударника ПВ130

В 2018 г. проводились испытания пневмоударника ПВ130. Работа осуществлялась на шведском буровом станке Ros L8, давление сжатого воздуха составляло 2,1 МПа. На карьере «Скала» НСО проведено пробное бурение, показавшее работоспособность пневмоударника, на карьере «Борок» г. Новосибирска набурено 300 пог.м. скважин, в Алтайском крае набурено 570 м. Скорость бурения по граниту составила 600 мм/мин, что не уступает скорости бурения зарубежных аналогов в этих же условиях [6-8].

Ударник пневмоударника ПВ130 был изготовлен из отечественной легированной стали 20Х2Н2А по ГОСТ 4543-71.

На первом этапе испытаний было пройдено 870 пог.м. скважин по гранитам. Однако, наблюдалась поломка ударника (рис.3).



Рис. 3. Поломка ударника

При анализе причин поломки было произведено численное моделирование возникновения напряжений в наиболее уязвимых местах ударника (рис. 4) [9-10]. Некоторые зависимости представлены на рис.5.

Предел текучести 785,6 МПа Узел № 42

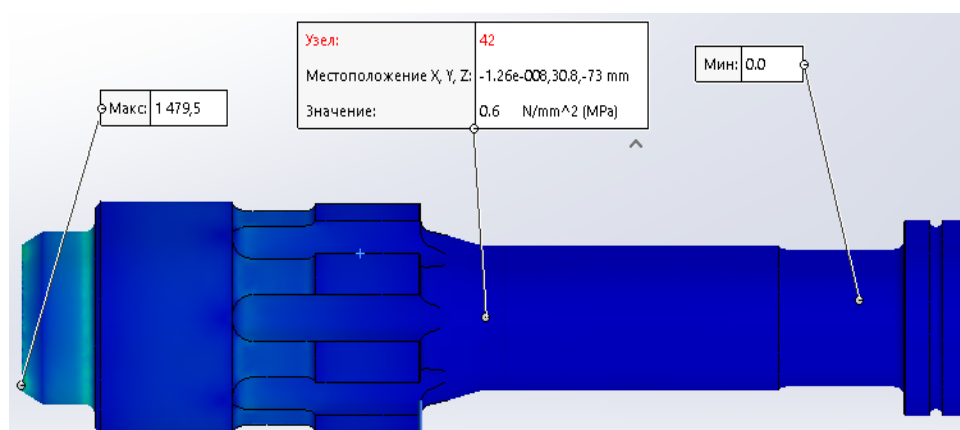


Рис. 4. Ударник пневмоударника ПВ130

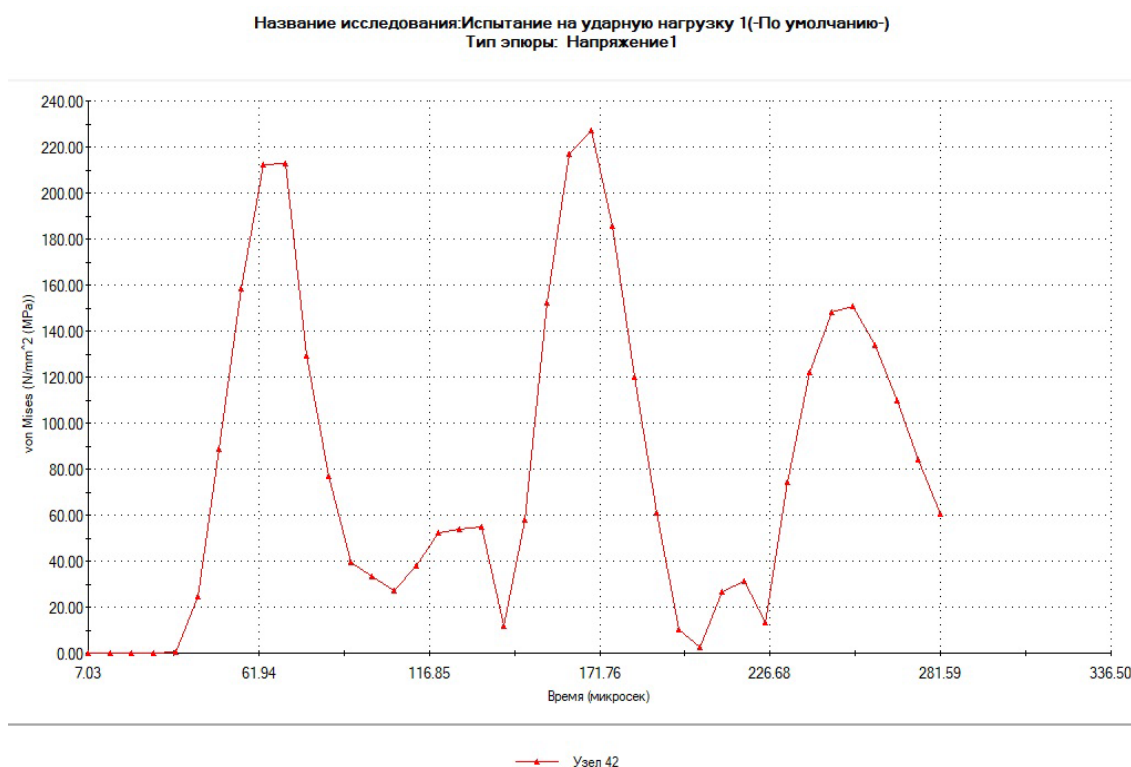


Рис. 5. Напряжения в теле ударника.

Высокий ресурс работы передовых моделей пневмоударников с высокими показателями ударной мощности может быть обеспечен применением новых высокопрочных материалов [11]. Стали, применяемые для изготовления ударников, должны обладать высокой прочностью, значительным сопротивлением усталостному разрушению и поверхностному выкрашиванию, а также высокой износостойкостью поверхности. В настоящее время для изготовления массивных ответственных деталей пневмоударников традиционно используют низкоуглеродистые легированные стали марок 12ХН3А или 12Х2Н4МА, упрочняемые цементацией с последующей закалкой и низким отпускком. Однако прочностные характеристики стали 12ХН3А не обеспечивают надежную работу ударников ударных машин высокого давления. Напряжения в объеме детали будут близки к пределу текучести (600 МПа), что может привести к разрушению стали по механизмам малоциклового усталости.

Анализ материалов, применяемых компанией Atlas Copco для изготовления пневмоударников, свидетельствует о том, что для производства ударников используют среднеуглеродистые легированные стали (таблица) близкие по составу к отечественной марке 30Х2Н3МА. Повышенное содержание углерода в поверхностном слое ударника (0,78 % С) позволяет сделать вывод, что для обеспечения высоких показателей износостойкости ударники подвергают цементации. На поверхности ударника сформирован упрочненный слой толщиной до 1,5 мм и твердостью HRC 57...59, обеспечивающий высокое сопротивление изнашиванию и обладающий повышенным сопротивлением зарождению усталостных трещин.

Сердцевина ударника имеет структуру отпускаемого мартенсита с твердостью HRC 44...46. Данные литературных источников и эксперименты, проведенные на кафедре материаловедения в машиностроении НГТУ, показывают, что такая структура стали обеспечивает наивысшие характеристики сопротивления усталостному разрушению.

Отличительной особенностью материалов, применяемых для изготовления ответственных деталей ударных машин, является их малая загрязненность неметаллическими включениями. Так загрязненность стали неметаллическими включениями у пневмоударников Atlas Copco соответствует 1 баллу по ГОСТ 1778-70. Проведенные ранее исследования показали, что неметаллические включения, содержащиеся в стали, негативно влияют на ее сопротивление усталостному разрушению при воздействии импульсов сжимающей нагрузки. Наиболее интенсивно процессы усталостного разрушения стали происходят, если в воздушном энергоносителе содержится вода, что может приводить к существенному снижению ресурса работы деталей ударных машин.

Таблица 1. Химический состав сталей, применяемых для изготовления бойков новых энерговооруженных пневмоударников.

Наименование	Содержание химических элементов, % (Fe-ост)								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	NI	W
Ударник Atlas Copco (сердцевина)	0.274	0.777	0.341	0.020	0.005	1.271	0.252	3,143	0.014
Ударник Atlas Copco (поверхность)	0.781	0.718	0.278	0.030	0.012	1.170	0.231	3,531	0.018
40X2H2MA	0.379	0.423	0.198	0.002	0.013	1.406	0.243	1,496	0.001

Для изготовления новой модели пневмоударника ПВ170 разработки ИГД СО РАН была использована высококачественная сталь 40X2H2MA, термически упрочненная различными способами. В качестве базовой обработки была использована традиционная закалка в масле с последующим отпуском при температуре 400°C. Ряд образцов был упрочнен перспективной термомеханической обработкой со смешанным мартенсито-бейнитным превращением аустенита (ВТММБ), разработанной на кафедре материаловедения в машиностроении НГТУ. Суть обработки заключается в нагреве стали до температуры аустенитизации ее деформировании и охлаждении в расплаве солей. Горячая деформация приводит к измельчению зерен аустенита и способствует формированию мелкодисперсной структуры мартенсита и бейнита. Принципиальное отличие разработанной технологии от известных технологических процессов высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) и термомеханической изотермической обработки с бейнитным превращением переохлажденного аустенита (ВТМИЗО) заключается в том, что в стали формируется мелкодисперсная смешанная структура, состоящая из нижнего бейнита и продуктов отпуска мартенсита [12, 13] Сталь, обработанная по технологии ВТММБ при сопоставимых

показателях прочности, имеет более чем в два раза выше ударную вязкость и в шесть раз выше трещиностойкость по сравнению со сталью, упрочненной по традиционной технологии закалки с отпуском. Новый технологический процесс целесообразно применять для упрочнения поковок деталей ударных машин, изготавливаемых с использованием технологии горячей объемной штамповки.

Для изготовления тяжело нагруженных деталей ударных машин целесообразно использовать среднеуглеродистые легированные стали, закаленные и отпущенные до твердости HRC 44...48. Если в цикле производства деталей возможно использование операции горячей объемной штамповки, то наиболее эффективным является технологический процесс высокотемпературной термомеханической обработкой с мартенсито-бейнитным превращением аустенита (ВТММБ), который позволяет обеспечить высокую прочность, ударную вязкость и трещиностойкость получаемых поковок.

Схема погружного пневмоударника с разрядным клапаном

Для уменьшения влияния перетечки воздуха необходимо ввести в рабочий цикл режим разрядки камер прямого хода в период обратного хода, что уменьшит сопротивление движению ударника и значительно увеличит его ход. Для этого в конструкцию вводится резиновое кольцо, исполняющее роль разрядного клапана (рис.6). Его функция заключается в удалении воздуха, поступающего через зазоры в соединении задней гильзы и цилиндра в атмосферу, что создает условие более свободного движения ударника на обратном ходу [14,15].

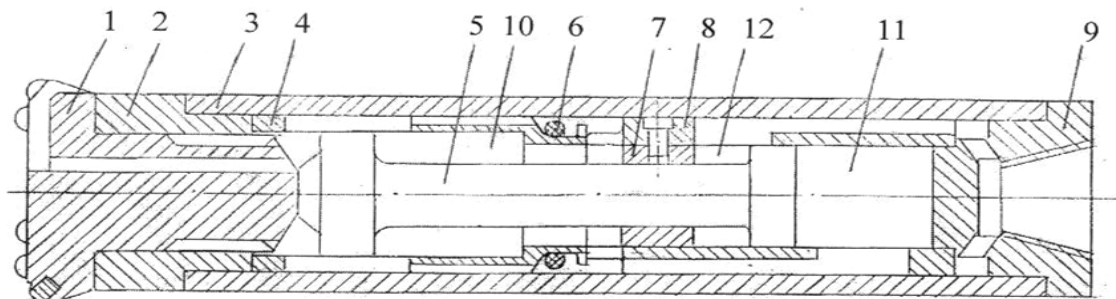


Рис.6. Схема погружного пневмоударника с разрядным клапаном.

1 – буровой инструмент; 2 – букса; 3 – цилиндр; 4 – передняя гильза; 5 – ударник;
6 – резиновое кольцо; 7 – разрезное кольцо; 8 – задняя гильза; 9 – переходник;
10 – кольцевая камера прямого хода; 11 – торцевая камера прямого хода; 12 – камера обратного хода постоянного давления

Резиновое кольцо 6, находится в проточке гильзы 4 с зазором с внутренней стенкой цилиндра 3. При движении ударника 5 на обратном ходу, воздух, оставшийся после выхлопа в кольцевой 10 и торцевой 11 камерах прямого хода, а также воздух, поступающий в эти камеры через зазоры в посадке задней гильзы 8 и цилиндра 3, имеет возможность выходить через указанный зазор, каналы в передней гильзе и далее в атмосферу. Поскольку площади ударника 5 со стороны

торцевой и кольцевой камер прямого хода существенно больше площади ударника со стороны кольцевой камеры обратного хода, то сжатый воздух в торцевой и кольцевой камерах прямого хода тормозит движение ударника на обратном ходу и ограничивает величину его хода. Выпуск воздуха из торцевой и кольцевой камер прямого хода после отсечки выхлопа через резиновое кольцо б позволяет снизить противодействие и уменьшить сопротивление движению ударника, при этом ход ударника на обратном ходу увеличивается. Во время прямого хода ударник 5 находится под давлением сжатого воздуха со стороны торцевой и кольцевой камер прямого хода на большей величине хода, что увеличивает энергию удара и ударную мощность в целом.

Резиновое кольцо в качестве клапана достаточно органично вписывается в конструкцию пневмоударника, не нарушая его простоты. По данной схеме спроектирована физическая модель устройства. Исследования показали, что использование данного разрядного клапана позволяет повышать энергию удара более, чем на 20 %.

Влияние клапана на работу выявлено при съемке и обработке диаграмм давлений в камерах прямого и обратного хода (рис.7).

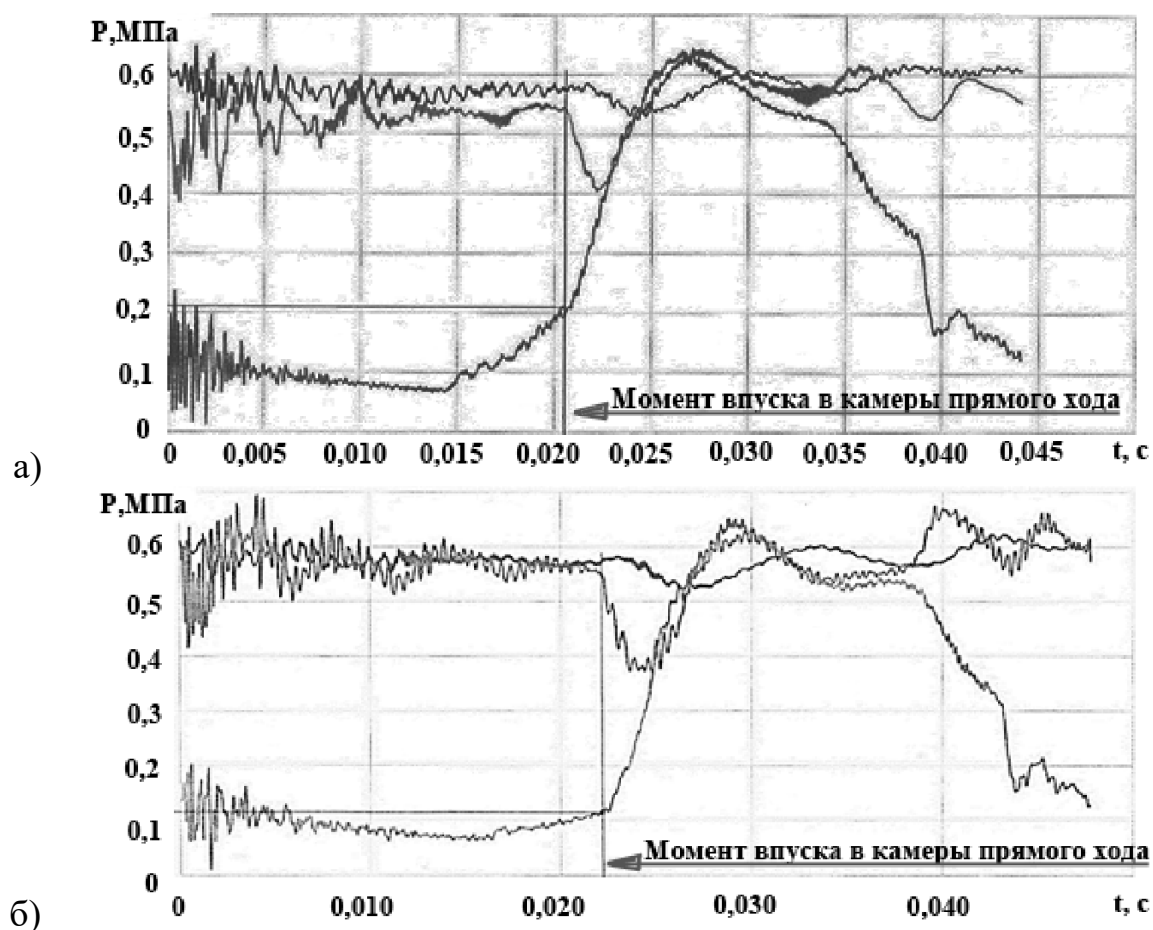


Рис. 7. Диаграммы давлений в камерах физической модели.

а – без клапана, б – с резиновым клапаном.

На диаграммах видно, что при работе с клапаном давление в камере прямого хода перед началом впуска сжатого воздуха на 0,1 МПа меньше, чем без клапана, что уменьшило сопротивление движению ударнику, при совершении им холостого хода и увеличило ход со 82 мм до 92 мм и позволило увеличить энергию удара на 20 %.

По данной схеме с учетом опыта испытаний предыдущих моделей спроектирован погружной пневмоударник высокого давления ПВ254 на диаметр скважины до 254 мм (рис.8) под импортную буровую коронку SD10.

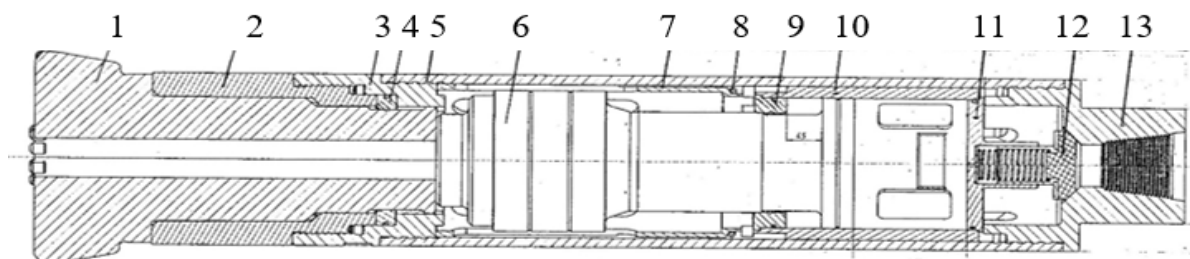


Рис.8. Пневмоударник ПВ254 высокого давления.

1 – буровая коронка; 2 – гайка шлицевая; 3 – букса; 4 – полукольца; 5 – корпус; 6 – ударник; 7 – гильза задняя; 8 - разрядный клапан; 9 – разрезная втулка; 10 – гильза задняя; 11 – крышка; 12 – клапан обратный; 13 – переходник.

Разрезная втулка охватывает среднюю меньшую ступень ударника по достаточно плотной, но подвижной посадке Н8/е7. Контакт разрезной втулки с поверхностью воздухораспределительной гильзы осуществляется по посадке Н9/с8 с гораздо большим зазором, обеспечивающим возможность некоторого перемещения разрезной втулки в радиальном направлении при движении ударника. Избежать перетекания сжатого воздуха из камеры холостого хода в полость позволяет уплотнительное кольцо. От выдавливания разрезной втулки в полость предотвращает стопор.

На основе конструкторской проработки был изготовлен экспериментальный образец пневмоударника со следующими техническими характеристиками:

Рабочее давление, МПа	2,0;
Диаметр буримой скважины, мм.	254;
Энергия удара, Дж.	2250;
Частота ударов, с-1	20;
Ударная мощность, кВт.	45;
Расход воздуха, м ³ /мин	48.

Заключение

Использование энергоносителя высокого давления является важным резервом совершенствования погружных пневмоударников. Выбор энергетических параметров пневмоударника, отработка конструкции бурового инструмента со строгим учетом закономерностей процесса разрушения породы, также позволяет повысить

эффективность работы пневмоударника, дает возможность более полного использования имеющихся ресурсов, является путем интенсивного развития.

Конструкции пневмоударников позволяют соответствовать производственным условиям с использованием буровых станков высокого давления, повысить производительность бурения и рассматривать вопросы импортозамещения.

Переход на повышенное давление воздуха обеспечивает высокие энергетические параметры машины, но и создает все большие напряжения в ударных деталях.

Для изготовления тяжелонагруженных деталей ударных машин целесообразно использовать среднеуглеродистые легированные стали, закаленные и отпущенные до твердости HRC 44...48. Если в цикле производства деталей возможно с использованием операции горячей объемной штамповки, то наиболее эффективным является технологический процесс высокотемпературной термомеханической обработкой с мартенсито-бейнитным превращением аустенита (ВТММБ) который позволяет обеспечить высокую прочность, ударную вязкость и трещиностойкость получаемых поковок.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер государственной регистрации 121052600390-5).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимофеев Н.Г., Скрыбин Р.М. Буровой снаряд для бурения скважин большого диаметра // Ползуновский альманах №4/2. – 2011. – С.84-86
2. Харламов Ю.П. Состояние и перспективы сооружения свайный фундаментов при обустройстве нефтегазовых месторождений в Южной Якутии //Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды : тр. конф. с участием иностр. ученых (7-11 июля 2008 г., Новосибирск). Т. 2. : Машиноведение. – Новосибирск : ИГД СО РАН, – 2009. – С. 58 – 61
3. Беляев Н.А. Пневмоударные расширители скважин. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, – 1987. – 133 с
4. Медведев И.Ф. Режимы бурения и выбор буровых машин. Москва. Недра. 1968.
5. Патент. РФ № 2090730. Погружной пневматический ударный механизм / С.Е. Алексеев // Опубл. в БИ – 1997. – № 26.
6. Репин А.А., Смоляницкий Б.Н., Алексеев С.Е., Попелюх А.И., Тимонин В.В., Карпов В.Н. Погружные пневмоударники высокого давления для открытых горных работ.//ФТПРПИ. – 2014. – № 5. – С.157-167
7. Репин А.А., Алексеев С.Е. Создание пневмоударников для работы на повышенном давлении энергоносителя // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды. Т. III. Машиноведение. – Новосибирск: ИГД СО РАН.– 2010. –С.61-70.
8. Тимонин В.В., Алексеев С.Е., Кокоулин Д.И. Испытания импортозамещающих погружных пневмоударников высокого давления // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2019. – Т 2. – № 5. – С. 57-66.
9. Шахторин И.О. Доводка машин ударного действия при помощи современного программного обеспечения // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2017. – Т.4. – № 1. – С. 72-77.
10. Ощепков В.С. Компьютерное моделирование рабочего процесса погружного пневмоударника П-110 // ГИАБ. Москва 2018. № 7. С. 131-138.

11. Репин А. А., Алексеев С. Е., Попелюх А. И. Методы повышения надежности деталей ударных машин // ФТПРПИ. – №4. – 2012. – С. 94-101.
12. Попелюх П. А., Никулина А.А., Попелюх. А. И. Влияние внешней среды на показатели надежности деталей горных машин, работающих в условиях динамического сжатия // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 4(53). – С 214-229.
13. Попелюх П. А., Попелюх А. И., Юркевич М. Р. Комбинированная термомеханическая обработка стали с мартенсито-бейнитным превращением аустенита // Обработка металлов. – 2013. – №2.
14. Патент РФ №2647716 Погружной пневмоударник. / Тимонин В.В., Алексеев С.Е., Кокоулин Д.И., Заболоцкая Н.Н. //Опубл. В БИ – 2018 - № 8
15. Алексеев С.Е., Данилов Б.Б., Чешин Д.О., Кубанычбек Б. Система воздухораспределения погружного пневмоударника с разрядным клапаном для использования в роботизированных буровых системах // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2024. – Т.11. – № 1.– С. 42-47. DOI: 10.15372/FPVGN2024110107

© С. Е. Алексеев, Б. Кубанычбек, 2026

Л. В. Городилов^{1,2✉}, В. Г. Кудрявцев¹, А. И. Першин¹

Испытания оптического датчика для измерения предупредной скорости бойка ударного устройства

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Сибирский государственный университет водного транспорта,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: gor@misd.ru

Аннотация. Разработан датчик измерения линейной скорости твердых тел, который может быть использован для измерения предупредной скорости бойка ударного устройства. Датчик представляет собой две пары свето- и фотодиодов, устанавливаемых в стенках специальной обоймы-кольца таким образом, чтобы лучи светодиодов проходили по диаметру ствола и попадали на фотодиоды. При пересечении бойком лучей, находящихся на расстоянии друг от друга и от плоскости соударения бойка и инструмента, происходит изменение освещенности фотодиодов и соответственно величины сигналов, поступающих от них на регистрирующую аппаратуру. По моментам пересечения лучей бойком и известному расстоянию между ними вычисляется скорость. Приводятся методики определения его параметров и динамических испытаний.

Ключевые слова: датчик, пары свето- и фотодиодов, база, предупредная скорость

L. V. Gorodilov^{1,2✉}, V.G. Kudryavsev¹, A. I. Pershin¹

Testing of an optical sensor for measuring the pre-impact velocity of the impact device

¹Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation

²Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: gor@misd.ru

Abstract. An optical velocity sensor for measuring the linear velocity of solids has been developed, which can be used to measure the pre-impact velocity of the firing pin of an impact device. The sensor consists of two pairs of light and photodiodes mounted in the walls of a special ring cage in such a way that the LED beams pass through the diameter of the barrel and hit the photodiodes. When the firing pin intersects beams located at a distance from each other and from the plane of impact of the firing pin and the instrument, the illumination of the photodiodes changes and, accordingly, the magnitude of the signals coming from them to the recording equipment. The velocity is calculated based on the points of intersection of the loops and the known distance between them. The methods of determining its parameters and dynamic tests are given.

Keywords: sensor, pairs of light and photodiodes, base, pre-impact velocity

Введение

Создание новых и совершенствование существующих ударных устройств (УУ) для отбойки и разрушения горных пород, бурения скважин [1–9] является актуальной научно-технической задачей.

При разработке новых образцов УУ, оптимизации их параметров необходимы испытания и экспериментальные исследования, которые в данном случае представляют сложную задачу, так как ведутся на устройствах с большими реактивными силами, подверженными высоким виброударным нагрузкам.

Одной из проблем при этом является определение предударной скорости бойка, с использованием которой рассчитывается энергия удара и ударная мощность устройства. Некоторые соображения и методики по измерению предударной скорости и расчету энергии удара можно найти, например, в [10-14].

Для определения предударной скорости бойка достаточно регистрации его движения в момент непосредственно перед взаимодействием с инструментом. В настоящей работе для этой цели разработан оптический датчик скорости, конструкция и некоторые результаты испытаний которого представлены в статье.

Конструкция оптического датчика. Способ установки на УУ

Оптический датчик скорости (ОС), являющийся разработкой лаборатории моделирования импульсных систем ИГД СО РАН, представляет собой две пары элементов «ИК лазерный модуль - фотодиод» (рис. 1а), смонтированных на кольце. Оси лучей лазеров проходят через центр кольца и находятся на расстоянии 3 мм друг от друга вдоль оси кольца. В открытом состоянии лучи лазерных модулей попадают на соответствующие чувствительные элементы фотодиодов.

Датчик при помощи винтов крепится на стволе УУ (рис. 1б), в котором предварительно просверлены отверстия для прохождения лазерных лучей, таким образом, что ближний луч лазера находится на расстоянии 3 мм от плоскости ударного взаимодействия бойка с инструментом.

Электрическая схема ОС представлена на рис. 2. При движении бойка перед ударом по инструменту происходит последовательное перекрытие лучей лазеров, падающих на фотодиоды, вследствие чего изменяется сигнал на выходе Увых. Выходной сигнал подается непосредственно на аналого-цифровой преобразователь.

На рис. 3 представлен скриншот окна программы Power Graph 3.0 с осциллограммой записи сигнала с ОС, на которой 1, 2 - точки пересечения торцом бойка лучей лазеров, Т - время прохождения расстояния между лучами.

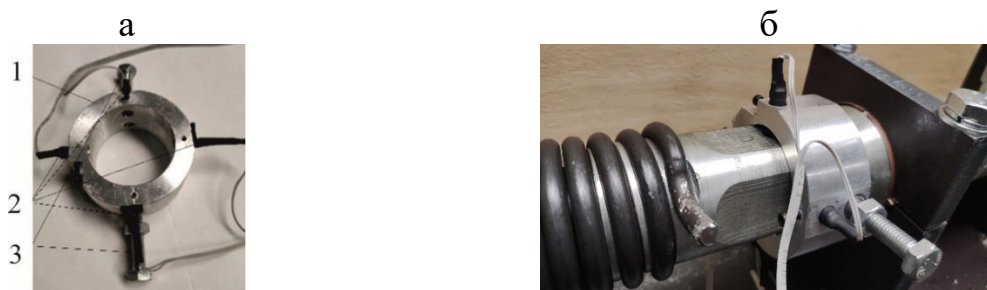


Рис. 1. Конструкция оптического датчика и его установка на стволе ударного устройства

1 – кольцо с соосными отверстиями, 2 – пары «ИК лазерный модуль - фотодиод», 3 – фиксирующие винты

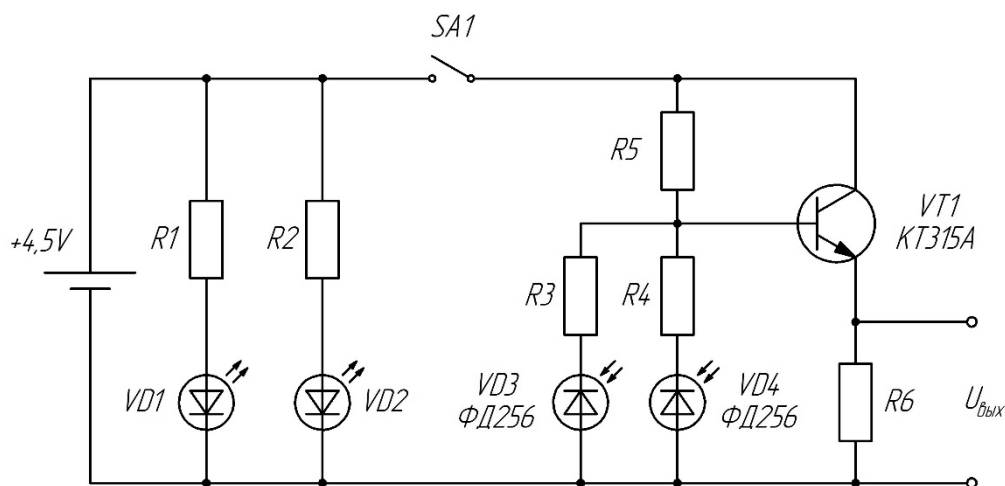


Рис. 2. Электрическая схема ДПЛ: VD1, VD2 и VD3, VD4 соответственно ИК лазерные модули и фотодиоды

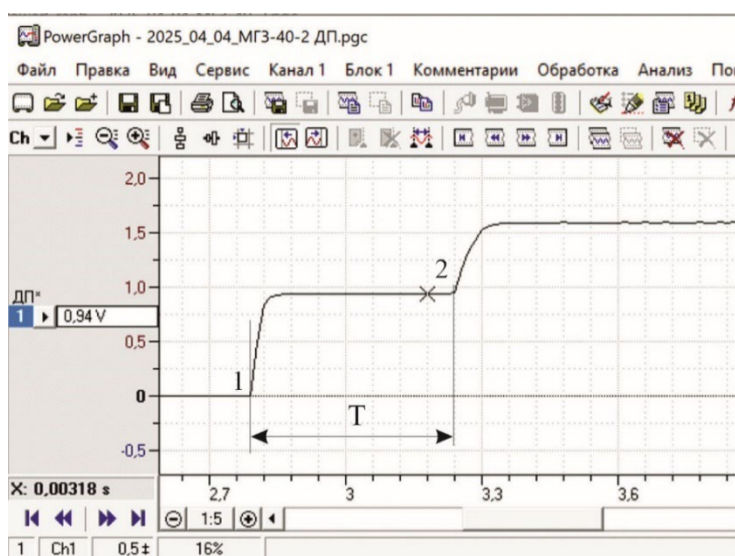


Рис. 3. Осциллограммы сигнала от оптического датчика положения ОС в программе PowerGraph 3.0.

1, 2 – моменты пересечения передним торцом бойка лучей лазерных модулей, T – время прохождения бойком расстояния S=3 мм перед ударом

Предударная скорость бойка определяется по формуле

$$V = L/T, \text{ м/с} \quad (1)$$

где L – расстояние между осями лучей лазерных модулей, L = 3 мм, T – интервал времени прохождения бойком расстояния L в мс.

Методика измерения базы L между лучами датчика

Измерение L датчика ОС-1 производится на токарном станке ТВ320. Датчик 1 устанавливается в кулачки патрона токарного станка, оси станка и датчика совмещаются (рис. 4).

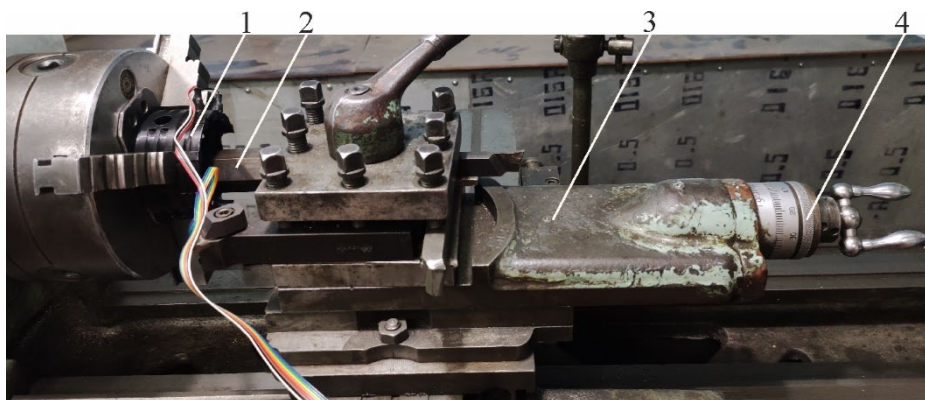


Рис. 4. Фотография токарного станка с датчиком ОС-1

1 – датчик ОС-1, 2 – стержень, 3 – салазки верхние, 4 – лимб отсчета перемещения верхних салазок

В верхние салазки продольного перемещения станка соосно с осью станка закрепляется стержень 2. Электронный блок датчика подключается к аналого-цифровому преобразователю, сигнал с которого подается на АЦП и персональный компьютер. При медленном вращении лимба отсчета перемещения 4 по цене деления 0.02 мм фиксируется его положение, при которых сигнал от датчика изменится на 5 мВ от постоянного значения сначала $U_1 \approx 0$ В, затем $U_2 \approx 0.5$ В. На рис. 5 представлен график изменения сигнала, полученного при испытаниях датчика.

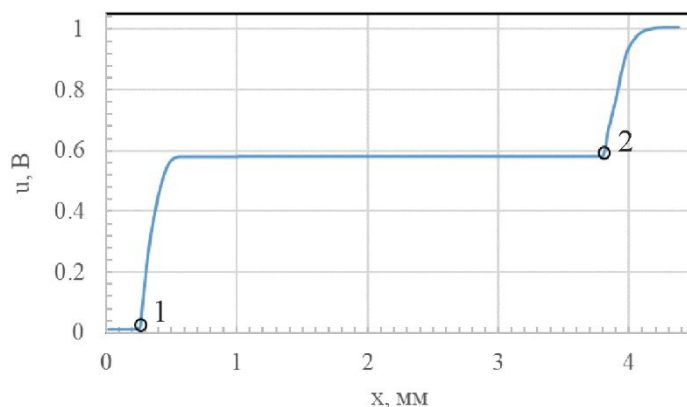


Рис. 5. График изменения сигнала при испытаниях датчика

1, 2 – точки, в которых уровень сигнала от датчика отклонялся на величину более 5 мВ от постоянного значения

Для испытанного датчика координаты x точек 1 и 2, при которых отклонение сигнала от датчика превышало 5 мВ, составляли соответственно $x_1=0.26$ мм и $x_2=3.82$ мм. База L при этом равна:

$$L = x_2 - x_1 = 3.56 \text{ мм}$$

Погрешность такого метода измерения базы определяется шкалой деления лимба верхних салазок, которая составляет $\Delta L = 0.02$ мм.

Динамические испытания датчика

Динамические испытания проводили на стенде определения скорости индуктивных датчиков, который представлял из себя (рис. 6а) обойму с поршнем 1 и тяжелую металлическую плиту 4. Поршень фиксировался пластиной на определенной высоте, после вытаскивания пластины он свободно падал в обойме под собственным весом, в конце падения пересекал лучи оптического датчика.

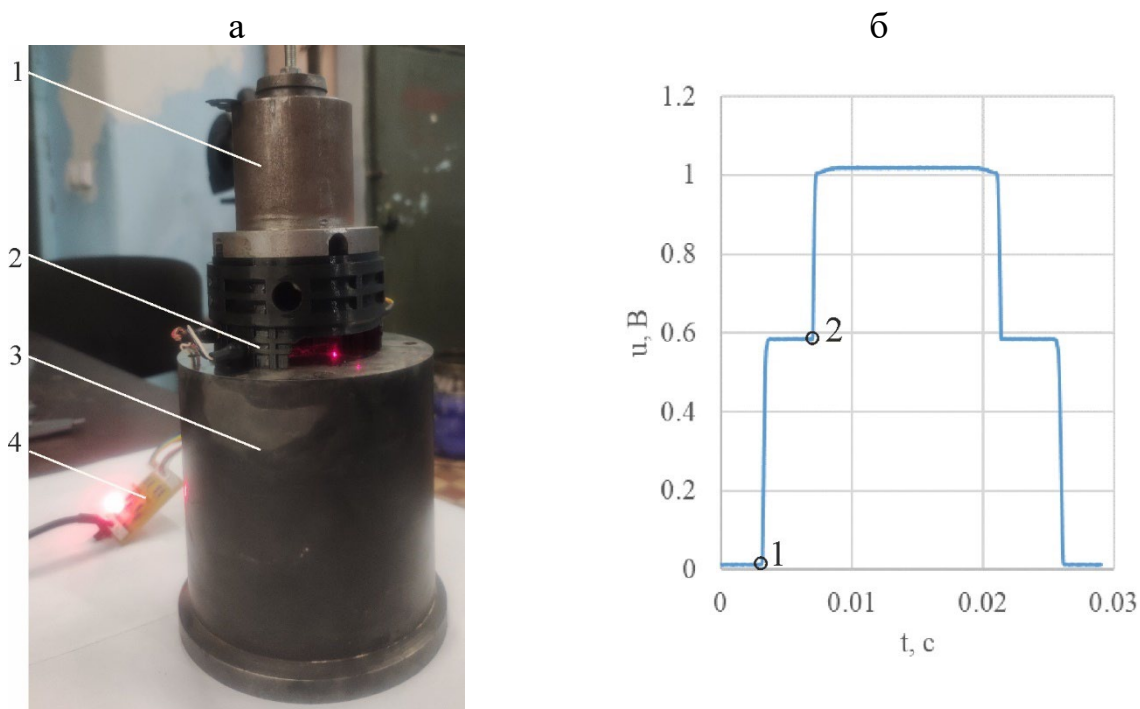


Рис. 6. Фотография стенда динамических испытаний датчика(а) и осциллограмма сигнала (б)

1 – обойма с поршнем, 2 – датчик, 3 - металлическая плита, электронный блок ОС-1

На рис. 6б представлена осциллограмма сигнала с датчика, полученная в результате сброса поршня: первые две ступени повышения напряжения – это падение поршня и перекрытие лучей датчика, следующие две – это движение поршня от плиты в результате отскока и открытие лучей датчика. Скорость вычисляли по формуле (1), L считали равным 3.56 мм, интервал T между точками 1 и 2 определяли по моменту отклонения сигнала u от среднего постоянного значения на 5 мВ.

Результаты испытаний – измерение предупредной скорости падения - поршня сведены в таблицу. Анализ показывает, что ошибка при измерении скорости (отклонение от среднего значения) не превышает 2 %.

Таблица 1. Результаты измерения скорости поршня

№ блока	Время вступления 1-й ступени t_1 , с	Время вступления 1-й ступени t_2 , с	t_2-t_1 , с	Предупредная скорость $vI=L/(t_2-t_1)$, м/с
2	0.01121	0.01499	0.00378	0.941799
3	0.0106	0.01438	0.00378	0.941799
4	0.01203	0.01589	0.00386	0.92228
5	0.01133	0.01515	0.00382	0.931937
6	0.01232	0.01614	0.00382	0.931937
7	0.0117	0.0156	0.0039	0.912821
8	0.0109	0.01473	0.00383	0.929504
9	0.01215	0.01603	0.00388	0.917526
10	0.01156	0.01538	0.00382	0.931937
11	0.01136	0.0152	0.00384	0.927083
12	0.01164	0.01546	0.00382	0.931937
13	0.0114	0.01525	0.00385	0.924675
14	0.01101	0.01483	0.00382	0.931937
15	0.01145	0.01526	0.00381	0.934383
16	0.00723	0.01102	0.00379	0.939314
17	0.01128	0.01513	0.00385	0.924675

Заключение

Разработан датчик скорости, позволяющий измерять предупредную скорость бойка ударного устройства. Конструкция датчика позволяет применить его практически для любого ударного устройства.

Приводятся общий вид и параметры датчика, способ его установки на ударном устройстве, электрическая схема, методика измерения основного параметра – длины базы L , на которой регистрируется скорость, проведены динамические испытания.

Результаты испытаний позволили установить, что отклонение скорости от среднего значения не превышает 2 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алимов О. Д., Басов С. А. Гидравлические виброударные системы. М.: Наука. 1990. 350 с. [Alimov O. D. and Basov S. A. Hydraulic vibration shock systems. Moscow: Nauka, 1990, 350 p. (in Russian).]
2. Сагинов А. С. Теоретические основы создания гидроимпульсных систем ударных органов машин. Алма-Ата: Наука. 1985. 254 с. [Saginov A. S. Theoretical foundations of creation of hydraulic pulse systems of percussion organs of machines. Alma Ata: Nauka, 1985, 254 p. (in Russian).]
3. Горбунов В. Ф., Лазуткин А. Г., Ушаков Л. С. Импульсный гидропривод горных

машин. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение. 1986. 195 с. [Gorbunov V. F., Lazutkin A. G., and Ushakov L. S. Pulse hydraulic drive of mining machines. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch, 1986. 195 p. (in Russian).]

4. Ушаков Л. С., Котылев Ю. Е., Кравченко В. А. Гидравлические машины ударного действия. М.: Машиностроение. 2000. 416 с. [Ushakov L. S., Kotylev Yu. E., and Kravchenko V. A. Hydraulic impact machines. Moscow: Mashinostroenie, 2000, 416 p. (in Russian).]

5. Городилов Л. В., Кудрявцев В. Г. Анализ способов и схем управления характеристиками гидроударных машин объемного типа // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. № 1. С. 1–15. [Gorodilov L. V. and Kudryavtsev V. G. Analysis of methods and schemes for controlling the characteristics of volumetric hydraulic impact machines. Journal of Mining Science, 2022, no. 1, pp. 1–15.]

6. Ye X., Miao X., and Cen Y. Modeling and simulation for hydraulic breaker based on screw-in cartridge valves. Applied Mechanics and Materials, 2012, vol. 229–231, pp. 1697–1701.

7. Ding W. S., Wang J. J., and Chen L. N. Electronic control hydraulic impactor based on pressure feed-back. Int. Conf. Mech. Autom. Control Eng. MACE2010. 2010, no. 50775075, pp. 2716–2719.

8. Yang G., Ding C., Liang C., and Wang L. Research on intelligent hydraulic impactor. Proc. 3rd Int. Conf. Meas. Technol. Mechatronics Autom. ICMTMA 2011, 2011, vol. 3, pp. 3–6.

9. Yu H. and Tang J. The Application of fuzzy control in intelligent hydraulic impactor, 2012, vol. 4, no. 22, pp. 1–9.

10. Кашаев В. А., Ямпольский Д. З. Тензометрический метод измерения удара. Российский опыт. Достижения и перспективы // Вестник научно-технического развития. 2017. № 2(114). С. 24–37. [Kashaev V. A. and Yampolsky D. Z. Strain gauge method of impact measurement. The Russian experience. Achievements and prospects. Vestnik of Scientific and Technical Development, 2017, no. (114). pp. 24–37. (in Russian).]

11. Ямпольский Д. З. Энергия удара или энергия ударного импульса: что и как измерять? // Вестник научно-технического развития. 2021. № 160. С. 65–86. [Yampolsky D. Z. Impact energy or impact pulse energy: what should I measure and how? Vestnik of Scientific and Technical Development, 2021, no. 160, pp. 65–86. (in Russian).]

12. Ямпольский Д. З., Ванаев В. С. О методике европейской ассоциации производителей электроинструмента “Измерение энергии единичного удара перфораторов и отбойных молотков” // Вестник научно-технического развития. 2018. № 9(133). С. 20–40. [Yampolsky D. Z. and Vanaev V. S. On the methodology of the European Association of Power Tool Manufacturers “Measuring the energy of a single impact of drills and jackhammers”. Bulletin of Scientific and Technical Development, 2018, no. 9, no. 133, pp. 20–40. (in Russian).]

13. ЕРТА – The European Power Tools Association. Procedure 05 “Measurement of the single impact energy of rotary hammers and breakers. 2016, 23 p.

14. Городилов Л. В., Кудрявцев В. Г., Ефимов В. П. Моделирование процесса взаимодействия системы “боек–инструмент” с горным массивом на стенде // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 4. С. 116–124. [Gorodilov L. V., Kudryavtsev V. G., and Efimov V. P. Modeling of the process of interaction of the “firing pin-tool” system with a mountain range on the stand // Journal of Mining Science, 2013. No. 4. pp. 116–124.]

© Л. В. Городилов, В. Г. Кудрявцев, А. И. Перишин, 2026

И. Е. Иоанов¹✉

Преимущества использования пневмомолотов в технологии строительства горнодобывающих предприятий на Арктической территории Российской Федерации

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация,
e-mail: ioanow@yandex.ru

Аннотация. В статье проведен анализ применения машин по погружению стержневых элементов в мерзлый грунт. Выделены преимущества использования пневмомолотов перед дизель-молотами и вибропогружателями. Сформулированы задачи по устранению недостатков пневмоударных машин с помощью проведения исследовательской работы, что позволит разработать высокоэффективную технику для строительства горнодобывающих предприятий в Арктике.

Ключевые слова: пневмомолот, труба, Арктика, строительство, сжатый воздух, дизель-молот, вибропогружатель

I. E. Ioanov¹✉

The advantages of using pneumatic hammers in mining construction technology in the Arctic region of the Russian Federation

¹Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia,
e-mail: ioanow@yandex.ru

Abstract. This paper analyzes the use of machines for driving rod elements into frozen ground. The advantages of using pneumatic hammers over diesel hammers and vibratory pile drivers are highlighted. The objectives are set for eliminating the shortcomings of pneumatic hammers through research, which will lead to the development of highly efficient equipment for the construction of mining facilities in the Arctic.

Keywords: pneumatic hammer, pipe, Arctic, construction, compressed air, diesel hammer, vibratory driver

Введение

Возведение горнодобывающих предприятий в Арктике сопряжено с проведением комплекса специальных строительных работ. За последние годы их объемы неуклонно увеличиваются, что обусловливается освоением Арктической зоны Российской Федерации. В перечень таких работ входит бестраншейная прокладка подземных каналов, укрепление откосов котлованов и насыпей, сооружение подпорных стенок и экранов, получение набивных свай под фундаменты зданий. Используется технология, основанная на погружении различных металлических профилей и конструкций в мерзлый грунт бурозабивным методом. Для его реализации используются дизель-молоты, вибропогружатели и пневмомолоты. Наиболее рациональным решением в условиях отрицательных

температур является использование пневмоударных машин, которые обладают преимуществами перед дизель-молотами и вибропогружателями.

Цель работы

Обоснование актуальности проведения исследований, направленных на разработку высокоэффективного пневмоударного устройства, применяемого для проведения работ по строительству горнодобывающих предприятий в Арктике.

Основная часть

Арктический регион характеризуется экстремально низкими температурами. В зимний период температура может опускаться до -3°C на юге приатлантического района и до -16°C в притихоокеанском. На северо-востоке Якутии зафиксированы температуры до -40°C . Относительная влажность воздуха составляет 80–90% [1].

Рельеф Арктики в основном представлен равнинами и низменностями, а также многочисленными островами и архипелагами, такими как острова Арктического института, острова Гейберга, Дунай, Медвежьи острова, Новая Земля, Новосибирские острова и Северная Земля. Горные массивы встречаются редко.

Почвы в Арктике маломощные, слабокислые и слабогумусированные. В южной части региона преобладают кислые тундровые и дерновые почвы.

Арктика богата полезными ископаемыми, включая нефть, природный газ и различные руды, такие как апатит, золото, алмазы, серебро, цирконий, титан, платина и редкоземельные металлы.

Разработка полезных ископаемых требует создания современных горнодобывающих предприятий и инфраструктуры. Строительство в Арктике имеет свои особенности [2-3]:

1. Суровый климат. Низкие температуры и промёрзшие грунты значительно усложняют и замедляют строительство и эксплуатацию зданий.

2. Вечная мерзлота. Вода в грунте чаще всего находится в твёрдом состоянии. Однако возможны кратковременные оттаивания, что негативно сказывается на надёжности конструкций.

3. Порывистые ветры и метели. Здания в Арктике строят по принципу замкнутого контура, а расстояние между домами стараются минимизировать.

4. Удалённость поставщиков строительных материалов. Многие объекты строятся на островах, что требует использования только водного транспорта для доставки материалов.

5. Высокая стоимость строительства. Удалённость районов и необходимость использования дорогостоящих материалов в суровых условиях увеличивают затраты.

6. Нехватка квалифицированного персонала. Климат Арктики негативно влияет на здоровье работников, поэтому перед отправкой на север сотрудники проходят углублённое медицинское обследование.

Важным этапом в технологии строительства горнодобывающих предприятий является погружение свай под фундамент здания. Работы следует производить в следующей последовательности (рисунок 1) [4, 5]:

1. Перед погружением бурозабивных свай из скважин следует тщательно извлекать попавшие в них воду, грязь, лёд и снег. Глубина лидерных скважин определяется проектом исходя из условия, что концы свай должны заглубляться не менее чем на 1 м ниже забоя скважины [4, 5].

2. Следует контролировать диаметр скважины, обеспечивая его размер не более размера меньшей стороны поперечного сечения сваи. Стенки скважины должны быть ровными. Отклонение от вертикали стенок скважины должно обеспечивать возможность забивки свай с предельным отклонением от вертикали, не превышающим 2% их длины [4, 5].

3. В качестве способа подготовки скважин для бурозабивных свай следует использовать вращательное или лидерное бурение. Бурозабивные сваи могут погружаться с предварительным оттаиванием грунта у стенок скважины с помощью обогрева паровым вибролидером [4, 5].

4. Для забивки свай в подготовленные лидерные скважины применяются сваебойные машины ударного и виброударного действия, в том числе вибропогружатели с ударной приставкой [4, 5].

Забивку свай необходимо начинать при небольшом подъеме молота, с тем чтобы легкими ударами закрепить сваю в грунте и придать ей правильное направление. Дальнейшую забивку до проектной отметки следует проводить при постоянной высоте подъема молота [4, 5].

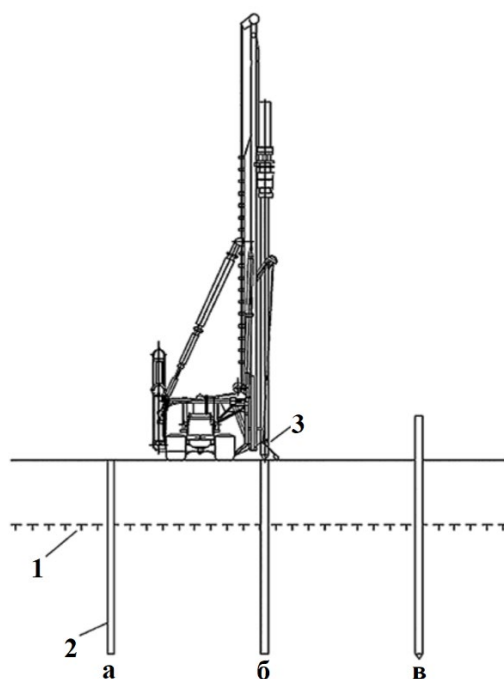


Рис. 1. Технологическая схема устройства бурозабивной сваи [4, 5]:

- а - бурение скважины диаметром, меньшим или равным диаметру сваи;
б - погружение сваи сваебойной установкой; в - готовая бурозабивная свая;
1 - граница слоя сезонного оттаивания; 2 - пробуренная (лидерная) скважина; 3 - свая

Для осуществления операций по погружению в грунт стержневых элементов чаще всего используются дизель-молоты и вибропогружатели [4, 5].

Дизель-молоты предназначены для вертикального и наклонного забивания свай в грунт.

Широкое распространение дизель-молотов объясняется их высокой эффективностью и автономностью, сравнительно высоким коэффициентом полезного действия, низкой стоимостью топлива, простотой обслуживания [6, 7].

На строительных площадках применяют штанговые и трубчатые дизель-молоты (рисунок 2). Ударной частью штанговых дизель-молотов является подвижный цилиндр, открытый снизу и перемещающийся в направляющих штангах [6, 7].

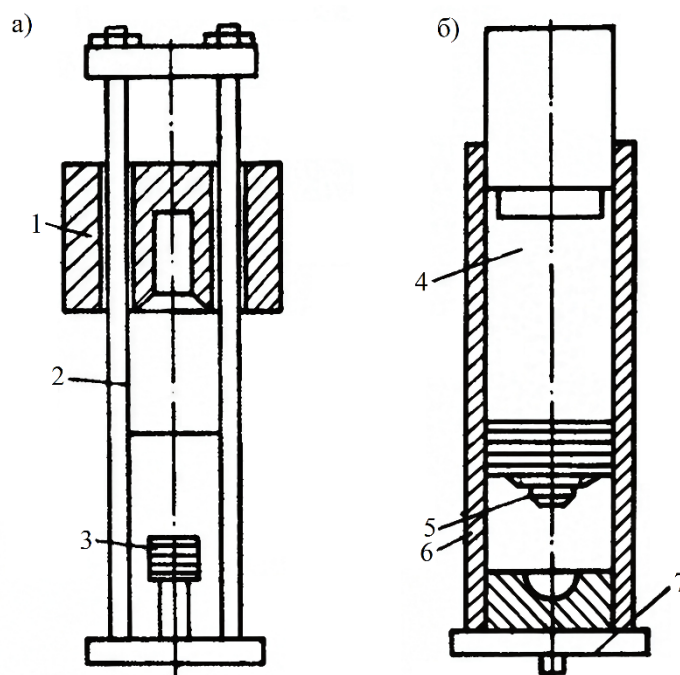


Рис. 2. Схемы устройства дизель-молотов [6, 7]:

- а - штангового; б - трубчатого; 1 - подвижный цилиндр; 2 - направляющие штанги;
3 - поршень; 4 - подвижный поршень; 5 - головка; 6 - неподвижный цилиндр;
7 - опорная часть

При падении цилиндра на неподвижный поршень в камере сгорания воспламеняется смесь воздуха и топлива. Образовавшиеся в результате сгорания смеси газы подбрасывают цилиндр вверх, после чего происходит новый удар и цикл повторяется [6, 7].

В трубчатых дизель-молотах неподвижный цилиндр, имеющий пята, является направляющей всей конструкции. Ударной частью является подвижный поршень с головкой. Воспламенение смеси происходит при ударе головки поршня по поверхности сферической впадины цилиндра [6, 7].

Главное преимущество дизель-молота трубчатого типа над штанговым заключается в том, что при одинаковой массе ударной части они обладают значительно большей (в 2...3 раза) энергией удара [6, 7].

Общими недостатками дизель-молотов являются: невозможность забивания стержневых элементов в горизонтальном направлении; трудность запуска при работе на слабых грунтах и в условиях низких температур; обязательное применение копровой установки [6, 7].

Погружение свай вибрированием осуществляют с использованием вибрационных механизмов, оказывающих на сваю динамические воздействия, которые позволяют преодолеть сопротивление трения на боковых поверхностях сваи, лобовое сопротивление грунта, возникающее под острием сваи, и погрузить сваю на проектную глубину (рисунок 3) [8].

На скорость погружения и амплитуду колебаний влияют масса вибрирующих частей сваи и вибратора, его эксцентриситет, плотность грунта, участвующего в колебаниях, частота колебаний вибропогружателя [8].

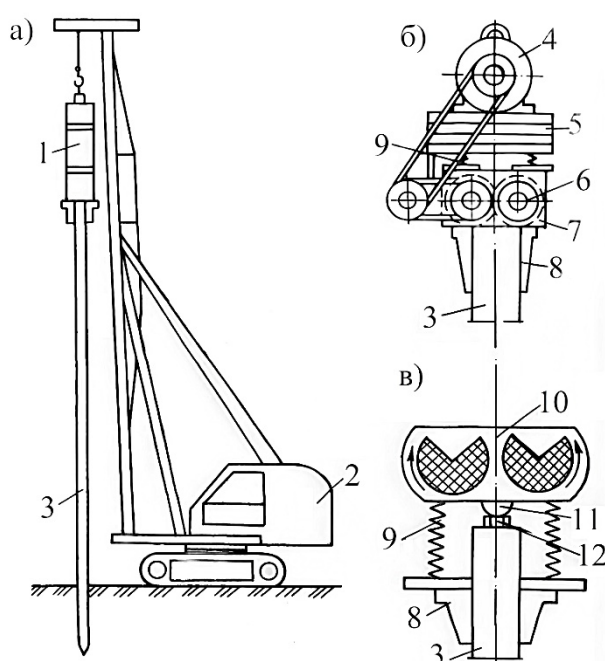


Рис. 3. Вибропогружение свай [8]: а - сваепогружающая установка; б - вибропогружатель с подрессоренной пригрузкой; в - вибромолот; 1 - вибропогружатель; 2 - экскаватор; 3 - свая; 4 - электродвигатель; 5 - пригрузочные плиты; 6 - вибратор; 7 - дебалансы; 8 - наголовник; 9 - пружины; 10 - ударная часть с электродвигателем; 11 - боек; 12 – наковальня

Вибропогружатели с частотой менее 10 Гц называют низкочастотными, с частотой более 16,6 Гц высокочастотными [8].

Низкочастотные вибропогружатели используют для погружения в однородные слабые грунты массивных железобетонных оболочек и свай длиной до 12 м. Они характеризуются значительной амплитудой колебаний, сравнительно большими статическими моментами дебалансов, вынуждающей силой и общей массой, малой частотой колебаний [8].

Высокочастотные вибропогружатели применяют для погружения в малосвязные грунты элементов с малым лобовым сопротивлением: шпунта, труб и профильного металла длиной до 20 м. По сравнению с низкочастотными высокочастотные вибропогружатели имеют значительно меньший статический момент дебалансов (не более 60 кН·см) и соответственно меньшую (до 10-14 мм) амплитуду колебаний [8].

Вибропогружатели обладают следующими преимуществами [8]: высокая производительность по сравнению с дизель-молотами; удобство управления; отсутствие разрушения погружаемых элементов.

Основными недостатками машин являются [8]: непригодность для погружения свай (шпунта) в связные маловлажные грунты; короткий срок службы электродвигателей; низкая производительность машин при работе в условиях отрицательных температур из-за высокого сопротивления мерзлого грунта погружению элементов.

Для строительства горнодобывающих предприятий в Арктике наиболее рационально использовать пневмоударные механизмы, которые обладают рядом преимуществ перед дизель-молотами и вибропогружателями: простота конструкции, высокая надежность, не требуется высокая квалификация рабочего, использование сжатого воздуха в качестве энергоносителя, возможность работы в труднодоступных местах (не требуется применение копровой установки).

Применяются пневмомолоты с рабочим циклом расширения сжатого воздуха перед выхлопом (СО-134, СО-166, М-200, М-400) и пневмомолоты без расширения сжатого воздуха в камере обратного хода (Тайфун-70, Тайфун-130, Тайфун-190, Тайфун-320, Тайфун-500, Тайфун-740, Тайфун-1000). Недостатком первых машин является работа за счёт расширения сжатого воздуха внутри камеры холостого хода, в результате которого температура понижается, что может способствовать обледенению машины. Минимальные зазоры ударника в корпусе при попадании льда способствуют заклиниванию и остановке машины. В условиях отрицательных температур предпочтительно использовать машины семейства «Тайфун», т.к. надёжную работу в зимних условиях обеспечивают большие зазоры и отсутствие расширения воздуха внутри камеры холостого хода, что возможно за счёт наличия упругого воздухораспределительного клапана.

«Тайфуны» работают следующим образом (рисунок 4). Сжатый воздух из воздухоподводящей магистрали под давлением p_0 через патрубок поступает в камеру прямого хода 1 ударника. Посредством дроссельного канала 5 она соединяется с камерой обратного хода 2. Поскольку диаметр D_2 , а, следовательно, и определяемая им площадь поперечного сечения передней полости больше, чем аналогичные параметры задней с диаметром D_1 , то ударник начинает двигаться назад. Кольцевой клапан 3 своей наружной поверхностью скользит по внутреннему профилю наковальни, создавая герметичную полость. По достижению им выхлопных пазов 4, происходит резкий сброс давления и сжатие упругого элемента. Это сопровождается появлением кольцевого зазора, через который сжатый воздух из передней полости через продольные пазы в ударнике выходит в атмосферу. Под действием движущей силы со стороны камеры прямого хода он

начинает двигаться вперед и, разгоняясь, наносит удар по наковальне. Далее рабочий цикл повторяется [9,10].

Наличие калибровочного отверстия с диаметром d , задает время наполнения камеры обратного хода ударника, что в свою очередь позволяет изменять период его обратного хода, а, следовательно, и регулировать частоту ударов [9, 10].

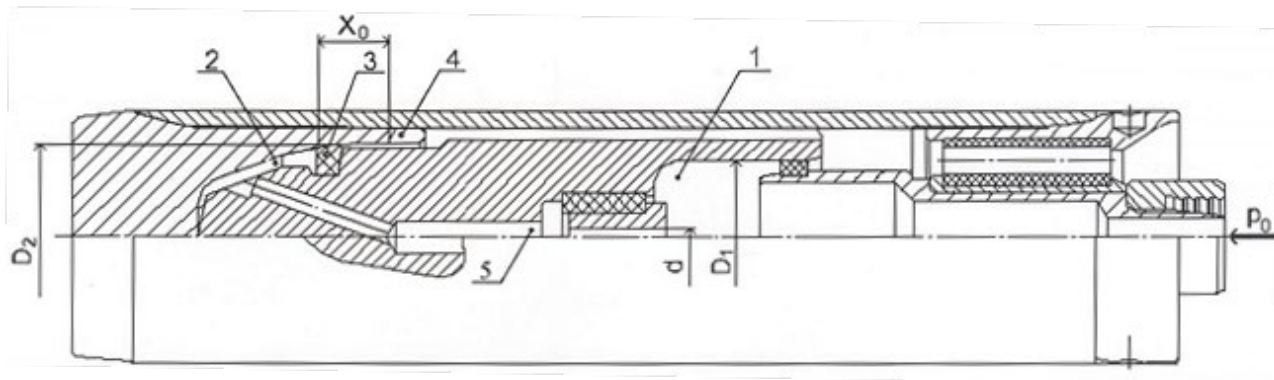


Рис. 4. Схема устройства пневмомолотов «Тайфун» [9, 10]:

1 – камера прямого хода; 2 – камера обратного хода; 3 – скользящий упругий клапан; 4 – выхлопные пазы; 5 – дроссельный канал; D_1 – диаметр камеры прямого хода; D_2 – диаметр камеры обратного хода; d – калибровочное отверстие в жиклере; p_0 – давление сжатого воздуха; X_0 – прямой ход ударника

Недостатки пневмомолотов «Тайфун»: неадаптированная конструкция воздухораспределительной системы для работы в условиях Арктики; необходимость «прогрева» упругого кольцевого клапана, материал которого при отрицательных температурах имеет повышенную жесткость.

Для устранения недостатков обозначены задачи, способствующие созданию новых пневмоударных механизмов: разработка методических рекомендаций для расчёта конструкции воздухораспределительной системы пневмоударного устройства, адаптированной к условиям отрицательной температуры; установление влияния фактического температурного баланса энергоносителя в системе воздухораспределения пневмоударного устройства на жесткость упругого кольцевого клапана.

Вывод

Важным этапом в технологии строительства горнодобывающих предприятий в Арктической зоне России является погружение стержневых элементов в грунт бурозабивным методом. Для его реализации наиболее рационально использовать пневмоударные машины, которые обладают преимуществами перед дизель-молотами и вибропогружателями. Поэтому исследования, направленные на обоснование параметров и разработку пневмоударного устройства, работающего без расширения сжатого воздуха внутри камеры холостого хода, являются одним из возможных путей получения высокоэффективной техники не только

для строительства горнодобывающих предприятий, но и для разрушения горных пород и уплотнения грунта в условиях Арктики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арктика. Большая Российская энциклопедия. Код доступа: <https://bigenc.ru/c/arktika-d5074d>
2. Строительный эксперт. Портал для специалистов архитектурно-строительной отрасли. Строительство в высоких широтах. Принципы, возможности и перспективы. Код доступа: <https://ardexpert.ru/article/5072>
3. Информационный портал «Всё о саморегулировании». НОСТРОЙ о строительстве в Арктике: проблемы и способы их решения. Код доступа: <https://www.all-sro.ru/news/nostroy-o-stroitelstve-v-arktike-problemy-i-sposoby-ikh-resheniya/>
4. Брушков А. В., Алексеев А. Г., Дроздов Д. С., Дубровин В. А., Железняк М. Н., Осокин А. Б., Садуртдинов М. Р., Сергеев Д. О., Бадина С. В., Великин С. А., Жданев О. В., Кузнецов М. Е., Малкова Г. В., Остарков Н. А., Федоров Р. Ю., Фролов К. Н. Мониторинг вечной мерзлоты. [Текст]. – М.: Изд-во Академический проект, 2024.
5. СП 496.1325800.2020. Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Свод правил. [Текст]. – М.: Изд-во Минстроя России, 2020.
6. Б. Г. Лызо, Ю. В. Дмитриевич. Новые конструкции сваебойных молотов. [Текст]. – М.: Изд-во ВНИИСтройдормаш, 1969.
7. Б. Г. Лызо. Свайные дизель-молоты. [Текст]. – М.: Изд-во ВНИИСтройдормаш, 1967.
8. Б. Ф. Белецкий, И. Г. Булгакова. Строительные машины и оборудование. Справочное пособие для инженерно-технических работников строительных организаций, студентов строительных вузов, факультетов и техникумов, производителей-механизаторов. [Текст]. – Ростов н/Д.: Изд-во Феникс, 2005.
9. Червов В.В. Интерэкспо Гео-Сибирь [Текст] /Расширение области применения пневмомолотов с переменной структурой ударной мощности // Новосибирск: Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 2019. – 9 с.
10. Червов А.В. Интерэкспо Гео-Сибирь [Текст] / Расчёт динамических параметров камеры обратного хода пневмомолота с механическим замыканием упругого клапана // Новосибирск: Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 2019. – 5 с.

© И. Е. Иоанов, 2026

П. В. Косых¹, С. С. Шевченко¹✉

Расчёт аэродинамической характеристики реверсивного осевого вентилятора с поочередно установленными на разные углы лопатками рабочего колеса

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН), г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: tu-22-m3@mail.ru

Аннотация. Реверсирование вентиляторов является важной частью обеспечения безопасности горного предприятия. В тоннельной вентиляции реверсирование струи может являться частью технологического процесса проветривания. Повышение эффективности и производительности работы вентилятора в реверсивном режиме является важной задачей. В статье рассмотрен способ повышения реверсивных качеств осевого вентилятора, заключающийся в поочередной установке лопаток в развёрнутое на 180° положение. С помощью численного расчёта получены характеристики такого вентилятора. Показано, что производительность такого вентилятора на 17% выше, чем исходного. Эффективность работы в реверсивном режиме повышается на 20%. При этом показатели производительности и эффективности в прямом режиме снижаются на 25% и 12% соответственно

Ключевые слова: реверсивный осевой вентилятор, способ реверсирования, неоднородная решетка профилей

P. V. Kosykh¹, S. S. Shevchenko¹✉

Calculation of the aerodynamic characteristics of a reversible axial fan with impeller blades set at different angles

¹Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: tu-22-m3@mail.ru

Abstract. Fan reversibility is an important part of ensuring mine safety. In tunnel ventilation, airflow reversal can be part of the ventilation process. Improving fan efficiency and performance in reversible mode is a key task. This article discusses a method for improving the reversibility of an axial fan by alternately rotating the blades 180°. Numerical calculations were used to obtain the characteristics of this fan. It was shown that the performance of this fan is 17% higher than that of the original fan. Operating efficiency in reversible mode increases by 20%. However, performance and efficiency in direct mode decrease by 25% and 12%, respectively.

Keywords: axial reversible fan, the method of reversal, non-uniform airfoil cascade

Введение

Правила безопасности в угольных шахтах [1] предъявляют к вентиляторам главного проветривания требование обеспечить реверсирование вентиляционной струи с производительностью не менее 60% от расхода воздуха при нормальном

режиме проветривания. В тоннельной вентиляции реверсирование вентиляционной струи может быть частью технологического процесса проветривания и составлять значительную часть времени её работы [2].

В связи с этим актуальной является задача повышения производительности и эффективности работы осевых вентиляторов в реверсивном режиме работы. Наиболее распространённым и технологически простым способом реверсирования осевого вентилятора является изменение направления вращения его рабочего колеса с изменением углов установки лопаток аппаратов в благоприятное для реверсирования положение (рис. 1а). Однако этот способ сопряжён с значительными потерями давления вследствие несоответствия поворота потока в проточной части вентилятора средней линии профилей лопаток [2].

За последние 30 лет исследователями изучены ряд способов повышения реверсивных качеств осевых вентиляторов. Среди них можно выделить применение лопаток с симметричным эллиптическим профилем [2], лопаток с S-образным профилем [3, 4], реверсирование приведением во вращение направляющего аппарата (НА) с остановленным РК [5].

Авторами рассмотрен вопрос эффективности и производительности вентилятора в реверсивном режиме при поочередной установке лопаток РК в развёрнутое на 180° положение (рис. 1б). Такой способ повышения реверсивных качеств предложен Бычковым А.В. и упомянут в [2].

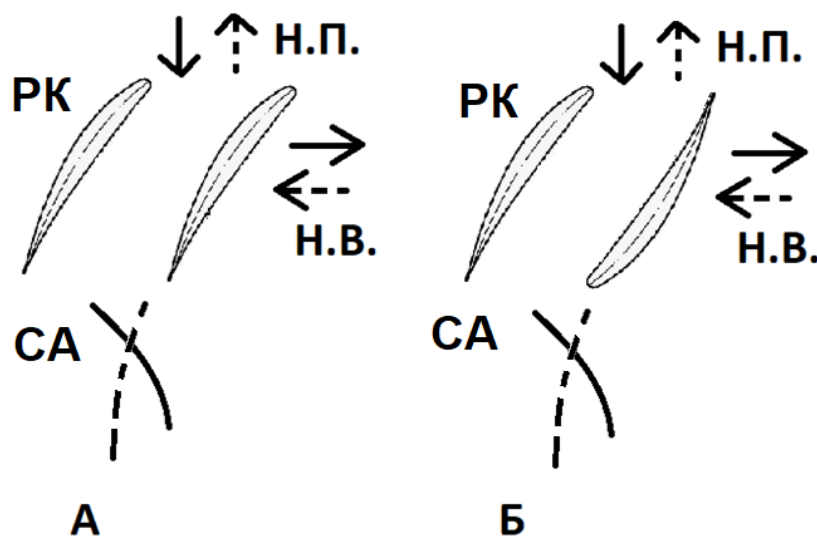


Рис. 1. Положение лопаток вентилятора в прямом и реверсивном режимах работы: А – реверсирование вентилятора при обычном положении лопаток РК; Б – поочередной установке лопаток РК в развёрнутое на 180° положение

Методы и материалы

Для исследований была выбрана аэродинамическая схема ЦАГИ ОВ-103 (РК+СА) [6], широко применяемая в тоннельных осевых вентиляторах. Для такой схемы существуют экспериментально полученные характеристики прямого

и реверсивного режимов. Эти характеристики получены для вентилятора диаметром $D = 700$ мм, при относительном диаметре втулки $v = 0,6$ и частоте вращения $n = 1000 \div 1200$ об/мин. При реверсировании СА выполняет роль НА. Для повышения давления его лопатки разворачивают в реверсивное положение, соответствующее подкручиванию потока навстречу движению лопаток РК. Лопаточный венец РК имеет 10 лопаток, СА – 14 лопаток.

Моделирование трёхмерного установившегося течения в проточной части вентилятора.

Для получения расчётных характеристик аэродинамической схемы, полученной на основе ЦАГИ ОВ-103 (РК+СА) путём поочередного поворота лопаток РК на 180° через одну, был использован пакет программ ANSYS. Для решения задачи трёхмерного обтекания лопаточных венцов в программе ANSYS Design Modeler была построена трёхмерная модель последовательности секторов проточной части (рис. 2), соответствующих входу в вентилятор (1), сектору РК, включающему две лопатки (2), сектору СА с одной лопаткой (3) и выходу из вентилятора (4).

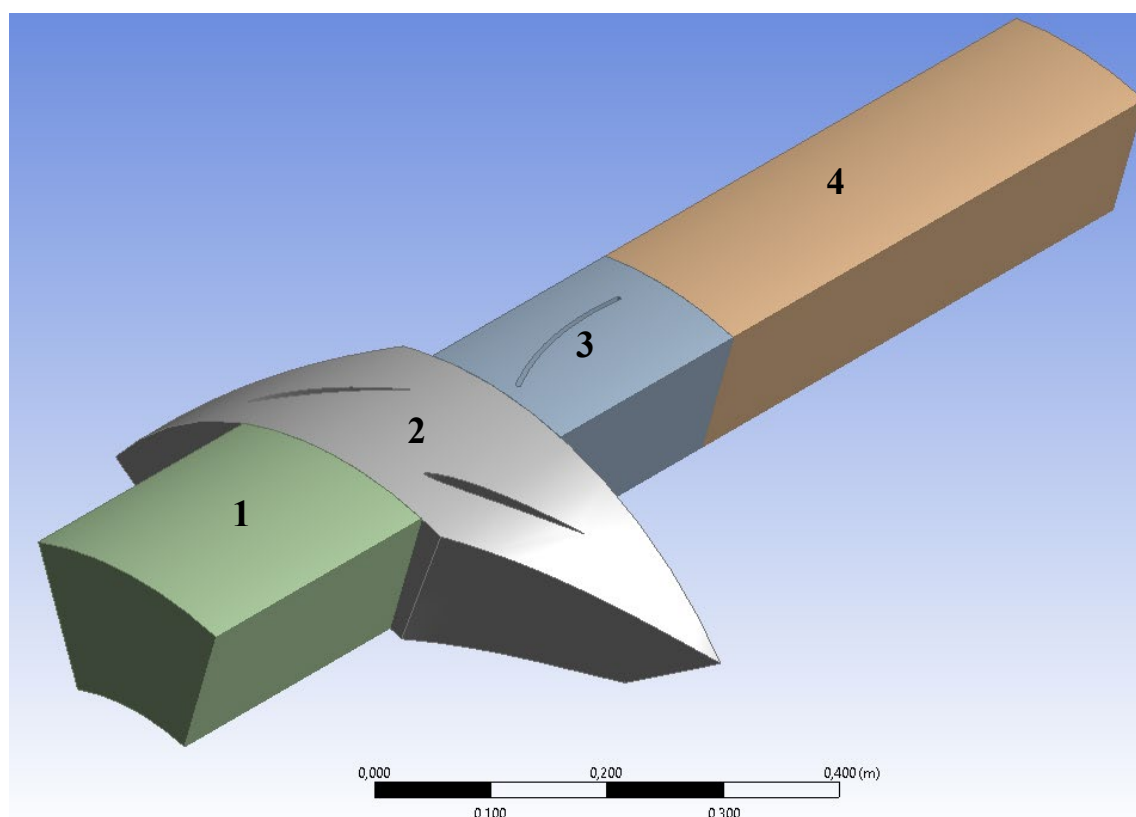


Рис. 2. Расчетная модель проточной части осевого вентилятора ЦАГИ ОВ-103 (РК+СА):

1 – входная область, 2 – область РК, 3 – область СА, 4 – выходная область

По созданным секторам были построены расчётные сетки из объёмных элементов (рис.3). Количество элементов составило порядка 4 млн. В расчётных

сетках присутствуют как гексаэдральные, так и тетраэдральные элементы ([7]). Для обеспечения круговой периодичности боковые поверхности секторов имеют одинаковое разбиение, позволяющее обеспечить сопоставление соответствующих узлов элементов этих двух поверхностей. При разбиении размер элементов у пристеночных областей выбирался исходя из критерия y^+ в соответствии с используемой в последующем расчёте модели турбулентности ([8]).

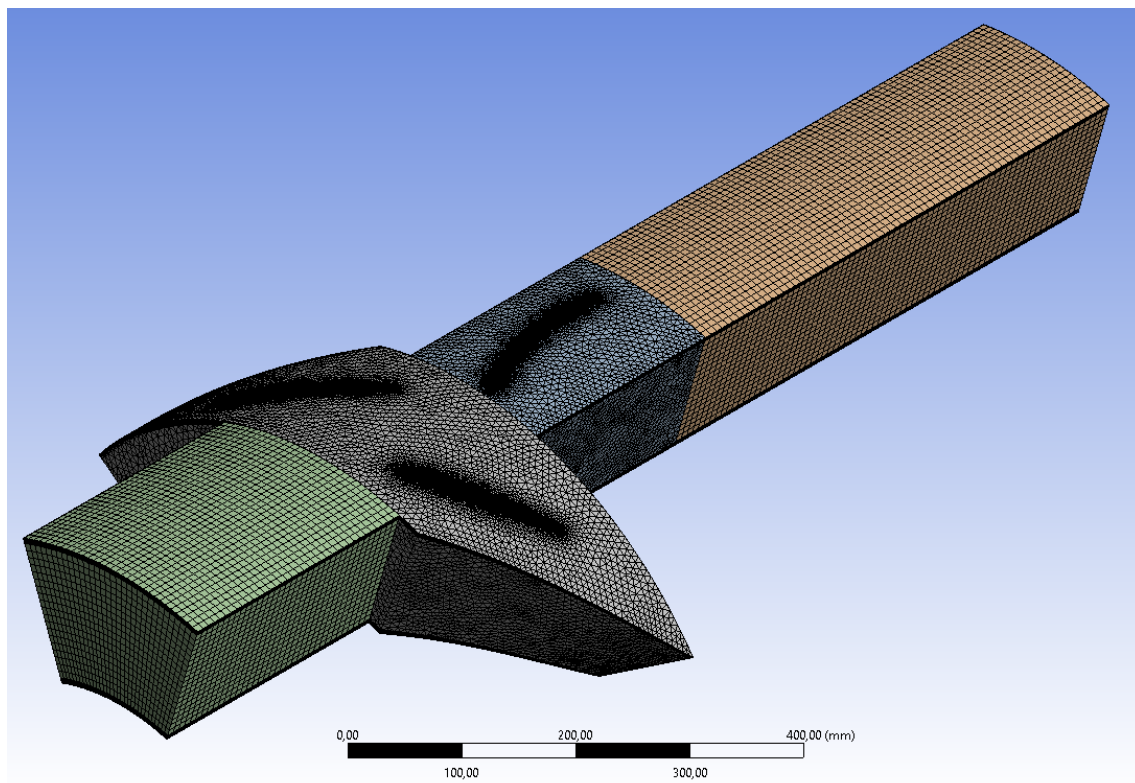


Рис. 3. Сеточная модель проточной части осевого вентилятора ЦАГИ ОВ-103 (РК+СА)

Полученная сеточная модель была импортирована в программу ANSYS CFX. Для расчета характеристик потока в проточной части вентилятора решаются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, дополненные моделью турбулентности и замыкаемые уравнением неразрывности. Они имеют следующий вид [9]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0,$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right),$$

где $\rho \overline{u'_i u'_j}$ – тензор Рейнольдсовых напряжений.

Для численного решения уравнений в Ansys CFX используется метод контрольных объемов. Течение моделировалось как стационарное, несжимаемое, турбулентное. Использовалась двухпараметрическая $k-\varepsilon$ модель турбулентности ([10]).

Входные и выходные области расчетной схемы, а также область СА заданы неподвижными. Область колеса задана вращающейся с частотой 1200 об/мин. Для обеспечения неподвижности стенки корпуса в области рабочего колеса, задано ее вращение в противоположную сторону с той же частотой. Для сопряжения вращающейся и неподвижных расчетных областей входа, колеса, спрямляющего аппарата и выхода применен способ осреднения параметров по окружному направлению (stage mixing) между расчетными областями.

Граничные условия на входе определялись объёмным расходом Q , м³/с, на выходе – нулевым средним статическим давлением. Плотность воздуха принималась равной 1,2 кг/м³. На рис. 4 Показаны положения лопаток с направлениями вращения (н.в.) и соответствующие им направления потока (н.п.), для которых были рассчитаны характеристики. Рассматривались прямые (рис. 4 А, б) и реверсивные (рис. 4 в, г) режимы работы с обычным (рис. 4 а, в) и поочередно развернутым (рис. 4 б, г) положениями лопаток РК.

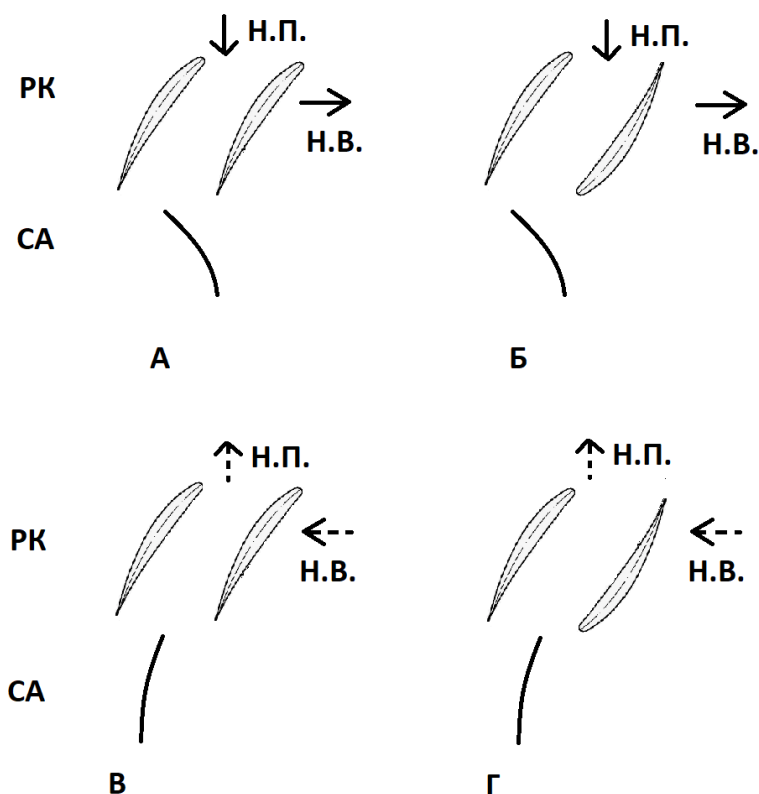


Рис. 4. Положения лопаток в лопаточных венцах рассматриваемого вентилятора

Расчет характеристики по плоской решетке на среднем радиусе.

Для проверки корректности решения в трёхмерной постановке были рассмотрены углы поворота потока $\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1$ и потери давления ξ при течении в плоской решётке, составленной из профилей на среднем радиусе лопаточного венца РК. На рис. 5 показана часть плоской решётки с двумя профилями лопатки и треугольниками скоростей на входе и выходе из решётки. β_1 и β_2 – углы входа потока в решётку и выхода из неё соответственно в относительном движении, δ_1 – угол входа потока в решётку в абсолютном движении. При отсутствующем НА он равен 90° .



Рис. 5. Плоская решетка, составленная из профилей лопаток РК

Для определения параметров потока в плоской постановке в программе ANSYS Fluent была создана сеточная модель с контрольными элементами, показанная на рис. 6.

Коэффициент давления рассчитывался по безразмерной формуле Эйлера для турбомашин:

$\psi = 2(1 - \xi)\bar{r}\phi_a(\text{ctg}\beta_1 - \text{ctg}\beta_2)$, где ξ – коэффициент потерь полного давления в решётке, $\bar{r}$ – относительный средний радиус вентилятора, ϕ_a – относительная осевая скорость потока в решётке.

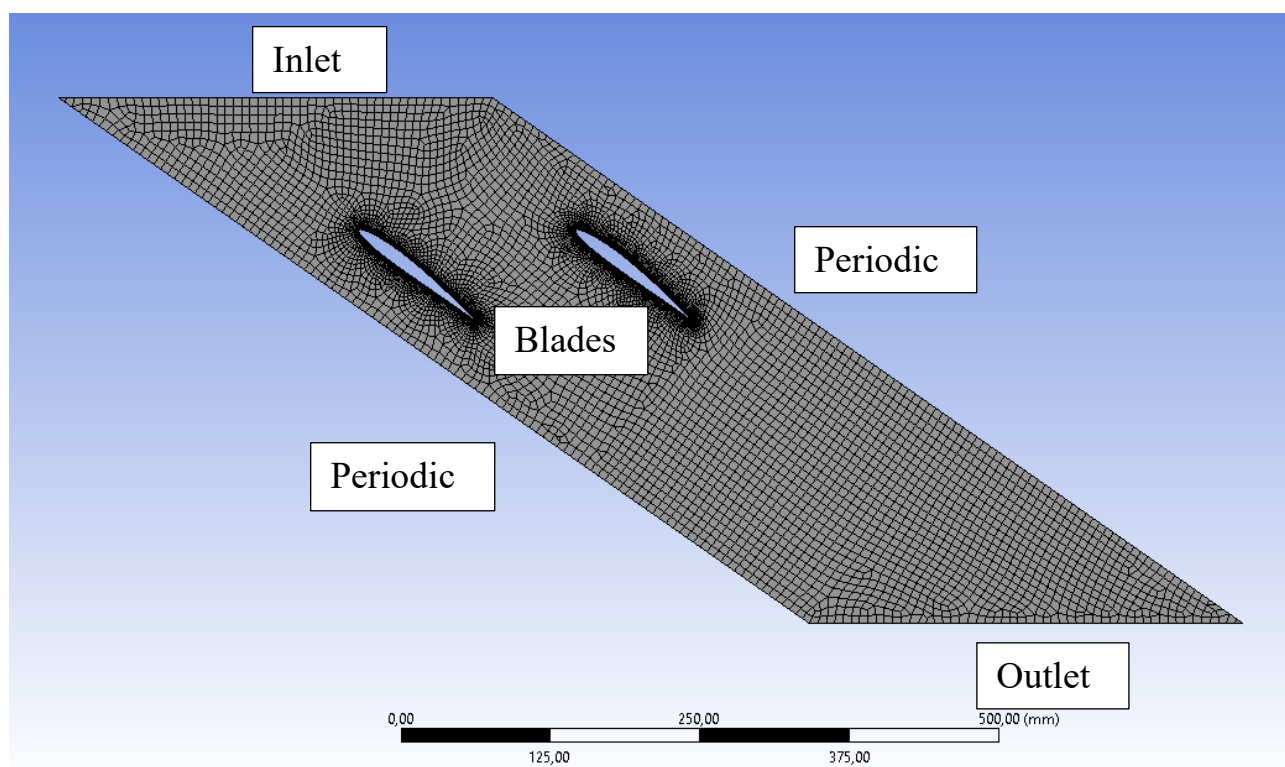


Рис. 6. Сеточная модель плоской решетки

Результаты

На рисунках 7 – 10 показаны вычисленные характеристики вентилятора с различным положением лопаток. Экспериментальные характеристики исходной схемы показаны кривой сплошной линией. Расчётные характеристики, полученная из трёхмерного расчёта, отмечены круглыми точками, а квадратными – результат двумерного расчёта.

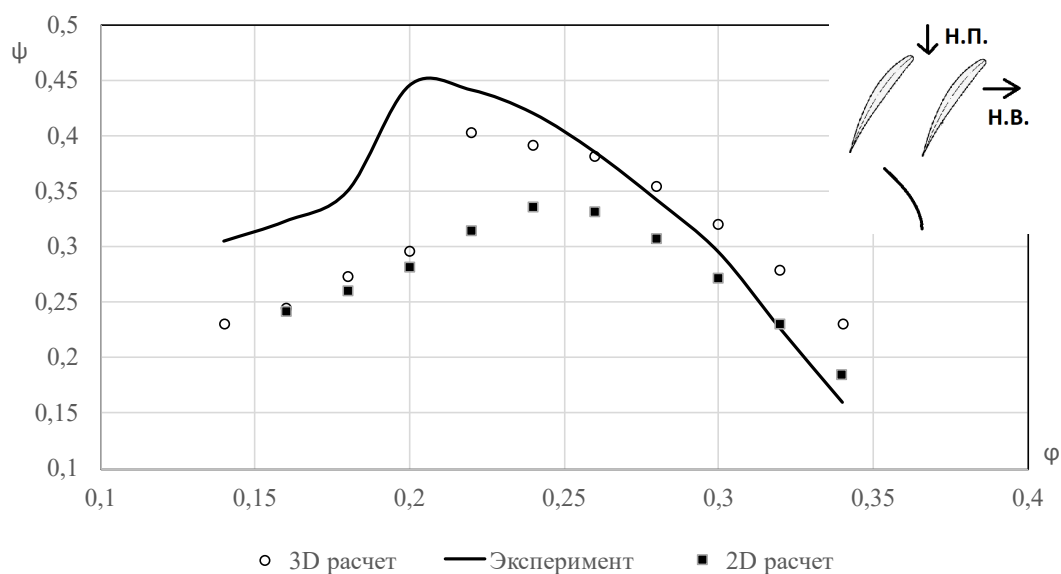


Рис. 7. Аэродинамические характеристики схемы вентилятора ОВ-103 (РК+СА) в прямом режиме работы

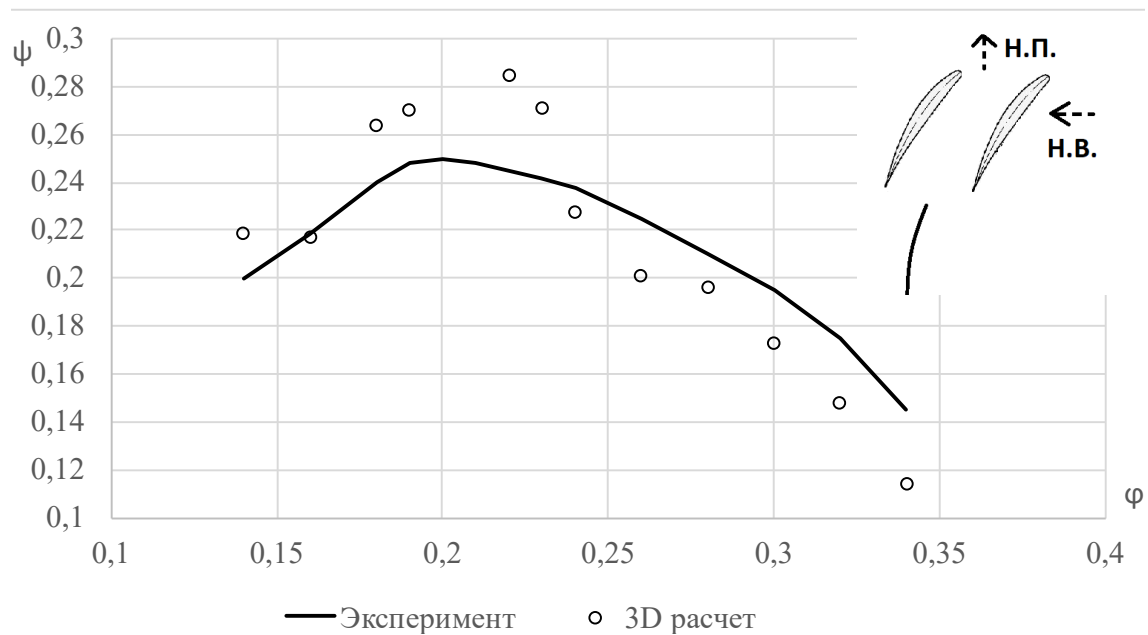


Рис. 8. Аэродинамические характеристики схемы вентилятора ОВ-103 (РК+СА) в реверсивном режиме работы

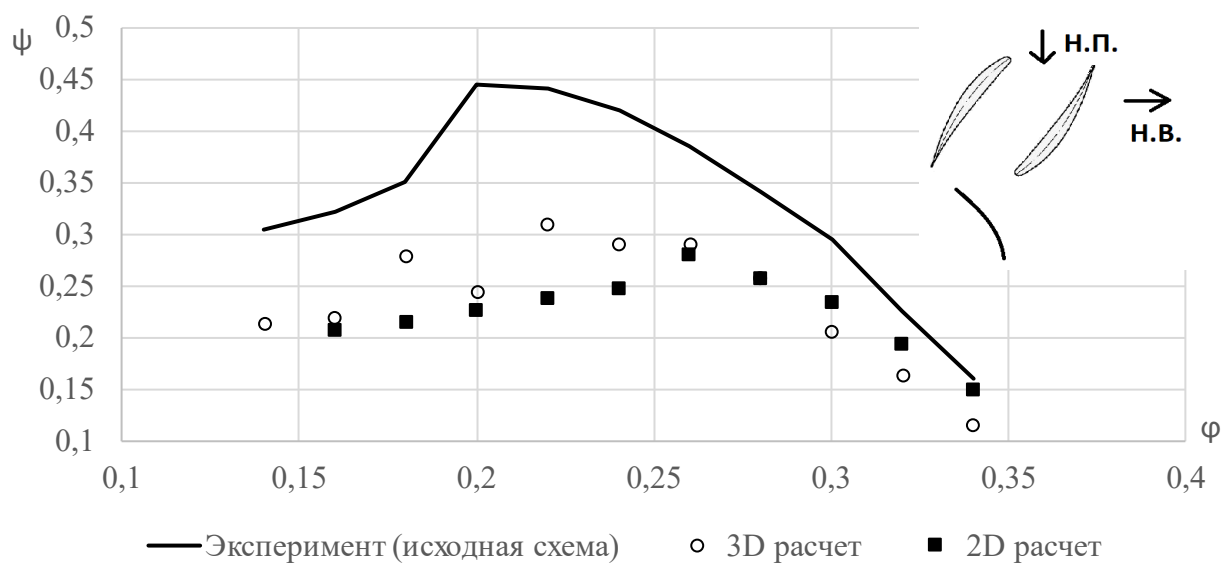


Рис. 9. Аэродинамические характеристики схемы вентилятора ОВ-103 (РК+СА) в прямом режиме работы с развернутыми поочередно на 180° лопатками РК

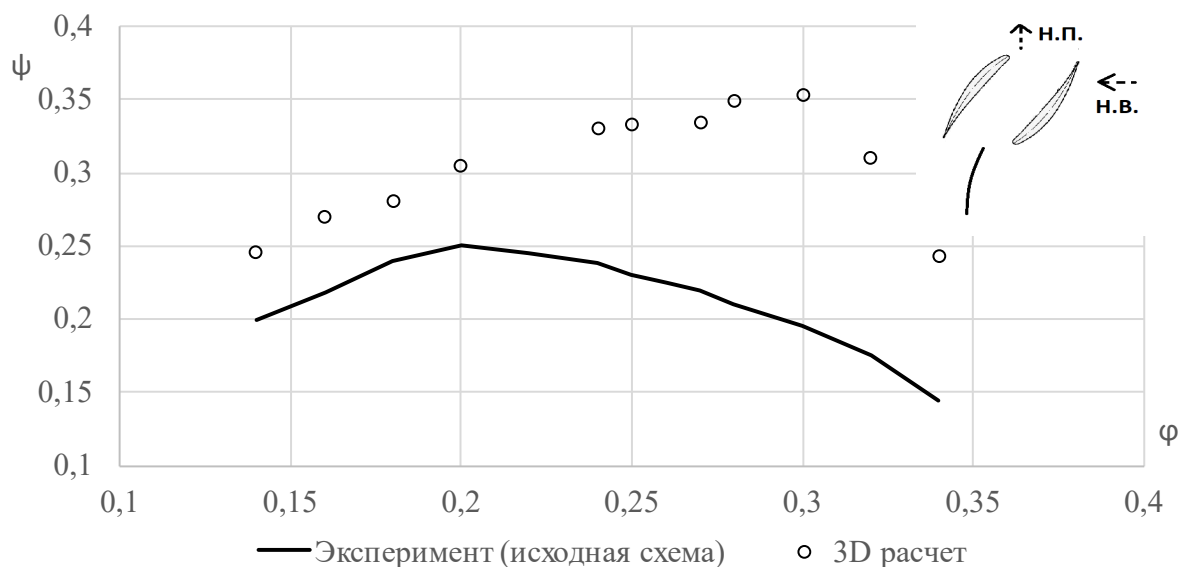


Рис. 10. Аэродинамические характеристики схемы вентилятора ОВ-103 (РК+СА) в реверсивном режиме работы с развернутыми поочередно на 180° лопатками РК

Обсуждение

Рассчитанные характеристики вместе с экспериментальными данными сведены вместе на рисунке 11.

Кривой, пересекающей все характеристики, показана зависимость сопротивления сети от расхода. Сеть выбрана из условия наиболее эффективной работы вентилятора с исходной аэродинамической схемой в прямом режиме. Из рисунка видно, что коэффициент расхода прямого режима исходного вентилятора составляет $\varphi=0,26$. При развороте половины лопаток РК на 180° коэффициент расхода прямого режима снижается до $\varphi=0,225$. При развороте лопаток производительность в режиме реверсирования значительно увеличилась и составила $\varphi=0,245$ по сравнению с исходной конфигурацией, которая обеспечивает коэффициент расхода равный $\varphi=0,21$.

Прямой режим работы вентилятора с половиной лопаток РК развёрнутой на 180° обладает наименьшей максимальной производительностью по сравнению с другими конфигурациями (его характеристика пересекает ось абсцисс ранее других).

Черными точками на кривых графика показаны точки максимальных КПД соответствующих им режимов. Значения КПД для исходной схемы взяты из [6], а данные для измененной схемы являются расчетными. Для прямого режима измененной схемы максимальный КПД составил $\eta=0,74$ при $\varphi=0,28$. Для реверсивного режима измененной схемы максимальный КПД составил $\eta=0,68$ при $\varphi=0,3$. По экспериментальным данным, полученным для исходной схемы вентилятора ЦАГИ ОВ-103, КПД в прямом режиме равен $\eta=0,85$ при $\varphi=0,26$, а в реверсивном – $\eta=0,4$ при $\varphi=0,24$.

Большее значение максимального расхода в реверсивном режиме измененной схемы по сравнению с прямым режимом исходной схемы объясняется наличием СА, развёрнутым в реверсивное положение и играющего роль НА.

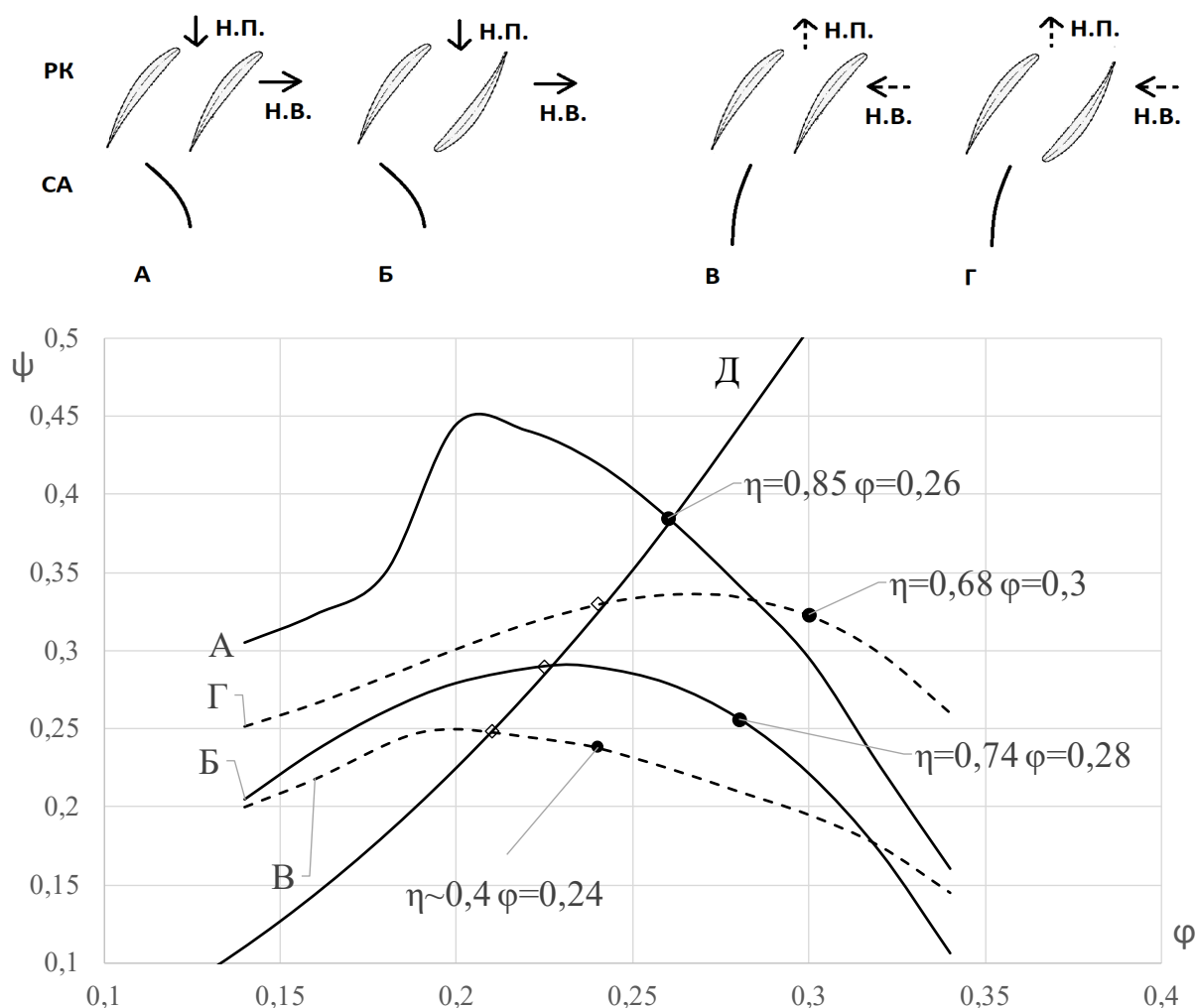


Рис. 11. Аэродинамические характеристики схемы вентилятора ОВ-103 (РК+СА): А –прямой режим, исходная схема (эксперимент), Б –прямой режим, схема с поочередно развёрнутыми лопатками (расчет), В –реверсивный режим, исходная схема (эксперимент), Г – реверсивный режим, схема с поочередно развёрнутыми лопатками (расчет), Д – сопротивление сети

Заключение

Был численно исследован способ повышения реверсивных качеств осевого вентилятора, предложенный Бычковым А.В. и заключающийся в поочередной установке лопаток РК на 180° . Исследования проведены на примере схемы ЦАГИ ОВ-103 (РК+СА). Показано, что такой способ реверсирования позволяет повысить производительность и уменьшить потери. Однако при этом эффективность и производительность прямого режима снижается.

Установка половины числа лопаток РК в развёрнутое на 180° положение позволила увеличить производительность вентилятора в реверсивном режиме на 17%, при работе вентилятора в сети, для которой эффективность прямого режима исходной схемы максимальна (т.е. рабочая точка вентилятора исходной схемы совпадает с точкой максимального КПД). При этом производительность прямого режима снизилась на 25%. Максимальный КПД в режиме реверсирования измененной схемы составил 68%, против $\sim 40\%$ при реверсировании осевого вентилятора исходной схемы. При этом КПД прямого режима снизился на $\sim 12\%$.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер государственной регистрации 126021217131-9).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах»: Приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 №507 // Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору: офиц. сайт. URL: [https://www.gosnadzor.ru/industrial/coal/Acts/№ 507 от 08.12.2020.pdf](https://www.gosnadzor.ru/industrial/coal/Acts/№507%20от%2008.12.2020.pdf) (дата обращения: 13.05.2026)
2. Брусиловский И. В. Аэродинамический расчет осевых вентиляторов. – М.: Машиностроение, 1986. – 288 с.
3. Московко Ю. Г. Методика проектирования и разработка энергоэффективных осевых вентиляторов с профилями лопаток специальной формы: дис. канд. техн. наук. – СПб., 2011. – 134 с.
4. Грехнёва Е.Ю. Разработка аэродинамических схем с s-образными лопатками рабочих колес для реверсивных, неповоротно-лопастных осевых вентиляторов: Диссертация кандидата технических наук – Новосибирск., 2012. – 132 с.
5. Красюк А.М., Косых П.В. Аэродинамический расчет осевых, реверсируемых вращением направляющего аппарата // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых – 2023 - №3 – 85-95 с.
6. Брусиловский И.В. Аэродинамические схемы и характеристики осевых вентиляторов ЦАГИ. М.: Недра, 1978 – 198 с.
7. А.М. Молчанов, М.А. Щербаков, Д.С. Янышев, М.Ю. Куприков, Л.В. Быков Построение сеток в задачах авиационной и космической техники: учеб. пособие для студентов / А. М. Молчанов, М. А. Щербаков, Д. С. Янышев, М. Ю. Куприков, Л. В. Быков; МАИ – Москва, 2013. – 260 с., с ил.
8. Ю. В. Кожухов, С. В. Карташов, А. А. Аксенов, А. М. Яблоков, М. И. Соколов, Н. И. Садовский, Е. С. Зайцева Методика построения расчетных сеток лопаточных аппаратов энергетических турбомашин для моделирования вязкого потока: учеб. пособие / Ю. В. Кожухов [и др.]. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – 98 с.
9. Wilcox DC. Turbulence Modeling for CFD (Third Edition). DCW Industries 2006 – 515 p
10. Батурин О.В., Батурин Н.В., Матвеев В.Н. Расчет течений жидкости и газа с помощью универсального программного комплекса Fluent. Учеб. Пособие. – Самара.: Изд-во Самар. гос. аэро-косм. Ун-та, 2009. – 151 с.

© П. В. Косых, С. С. Шевченко, 2026

В. В. Плохих^{1✉}, Б. Б. Данилов¹, Д. О. Чешчин¹

Обоснование структуры системы управления для реализации адаптивной технологии проходки скважин пневматической ударной машиной

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: vadim.plohih@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматриваются системы управления рабочим процессом, используемые при прокладке подземных коммуникаций пневмоударной машиной с изменяемыми энергетическими характеристиками. Основным недостатком приведенных систем является возможность регулирования энергии и частоты ударов машины только за счет изменения параметров энергоносителя. В этом случае происходит снижение ударной мощности и производительности проходки скважины в целом. На основе анализа принципа работы таких систем для пневмоударной машины с изменяемыми энергетическими характеристиками предложена структура системы управления, включающая в себя датчики и электрический привод перемещения центрального патрубка ударной машины для изменения энергетических характеристик в автоматическом режиме, а также блок управления, пневмоклапан, монитор оператора и блок питания.

Ключевые слова: система управления, проходка скважин, адаптивные технологии, пневмоударная машина, энергия удара, частота удара, рабочий ход

V. V. Plokhikh^{1✉}, B. B. Danilov¹, D. O. Cheshchin¹

Substantiation of control system structure for implementation of adaptive technology of well drilling with pneumatic percussion machine

¹Chinakal Institute of Mining Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: vadim.plohih@yandex.ru

Abstract. The article discusses the working process control systems used when laying underground utilities with a pneumatic shock machine with variable energy characteristics. The main disadvantage of these systems is the ability to control the energy and frequency of machine impacts only by changing the parameters of the energy carrier. In this case, there is a decrease in the impact power and productivity of the well as a whole. Based on the analysis of the principle of operation of such systems for a pneumatic impact machine with variable energy characteristics, a control system structure is proposed, which includes sensors and an electric drive for changing the energy characteristics of the central branch pipe of the shock machine in automatic mode, as well as a control unit, a pneumatic valve, an operator-torus monitor and a power supply unit.

Keywords: control system, well drilling, adaptive technologies, pneumatic hammer machine, impact energy, impact frequency, working stroke

Введение

Сооружение подземных каналов является неотъемлемой частью технологических процессов в строительстве, при бестраншейной прокладке подземных

коммуникаций, и в горной промышленности. Чаще всего для сооружения таких каналов применяются пневматические ударные машины, которые характеризуются конструктивной простотой, низкой стоимостью и достаточной надежностью работы.

Общим трендом развития горного производства и бестраншейных технологий строительства в настоящее время является внедрение автоматических систем управления и так называемых «адаптивных технологий». Под адаптивными технологиями подразумевается возможность изменения энергетических характеристик (энергии и частоты ударов) устройства в зависимости от свойств обрабатываемого грунтового массива непосредственно в процессе проходки скважины. Применение адаптивных технологий позволяет уменьшить энергоемкость разрушения горной породы, улучшить технико-экономические показатели буровых процессов и минимизировать присутствие персонала в месте проведения работ.

В существующих пневмоударных машинах регулирование энергии ударных импульсов возможно только за счет изменения давления энергоносителя или ограничения его расхода. Такое регулирование осуществляется в ручном режиме в процессе проходки скважины, что приводит к уменьшению не только энергии, но и частоты ударов. Это в свою очередь снижает производительность работ. Кроме того, такое регулирование требует непосредственного участия оператора в процессе настройки параметров энергоносителя в процессе бурения. Таким образом, необходим иной способ регулирования энергетических характеристик, лишенный указанных недостатков.

В ИГД СО РАН разработана и запатентована конструктивная схема пневмоударной машины с комбинированной системой воздухораспределения. Основными элементами конструкции схемы являются эластичный клапан, установленный неподвижно на наковальне и позволяющий обеспечить полное опорожнение камеры холостого хода во всем диапазоне регулировок, а так же центральный патрубок, перемещение которого вдоль корпуса позволяет изменять рабочий ход ударника и, соответственно, энергию и частоту ударов. При этом изменение энергии и частоты ударов происходит разнонаправленно. То есть, при уменьшении энергии увеличивается частота ударов и наоборот. Производительность проходки скважины при таком регулировании может практически не изменяться [1].

По этой конструктивной схеме был изготовлен экспериментальный образец пневмоударной машины и проведены его лабораторные испытания при внедрении стального трубчатого кожуха в грунтовой канал. Изменение положения центрального патрубка в процессе испытаний происходило в ручном режиме. Полученные результаты подтвердили перспективность применения такой системы регулирования при забивании труб в грунт [2]. Однако, для реализации адаптивных технологий необходима автоматическая система регулирования, позволяющая изменять положение центрального патрубка в автоматическом режиме в зависимости от технологических условий и свойств грунтового массива.

Методы и материалы

Для решения приведенной задачи необходимо рассмотреть существующие системы управления для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций.

Чаще всего для такой технологии используются системы управления, обеспечивающие точность проходки скважин, автономность и безопасность ведения работ.

Для обеспечения точности и корректировки траектории движения трубы используется гироскопическая система управления. Кроме гироскопа в такие системы устанавливают акселерометр. Примером такой системы является Vermeer NAV-X, которая предназначена для горизонтально-направленного бурения. В состав системы входит акселерометр и гироскоп для точного определения местоположения и пространственной ориентации буровой головки [3].

Схема работы адаптированной системы управления Vermeer NAV-X для пневматической ударной машины при забивании труб в грунтовой массив представлена на рис. 1.

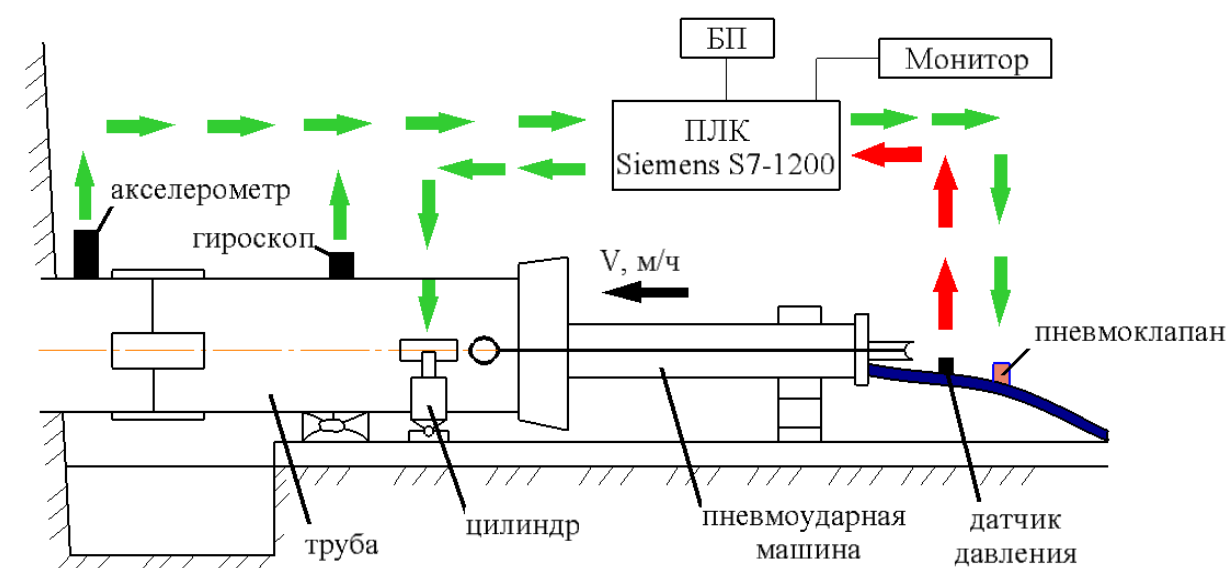


Рис. 1. Схема реализации адаптивной технологии Vermeer NAV-X

Система работает следующим образом. Гироскоп и акселерометр непрерывно передают сигнал о положении и динамике движения трубы на программируемый логический контроллер (ПЛК) Siemens S7-1200. Акселерометр позволяет выявлять нештатные ситуации в процессе проходки скважины. ПЛК анализирует угол отклонения по горизонтали и вертикали по данным гироскопа и ускорение по сигналам акселерометра. Если ПЛК фиксирует отклонение от проектных параметров проходки скважины, то формируется сигнал подачи давления в силовой управляющий цилиндр. Тем самым осуществляется корректировка положения трубы в процессе работы. ПЛК так же анализирует данные, получаемые от акселерометра, и преобразует их в значение силы удара и вибрации. В зависимости от этого осуществляется подача сигнала на пневмоклапан, изменяющий давление энергоносителя. Дополнительными функциями ПЛК являются диагностика целостности системы управления и вывод данных на экран

монитора оператору. Питание всей системы осуществляется от блока питания БП [4,5].

Примером системы, обеспечивающей автономность ведения работ, является система Toro PipeRam AI. Это инновационная система управления, в которой применяются современные технологии, такие, как алгоритмы машинного обучения, предназначенные для оптимизации технологических процессов горизонтально-направленного бурения. Такая система обеспечивает автоматизацию управления и эффективность взаимодействия с оборудованием в режиме реального времени. Схема работы системы с машинным обучением Toro PipeRam AI представлена на рис. 2.

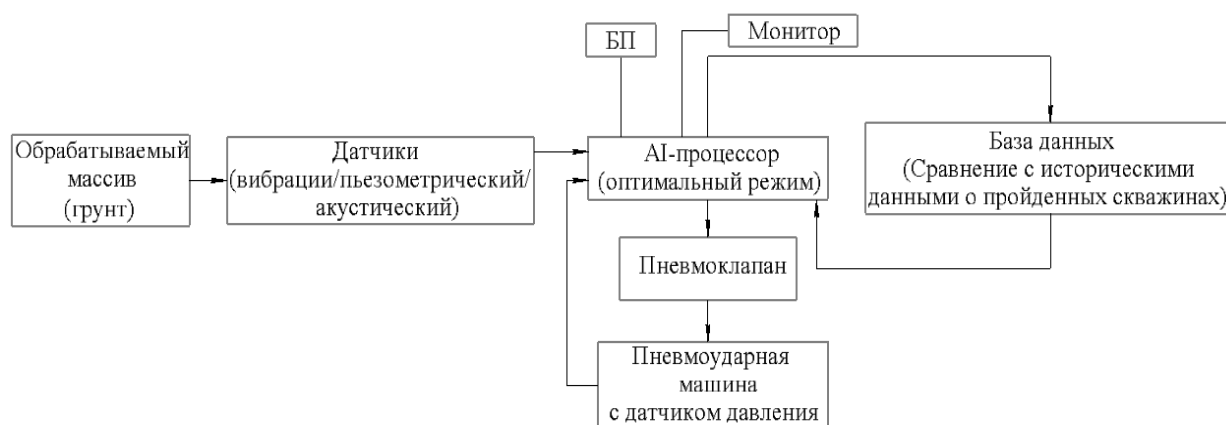


Рис. 2. Схема реализации системы Toro PipeRam AI

Суть работы системы Toro PipeRam AI заключается в следующем. При внедрении трубы в грунт происходит фиксация изменения параметров проходки с помощью датчиков уровня вибрации, пьезоэлектрического датчика давления на трубу от грунта. Акустический датчик дает информацию о структуре грунта. Сигналы с датчиков поступают на AI-процессор, в состав которого входит AI-ядро на базе встраиваемого вычислительного модуля NVIDIA Jetson, предназначенного для обучения искусственного интеллекта, машинного обучения и компьютерного зрения на периферийных устройствах. Так же в качестве AI-ядра может использоваться спецпроцессор с алгоритмами Random Forest. Процессор анализирует данные, поступающие с датчиков. На основе базы данных, в которой присутствует архив с данными проектов о пройденных скважинах, процессор подбирает энергию и частоту ударов для обрабатываемого массива. Далее сигнал поступает на пневмоклапан, который установлен в питающей магистрали пневмоударной машины. Происходит изменение давления энергоносителя и соответствующее изменение энергии и частоты ударов устройства. Все решения, принимаемые процессором, отображаются на мониторе оператора. Если возникает необходимость, то в процессе проходки скважины можно внести корректировки. Для этого предусмотрен удобный интерфейс для пользователя. Питание системы управления происходит от блока питания БП [6].

Другим примером системы, обеспечивающей безопасность ведения работ, является дистанционный мониторинг Vermeer NAV-X. Vermeer NAV-X является интеллектуальной системой мониторинга для бестраншейной прокладки труб и горизонтально-направленного бурения. Такая система позволяет обеспечить точное позиционирование рабочего органа, контроль параметров работы и удаленное управление процессом проходки скважины через облачную платформу обмена данными. Основными функциями системы являются точное отслеживание траектории, удаленный доступ, запись всех параметров работы, оповещения об авариях. Схема работы системы дистанционного мониторинга Vermeer NAV-X представлена на рис. 2.

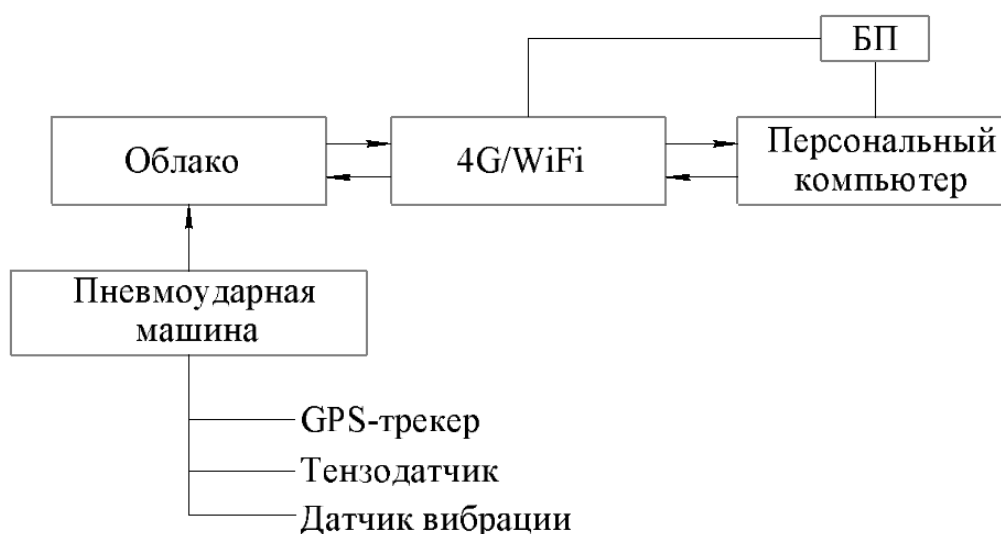


Рис. 3. Схема реализации дистанционного мониторинга Vermeer NAV-X

Работа дистанционного мониторинга Vermeer NAV-X заключается в следующем. Сигнал с датчиков (GPS-трекер, тензодатчик, датчик вибрации), установленных на пневмоударной машине, поступает в облачную платформу обмена данными. Далее посредством 4G или WiFi происходит передача данных на персональный компьютер. Расстояние передачи зависит от зоны покрытия и параметров связи. Так же возможно внесение изменений параметров проходки скважины непосредственно в процессе работы. Внесенные данные архивируются в облаке и могут быть использованы для дальнейших работ. Кроме того, облачная платформа может быть связана с другими системами и приложениями [7-9].

Результаты

Рассмотренные системы управления не позволяют в полной мере реализовать преимущества технологии адаптивного бурения. Их общим недостатком является возможность регулирования энергетических характеристик устройства только за счет изменения давления энергоносителя или ограничения его расхода. При уменьшении давления энергоносителя происходит одновременное снижение как энергии, так и частоты ударов, и соответственно, ударной мощности и производительности

процесса проходки скважины [10]. Кроме того, отсутствует датчик измерения скорости перемещения, который позволит изменять энергетические характеристики устройства в зависимости от скорости погружения трубы непосредственно в процессе проходки. Следовательно, отсутствует возможность оценки эффективности действия ударных импульсов. Вдобавок, для автоматического перемещения центрального патрубка и изменения характеристик машины необходим электрический, или какой-то иной привод, соединенный с блоком управления. При этом необходим канал управления приводом и канал его обратной связи с блоком управления.

На основе рассмотренных систем управления, с учетом выявленных недостатков, разработана схема системы управления для адаптивной технологии проходки скважин пневмударной машиной с изменяемыми энергетическими характеристиками [1] (рис. 4).

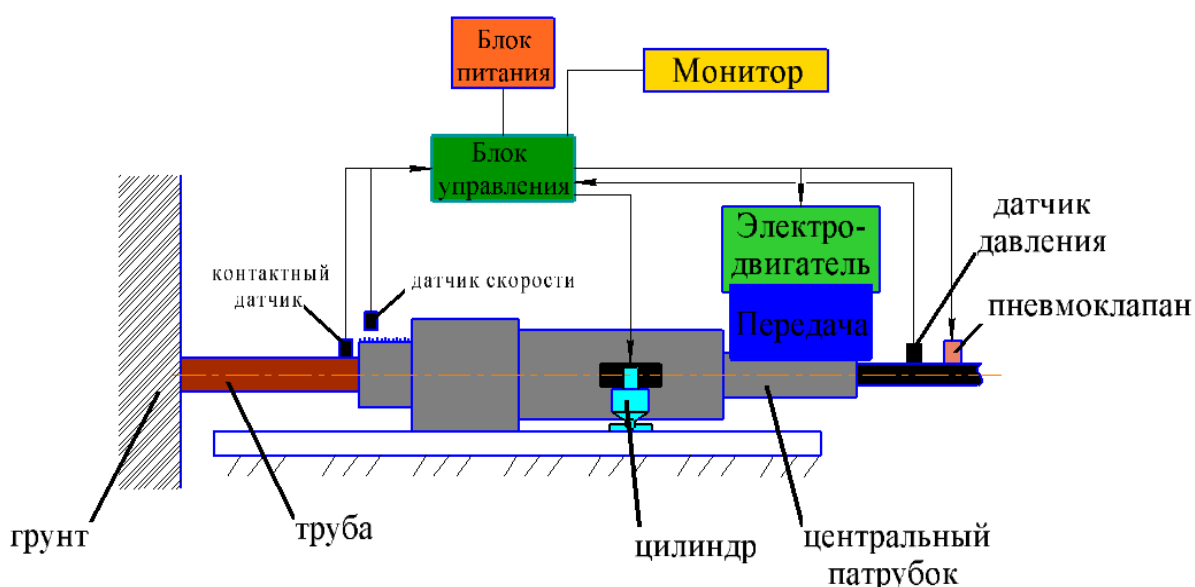


Рис. 4. Схема системы управления для адаптивной технологии проходки скважин методом забивания труб в грунт

Принцип работы системы управления заключается в следующем. Пневмударная машина осуществляет забивание трубы в грунт. Контактный датчик (датчик вибрации, тензодатчик, GPS-трекер, пьезометрический, акустический датчики, акселерометр, гироскоп) или их совокупность подают сигнал совместно с датчиком скорости на блок управления. В блоке управления происходит анализ данных согласно заданному алгоритму, заложенному в процессоре, и последующая подача управляющего сигнала на силовой цилиндр для изменения траектории погружения трубы, электродвигатель для изменения положения центрального патрубка, пневмоклапан для изменения давления энергоносителя в питающей магистрали. Если происходит отклонение трубы от проекта проходки, то GPS-трекер или гироскоп фиксирует отклонение и подает сигнал на блок управления, который в свою очередь подает сигнал на подачу давления в цилиндр.

Таким образом, происходит изменение положения машины совместно с трубой согласно заданным в блоке управления проектным параметрам. Сигналы с других контактных датчиков так же поступают в блок управления. После анализа этих данных осуществляется формирование и подача управляющего сигнала на электродвигатель для изменения энергетических характеристик ударного воздействия без потери ударной мощности или же на пневмоклапан для изменения давления энергоносителя или перекрытия магистрали и остановки машины. Скорость проходки фиксируется соответствующим датчиком. С датчика сигнал поступает на блок управления и далее на пневмоклапан при необходимости или на электродвигатель привода управления положением воздухораспределительного патрубка ударной машины. Так достигается изменение давления воздуха в магистрали и положения центрального патрубка, изменение рабочего хода ударника и, соответственно, энергетических характеристик устройства в процессе проходки. Иными словами, реализуется многофакторная система управления рабочим процессом, позволяющая в режиме реального времени обеспечить высокую эффективность всего технологического процесса. Процесс изменения параметров проходки в режиме реального времени отображается на мониторе. Питание всей системы управления осуществляется от блока питания.

Обсуждение

Анализ предложенной схемы управления показывает, что такая схема, в отличие от существующих, позволяет регулировать энергетические характеристики (энергию и частоту ударов) не только путем изменения давления энергоносителя или ограничения его расхода, но и изменением положения центрального патрубка. Такая система является более многофункциональной, поскольку позволяет минимизировать потерю ударной мощности ввиду того, что энергия и частота ударов изменяются разнонаправленно [2], уменьшить одновременно и энергию, и частоту ударов, уменьшить силу обратной отдачи, вибрацию, изменять другие технологические параметры. В совокупности с системой корректировки траектории и средствами дистанционного управления такая система является перспективной для реализации адаптивной технологии проходки скважин пневматической ударной машиной.

Заключение

Проведен анализ систем управления, предназначенных для реализации адаптивной технологии проходки горизонтальных скважин. Предложена новая схема системы управления, позволяющая изменять энергетические характеристики устройства не только путем снижения давления энергоносителя, но и за счет изменения рабочего хода ударника в процессе работы. На следующем этапе исследований будут разработаны алгоритмы работы блока управления, которые позволят реализовать процесс забивания труб в автоматическом режиме.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер государственной регистрации 121052600390-5).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 208325 РФ. Устройство ударного действия / Б. Б. Данилов, В. В. Плохих, А. А. Речкин, Д. О. Чецин // Оpubл. 14.12.2021. Бюл. № 35.
2. Плохих В.В. Разработка пневматической ударной машины с изменяемыми энергетическими характеристиками для проходки скважин: Автореф. дис... канд. техн. наук: 2.8.8. / В.В. Плохих. – Новосибирск, 2025. – 24 с.
3. Вагин А. В., Воротынцева А. С. Радиолокационный комплекс мониторинга положения буровой головки в устройстве наклонно-направленного бурения // Изв. вузов России. Радио-электроника. 2024. Т. 27, № 1. С. 90–101. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-1-90-101
4. Najafi M. Trenchless Technology Pipeline and Utility Design. Construction and Renewal. Michigan: McGraw Hill, 2005. 489 p.
5. Балаховский М. С. На Российском рынке – американская фирма «Vermeer» // Механизация строительства. 2000. № 10. С. 2–7.
6. Официальный сайт The Toro Company [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.toro.com/en>
7. Tervydis P., Jankuniene R. Horizontal directional drilling pilot bore simulation // Turkish J. of Electrical Engineering and Computer Sciences. 2017. Vol. 25, iss. 4. P. 3421–3434. doi: 10.3906/elk-1606-200
8. Cai L., Polak M. A. A theoretical solution to predict pulling forces in horizontal directional drilling installations // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019. Vol. 83. P. 313–323. doi: 10.1016/j.tust.2018.09.014
9. Meier Hoyela C., Terzuoli A. J., Wasky R. P. Determining possible receiver locations for passive radar // IEEE Proc. on Radar, Sonar and Navigation. 2005. № 3. P. 206–214. doi: 10.1049/ip-rsn:20045023
10. Плохих В.В., Чецин Д.О., Данилов Б.Б. Результаты исследования динамики рабочего цикла пневмоударного устройства с изменяемой величиной рабочего хода ударника // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2025. Т. 12. № 1 С.58-64 DOI: 10.15372/FPVGN2025120107

© В. В. Плохих, Б. Б. Данилов, Д. О. Чецин, 2026

И. М. Сердюк¹✉, С. В. Сердюков¹, Л. А. Рыбалкин¹

Лабораторная установка для моделирования воздействия на угольный пласт

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: ken04588@gmail.com

Аннотация. В статье представлена разработанная лабораторная установка для моделирования различных методов физического воздействия на угольный пласт. Созданный комплекс состоит из камеры, которая позволяет проводить исследования на керновых образцах различного размера, в камере моделируется гидростатическое давление с максимальным обжатием в 10 МПа. Разработанный комплекс позволяет проводить различные исследования по моделированию физического воздействия, управляющий программный комплекс реализован в программной среде LabView. Тестовые эксперименты показали перспективность использования разработанной установки для дальнейших исследований.

Ключевые слова: проницаемость, физическое воздействие, дегазация угольного пласта, пневмоимпульсное воздействие

I. M. Serdyuk¹✉, S. V. Serdyukov¹, L. A. Rybalki¹

Laboratory installation for modeling the impact on the coal seam

¹Institute of Mining, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: ken04588@gmail.com

Abstract. The article presents a developed laboratory setup for modeling various methods of physical impact on the coal seam. The created complex consists of a chamber that allows conducting research on core samples of various sizes, and a hydrostatic pressure with a maximum compression of 10 MPa is simulated in the chamber. The developed complex allows conducting various studies on physical impact modeling, the control software package is implemented in the LabVIEW software environment. Test experiments have shown the prospects of using the developed installation for further research.

Keywords: permeability, physical impact, coal seam degassing, pneumatic pulse effect

Введение

Различные факторы влияют на эффективность дегазации угольного пласта: горное давление, объемная плотность и сжимаемость трещин. Также на это влияют конструкции скважин и схемы разбуривания пласта, так как возникает концентрация напряжений на скважине [1, 2], которая приводит к ухудшению фильтрации газа из пласта. Для повышения интенсификации дегазации применяют различные методы физического воздействия на угольный пласт такие как, гидравлический разрыв [3, 4], криогенное воздействие [5, 6], вибрационное [7, 8], импульсное повышение давления в скважине. Однако, данные методы не всегда эффективны в одних пластах и наоборот показывают хорошие показатели в других, это связано с условиями залегания пластов, а также с различными свойствами углей.

Лабораторные исследования, которые направлены на имитацию реальных пластовых условий, использующие реальные образцы с месторождений позволяют повысить эффективность натурных экспериментов. Создание установки, которая позволяет исследовать изменения фильтрационных свойств за счет различных механических воздействий, способствует развитию новых технологий комплексных технологий повышения интенсификации дегазации угольного пласта.

Методы и материалы

Лабораторная установка включает в себя комплекс регистрации и сбора данных, управлением физическим воздействием и самой испытательной камерой. Испытательная камера позволяет проводить исследования на керновых образцах с диаметром от 30 до 50 мм и высотой от 60 до 100 мм. Максимальное рабочее давление в камере составляет 10 МПа, а поровое давление может составлять 5 МПа.

Испытательная камера состоит из герметичного корпуса, внутри которого расположены опорная плита, пресс, направляющие стойки и дренажные каналы (рис. 1)

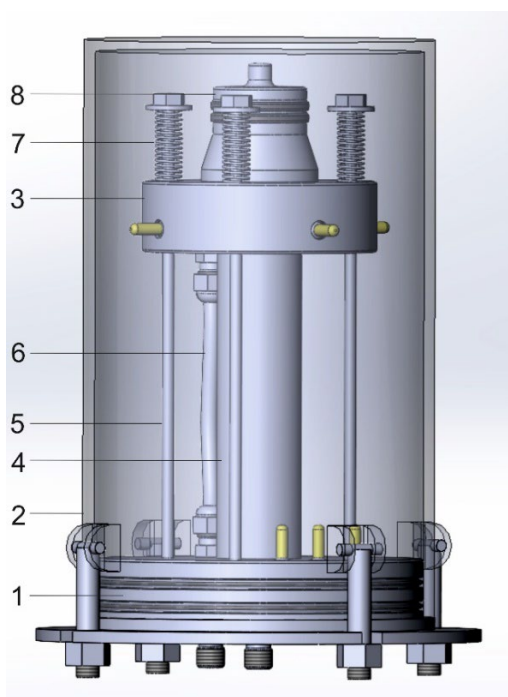


Рис. 2. Испытательная камера:

- 1 – опорная плита; 2 – корпус; 3 – пресс; 4 – изолирующая оболочка;
- 5 – направляющая стойка; 6 – дренажный канал; 7 – прижимной узел;
- 8 – ультразвуковой излучатель

Керновый образец угля помещается в изолирующую оболочку и устанавливается между опорной плитой и верхним прессом, после чего пресс стягивается пружинами и может сдвигаться по оси камеры за счет направляющих стоек,

обеспечивая вертикальное нагружение образца. Давление пресси равно давлению газа, который сдавливает боковую поверхность, тем самым получается гидростатическое нагружение керна. В нижней опорной плите предусмотрены входные каналы дренажной системы, канал ввода давления в камеру, а также гермовводы электрических линий.

Для моделирования вибрационного воздействия камера может устанавливаться на вибрационную платформу. За счет ориентации камеры (горизонтальная или вертикальная) на платформе можно задавать вектор колебаний. Также лабораторная установка позволяет проводить измерение сейсмических скоростей в образце угля в разные периоды физического воздействия на испытуемый образец, за счет установленного во внутрь камеры пьезоэлектрического излучателя. Дополнительно на герметизирующую оболочку акустические пьезоэлектрические преобразователи для оценки энергии акустического излучения (АЭ).

Управление системой сбора данных, а также управление органами физического воздействия на испытуемый образец выполняет виртуальный прибор, созданный в программной среде LabView. Основой системы сбора данных служит многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с высокой скоростью быстрого действия, что обеспечивает нормальную работу всей системы. Система оценки энергии АЭ устроена следующим образом: сигнал потупивший сигнал на АЦП конвертируется в программе, после чего рассчитывается его спектральная мощность, а затем вычисляется мощность в определенной частотной полосе, на следующем этапе обработки полученных результатов рассчитывается плотность энергии в полосе частот. Проницаемость образцов определяется в режиме нестационарной линейной фильтрации газообразного азота. Описание методики и используемых технических средств приведено в [3].

Результаты и их обсуждение

Апробация разработанной установки и аппаратно-программного комплекса проводились на керновом материале, выбуренном из крупногабаритного угля. В условиях гидростатического сжатия керна моделировали пневмоимпульсное воздействие, сжатие угля составляло от 1,5 до 7,5 МПа. Воздействие на уголь было циклическое с воздействием на образец импульсами давления, которое составляло от 20 до 70 % от сжатия образца. Было установлено, что наиболее эффективный диапазон давления импульса составляет от 60 до 70 % от сжатия образца и дает прирост проницаемости более чем в 30 раз, в то время как при малых давлениях импульса никакого эффекта практически не наблюдается. Также при проведении испытаний на установление влияния порового давления образца на изменение фильтрационных свойств было установлено, что при низком значении порового давления эффект от циклического сжатия образца может приводить к снижению проницаемости угля.

Полученные результаты по физическому воздействию на угольный образец показали перспективность разработанной лабораторной установки для тестирования и оптимизации параметров воздействия на угольный пласт.

Заключение

Разработанная лабораторная установка позволяет проводить тестирования как существующих, так и новых перспективных методов физического воздействия для повышения интенсификации дегазации угольных пластов. Установка позволяет определять оптимальные параметры воздействия вибрационными методами, циклическим нагружением угольной матрицы, импульсным повышением давления.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер госрегистрации 126021217128-9)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Huang X, Lu Y, Xia B and Luo Y (2024) Permeability evolution of fractured coal subject to confin-ing stress and true triaxial stress loading: experiment and mathematical model. *Front. Earth Sci.* 12:1395372. doi: 10.3389/feart.2024.1395372
2. Lu J, Fu X, Kang J, Cheng M and Wang Z (2021) Characterization of Full Pore and Stress Com-pression Response of Reservoirs With Different Coal Ranks. *Front. Earth Sci.* 9:764853. doi: 10.3389/feart.2021.764853.
3. Патутин А. В. и др. Устойчивость развития трещины гидроразрыва между двумя параллельными скважинами //ФТПРПИ. – 2022. – №. 2. – С. 34.
4. Сластунов С. В. и др. Гидорасчленение угольных пластов для их эффективной дегазационной подготовки через подземные скважины //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – №. 6-1. – С. 15-25.
5. Сердюков С.В., Рыбалкин Л.А., Сердюк И.М., Шилова Т.В. Влияние обработки жидким азотом на фильтрационно-емкостные свойства угля // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. -2025. -№ 5. -С. 15-27.
6. Разумов Ю. А. Обзор методов интенсификации дегазации угольных пластов // Наука, образование и культура. -2020. -№5 (49). -С. 10.-12.
7. Павленко М. В. Управление процессом метаноотдачи из низкопроницаемого угольного пласта на основе вибрационного воздействия // ГИАБ. – 2016. -№7.— С. 306 – 312.
8. Курленя М.В., Сердюков С.В. Реакция флюидов нефтепродуктивного пласта на вибросейсмическое воздействие малой интенсивности // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. -1999. -№. 2. -С. 11 -17.

© И. М. Сердюк, С. В. Сердюков, Л. А. Рыбалкин, 2026

И. М. Сердюк¹✉, Т. В. Шилова¹, Л. А. Рыбалкин¹, А. В. Азаров¹, Е. А. Пономарева¹

Исследование влияния свойств углей на параметры спектра ЯМР-релаксометрии

¹Институт физики горных процессов, г. Донецк, Российская Федерация
e-mail: ken04588@gmail.com

Аннотация. В работе представлено исследование влияния изменения свойств углей на спектры ядерно-магнитного резонанса. Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования неразрушающих методов анализа пористости и фильтрационных свойств углей, определяющих эффективность их добычи и переработки. В качестве объекта исследования использованы цилиндрические образцы угля марки ДГ, отобранные параллельно и перпендикулярно естественной слоистости. Измерения проводились на ЯМР-анализаторе с регистрацией кривых спада поперечной намагниченности и их преобразованием в T_2 -спектры распределения пор по размерам. Установлено, что наблюдаемое увеличение открытой пористости после воздействия методом георыхления связано преимущественно с изменением трещиноватости, а не с трансформацией порового пространства.

Ключевые слова: ядерный магнитный резонанс, уголь, пористость, T_2 -спектр

I. M. Serdyuk¹✉, T. V. Shilova¹, L. A. Rybalkin¹, A. V. Azarov¹, E. A. Ponomareva¹

Study of the Influence of coal properties on NMR relaxometry spectrum parameters

¹Institute of Physics of Mining Processes, Donetsk, Russian Federation
e-mail: ken04588@gmail.com

Abstract. The paper presents a study of the effect of changes in coal properties on nuclear magnetic resonance spectra. The relevance of the study is due to the need to improve non-destructive methods for analyzing the porosity and filtration properties of coal, which determine the efficiency of its extraction and processing. The study used cylindrical samples of DGH coal, which were selected parallel and perpendicular to the natural layering. The measurements were conducted using an NMR analyzer, which recorded the decay curves of transverse magnetization and converted them into T_2 spectra of pore size distribution. It has been established that the observed increase in open porosity after georoughing is mainly due to changes in fracturing rather than in pore space transformation.

Keywords: nuclear magnetic resonance, coal, porosity, T_2 spectrum

Введение

Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования методов неразрушающего контроля физико-химических и петрофизических свойств углей, которые определяют эффективность их добычи, обогащения, дегазации и термической переработки. Уголь представляет собой сложную гетерогенную систему, структурно-текстурные характеристики которой (пористость, удельная поверхность, распределение флюидов, минеральные включения) напрямую зависят от степени метаморфизма, петрографического состава и генетических условий формирования

[1, 2]. Традиционные методы исследования (ртутная порозиметрия, азотная адсорбция, электронная микроскопия) отличаются высокой точностью, но требуют длительного пробоподготовки, разрушения образцов и не позволяют оценить динамику флюидов в нативных условиях [3].

В последние десятилетия ядерный магнитный резонанс (ЯМР), в частности низкочастотная ЯМР-релаксометрия, зарекомендовал себя как эффективный инструмент для экспресс-анализа пористой среды горных пород и углей [4]. Параметры спектров релаксации (времена продольной релаксации, амплитудные распределения, форма и положение пиков) несут информацию о размерах пор, характере связи флюидов с поверхностью, содержании свободной и связанной воды, а также о взаимодействии метана с органической матрицей [5, 6]. Однако интерпретация ЯМР-данных для углей осложняется высокой вариабельностью их химического состава, наличием парамагнитных минеральных примесей и нелинейным характером релаксационных процессов в микропористой структуре [7].

Методы и материалы

Для проведения исследования были выбурены цилиндрические образцы диаметром 30 мм и высотой 60 мм из крупногабаритного угля марки ДГ. Испытуемые образцы угля были выбурены в двух направлениях: перпендикулярно естественной слоистости и вдоль напластования. Для сохранения целостности кернового материала была использована термоусадочная трубка, которая стягивала боковую поверхность. На образцах проводилось циклическое воздействие методом георыхления.

Пористость и трещиноватость угля исследовали методами ^1H ядерного магнитного резонанса (ЯМР-анализатор Micro12-040V, Niumag, Китай). Технические характеристики анализатора: индукция магнитного поля 0.28 Тл, рабочая частота 12 МГц, время между импульсами спиновых эхо 0.1 мс. В результате измерений получена релаксационная кривая спада поперечной намагниченности. Ее начальная амплитуда в полностью водонасыщенном образце пропорциональна общей пористости угля [8]. Релаксационную кривую преобразовывали в распределение амплитуд сигнала по временам поперечной релаксации (T_2 -спектр) [9]. Он связан с распределением пор по размерам [10]. В водонасыщенных породах зависит от соотношения площади поверхности и объема пор, поверхностной релаксационной активности, характеризующей влияние твердого скелета породы на скорость релаксации в прилегающей жидкости [11]:

$$\frac{1}{T_2} = \rho \frac{S_p}{V_p}$$

Размеры пор рассчитываются исходя из упрощенных моделей порового пространства в виде сферических, цилиндрических или щелевидных пор [12].

Сравнение распределения пор по размерам в начале и в конце экспериментальной серии позволяет сделать оценку влияния изменения свойств углей на изменения спектров ЯМР – релаксометрии. Различным по размерам порам соответствуют

различные времена поперечной релаксации спектров на этом основывается интерпретация T_2 – спектров: для микропор время релаксации составляет < 2 мс, для мезопор от 2 до 200 мс, а для макропор это время > 200 мс [13]. Объем микропор в углях составляет 0.2 – 0.6 см³/г при удельной поверхности 400 – 1400 м²/г, объем мезопор – 0.04 – 0.20 см³/г, а их удельная поверхность – не более 100 м²/г. Макропоры обладают наименьшей удельной поверхностью (< 2 м²/г) [14]. Поскольку метод георыхления нацелен на стимулирование фильтрации, нас интересуют изменения T_2 -спектра в области времен поперечной релаксации $T_2 > 10$ мс, что соответствует мезопорам, начиная с которых в углях возможна медленная ламинарная фильтрация газа.

Результаты и обсуждения

Повышение фильтрационных свойств тестируемого угля после воздействия способствует более полному водонасыщению порового пространства. Это проявляется в T_2 -спектрах, примеры которых для водонасыщенных кернов до и после воздействия представлены на рисунках 1 и 2. В образце, выбуренном поперек напластования, воздействие привело к видимому увеличению амплитуд в интервалах от 0,5 до 1 мс и от 500 до 2000 мс (Рис. 1). Видно, что T_2 -спектр образца, выбуренного вдоль слоистости, после обработки жидким азотом почти не изменился (Рис. 2), а значит неизменно и распределение пор по размерам. Поскольку образцы из одного угля, то характер воздействия на уровне микропор не должен существенно различаться. Наблюдаемая разница спектров образца, выбуренном поперек напластования, объясняется разной степенью его водонасыщенности до и после обработки, если амплитуды спектров образца в интервале от 0,5 да 1 мс, отвечающем за микропоры, привести к одному уровню, то и в интервале от 500 до 2000 мс спектры сблизятся. Остающаяся разница незначительна.

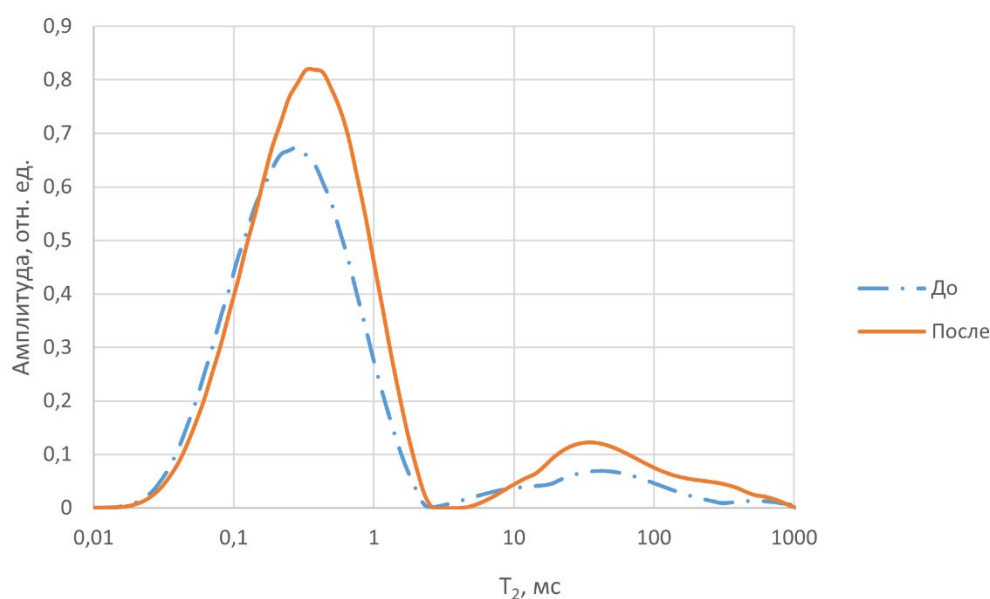


Рис. 1. Нормированные T_2 -спектры водонасыщенного образца, выбуренного поперек напластования, до и после воздействия

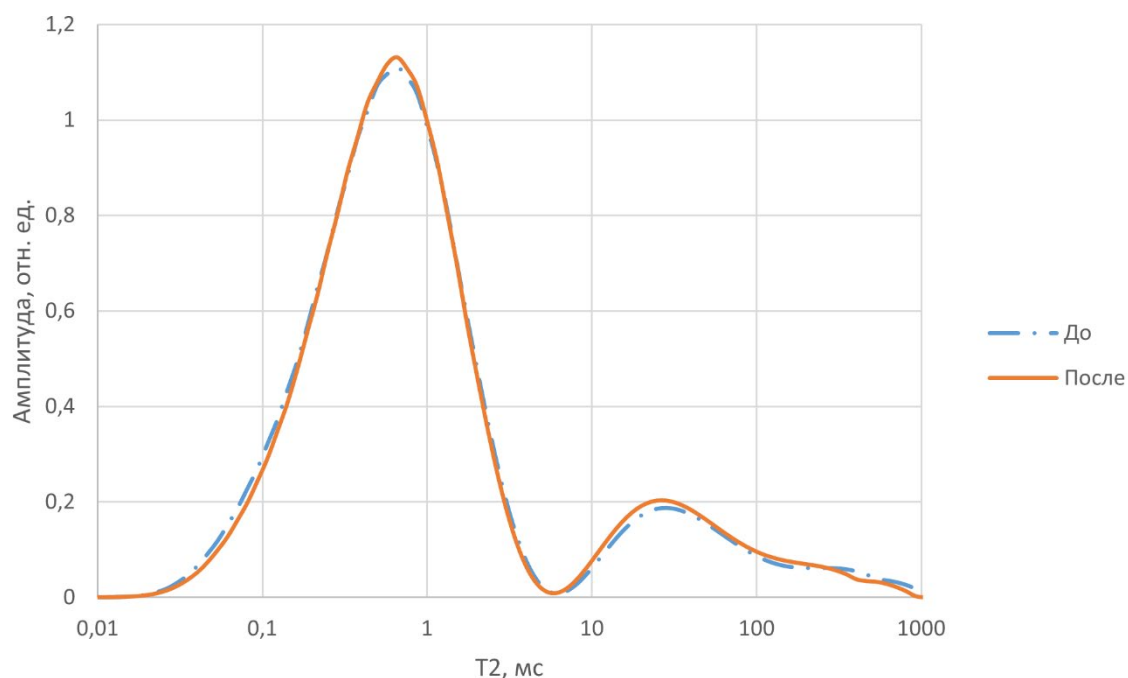


Рис. 2. Нормированные T₂-спектры водонасыщенного образца, выбуренного вдоль слоистости, до и после воздействия

Заключение

Проведенное исследование показало, что воздействие слабо влияет на распределение пор по размерам. Однако, с учетом того, что измерения проницаемость показали прирост по сравнению с начальными показателями, можно предположить о том, что изменение фильтрационных свойств углей связано с образованием новых микротрещин, что и отражается в T₂-спектрах в виде увеличения амплитуд.

Благодарности

Работа выполнена в рамках деятельности Молодежной лаборатории исследования электромагнитных свойств угля и горных пород ФГБНУ ИФГП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. DENG L. et al. NMR-based characterization of pore structure and nitrogen-water percolation in coal //Journal of China Coal Society. – 2019. – Т. 44. – №. S1. – С. 133-141.
2. Liu Z. et al. Application of nuclear magnetic resonance (NMR) in coalbed methane and shale reservoirs: A review //International Journal of Coal Geology. – 2020. – Т. 218. – С. 103261.
3. Coates, G. R., Xiao, L., Prammer, M. G. NMR Logging: Principles and Applications. Houston: Halliburton Energy Services, 1999. 234 p.
4. Шумская М. Й., Долманский Ю. К. Новые возможности метода ЯМР-релаксометрии при исследовании горных пород //Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2013. – Т. 2. – №. 2. – С. 14-17.
5. Yao Y. et al. Petrophysical characterization of coals by low-field nuclear magnetic resonance (NMR) //Fuel. – 2010. – Т. 89. – №. 7. – С. 1371-1380.
6. Silletta E. V. et al. Comparison of experimental times in T1-D and D-T2 correlation experiments in single-sided NMR //Journal of Magnetic Resonance. – 2022. – Т. 334. – С. 107112.

7. Mavridis A., D'Agostino C. NMR Relaxation in Porous Media for Environmental Applications. – 2024.
8. Carr H. Y. and Purcell E. M. Effects of diffusion on free precession in nuclear magnetic resonance experiments, Phys. Rev., 1954, Vol. 94. — P. 630 – 638.
9. Шумская М. И. Определение петрофизических параметров песчано-глинистых образцов керна и типизация пластовых флюидов методом ЯМР-релаксометрии. — Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2017. — 136 с.
10. Джафаров И. С., Сынгаевский П. Е., Хафизов С. Ф. Применение метода ядерного магнитного резонанса для характеристики состава и распределения пластовых флюидов. — М.: Химия, 2002. — 439 с.
11. Jiang M. et al. Pore-Size Distribution of Coal Characterized by NMR Relaxometry and Cryoporometry: M. Jiang et al //Transport in Porous Media. – 2026. – Т. 153. – №. 4. – С. 51.
12. Денисенко А. С. Петрофизическое обеспечение ядерно-магнитного каротажа при разведке нефтегазовых месторождений // Каротажник. – 2012. – Вып. 213. – № 3. – С. 66 – 82.
13. Jiang W., Zhou Y., Wu C., and Du M. Fractal characteristics and theirs influence on methane ad-sorption in high-rank coals with NMR, Frontiers Earth Sci., 2023, Vol. 10. — 1047557.
14. Gan H., Nandi S. P., Walker Jr P. L. Nature of the porosity in American coals //Fuel. – 1972. – Т. 51. – №. 4. – С. 272-277.

© И. М. Сердюк, Т. В. Шилова, Л. А. Рыбалкин, А. В. Азаров, Е. А. Пономарева, 2026

А. С. Сердюков¹✉, Т. В. Шилова¹, Н. Е. Бирючков¹

Исследование сезонного промерзания грунтов методом поверхностных сейсмических волн

¹Институт горного дела им. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: aleksanderserdyukov@yandex.ru

Аннотация. В статье экспериментально апробирован метод поверхностных волн для выявления участков сезонного промерзания грунтов. Сезонное промерзание осложняет ведение горных работ: снижает устойчивость бортов карьеров и откосов отвалов, деформирует транспортные пути (морозное пучение), затрудняет буровзрывные работы и нарушает работу дренажных систем. Исследования проведены на модельном объекте с контролируемыми условиями: была сформирована яма, заполненная супесью, подверженной промерзанию и морозному пучению. Сейсморазведочные наблюдения позволили выявить зону промерзания в массиве грунта. Результаты подтверждают перспективность метода поверхностных волн для мониторинга сезонного промерзания при планировании и ведении горных работ, что способствует снижению рисков и повышению безопасности эксплуатации инженерных и транспортных объектов в зимний период.

Ключевые слова: сезонное промерзание, инженерная сейсморазведка, метод поверхностных волн

A. S. Serdyukov¹✉, T. V. Shilova¹, N. E. Biruchkov¹

Study of seasonal soil freezing using surface seismic waves

¹Chinakal Institute of Mining, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: aleksanderserdyukov@yandex.ru

Abstract. This article experimentally tests a surface wave method for identifying areas of seasonal soil freezing. Seasonal freezing complicates mining operations: it reduces the stability of quarry walls and waste heap slopes, deforms transport routes (frost heave), impedes drilling and blasting operations, and disrupts drainage systems. Accurately determining the boundaries of the frozen layer is essential for safe and efficient deposit development. The study was conducted on a model site under controlled conditions: a pit filled with sandy loam susceptible to freezing and frost heaving was dug. Seismic observations revealed freezing in the soil mass. The results confirm the potential of the surface wave method for monitoring seasonal freezing during mining planning and execution, which helps reduce risks and improve the safety of utility and transport facilities during the winter.

Keywords: seasonal permafrost, engineering seismic exploration, MASW

Введение

Сезонное промерзание грунтов – широко распространённое природное явление на значительной части территории России, существенно влияющее на устойчивость сооружений и технологические процессы в горном деле. В криолитозоне промерзание и морозное пучение провоцируют деформации бортов карьеров, откосов отвалов и инфраструктуры, повышая риски аварий [1,2]. Традиционные методы оценки

промерзания, такие как буровые работы и термометрия, отличаются высокой трудоёмкостью и не позволяют оперативно отслеживать динамику изменений на больших площадях, из-за чего возрастает потребность в дистанционных геофизических методах, в том числе методе поверхностных волн (MASW) [3]. Для обработки данных сейсморазведки в работе использовано частотно-временное S-преобразование сейсмических записей [4,5]. Этот метод обеспечивает высокое разрешение при анализе нестационарных сигналов и в совокупности с методом главных компонент позволяет нам выделять полезные волны на фоне помех и точно определять изменения свойств грунта, связанные с промерзанием. Драгой важной задачей, решенной нами, являлась разработка и апробация собственной регистрирующей аппаратуры: наш регистратор существенно дешевле серийных аналогов и при этом обладает широкими возможностями настройки – в частности, позволяет регулировать параметры усиления и режимы записи под конкретные условия измерений. Для экспериментальной апробации методики и аппаратуры нами был создан модельный объект: яма с контролируемыми условиями промерзания, заполненная супесью, склонной к морозному пучению. Проведенные эксперименты демонстрируют возможность надёжного выявления зоны промерзания в толще грунта. Таким образом, полученные результаты подтверждают перспективность метода поверхностных волн для мониторинга сезонного промерзания при планировании и ведении горных работ, что способствует снижению рисков и повышению безопасности эксплуатации инженерных и транспортных объектов в зимний период.

Методика и аппаратура

Методика обработки сейсмических данных поверхностных волн основана на применении частотно-временного S-преобразования:

$$S[h(t)](\tau, f, \sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|f|}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(\tau-t)f^2}{2\sigma^2}} h(t) e^{-i2\pi ft} dt$$

Модель поверхностно-волнового пакета в рассматриваемой области выражается в виде формулы:

$$q(x, \tau, f) = Q(f, \tau - x / u(f)) P(f, x)$$

Задача фильтрации сводится к поиску функций таких функций u , P и Q чтобы минимизировать невязку между моделью и наблюдаемым частотно-временным представлением данных

$$\sum_{n=1}^N \int_0^T [g(x_n, \tau, f) - q(x_n, \tau, f)]^2 d\tau \rightarrow \min$$

Эта минимизация проводится с применением метода главных компонент и перебора всевозможных значений групповой скорости u . Для осуществления экспериментов в Лаборатории физических методов воздействия на массив

горных пород ИГД СО РАН была разработана регистрирующая аппаратура, представленная на схеме приведенной на рис.1.

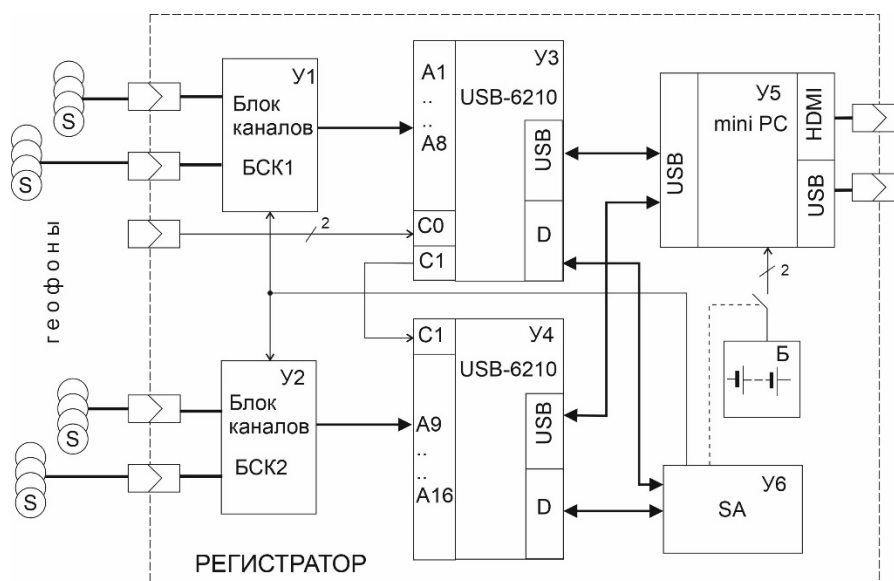


Рис. 1. Схема регистратора

В состав станции входят мини компьютер на базе процессора N100 с предустановленным пакетом программ LabView, два многофункциональных устройства сбора данных USB-6210 (National Instruments, США), аккумуляторный блок питания, корпус, оснащенный переключателями и электрическими разъемами. Основные параметры регистратора: число каналов – 16 (дифференциальные); разрядность аналого-цифрового преобразователя – 16 бит; диапазон амплитуд регистрируемых сигналов – регулируемый: 2 мВ, 10 мВ, 50 мВ, 100 мВ, 200 мВ, 1 В, 5 В, 10В; частота дискретизации (максимальная) – 25 кГц (шаг дискретизации 40 мкс); потребляемая мощность 12 Вт; автономность – 16 час (32 час при двойной батарее); Большой набор диапазонов амплитуды входных сигналов компенсирует относительно низкую разрядность АЦП и позволяет подстраивать регистратор под конкретные условия приема сейсмических сигналов, генерируемых виброисточником. Предусмотрен контроль превышения допустимого уровня с включением, при необходимости, режима автоматического регулирования чувствительности приемных каналов. Предусмотрена возможность подключения внешнего монитора для визуализации регистрируемых сейсмограмм.

Эксперимент и его результаты

Был подготовлен участок с целью проведения натурных испытаний для изучения сезонных изменений свойств пучинистого грунта. Подготовка участка включала:

- формирование ямы размерами около 1,9 х 1,7 х 5 м (глубина х ширина х длина), дно которой покрывали гидроизоляционной пленкой;

– заполнение пучинистым грунтом, уплотнение породы. Для создания опытно-полевого участка по результатам лабораторных экспериментов были выбраны песчанистые супеси как наиболее подходящие, доступные, характерные для местности исследования грунты;

– подготовку сейсмической аппаратуры и измерительной полевой станции

Система наблюдения представляет собой 15 сейсмических датчиков – геофонов GS-one с собственной частотой 5 Гц. Источники расставлялись вдоль линии, пересекающую яму с супесью в поперечном направлении (см. рис.2)

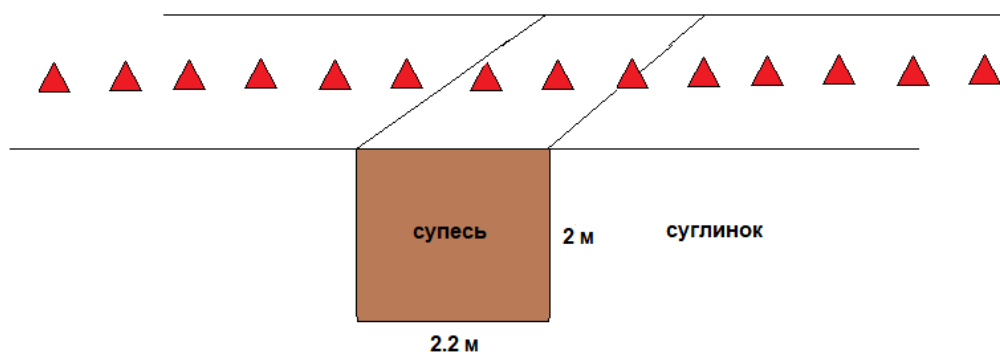


Рис. 2. Схема натурного эксперимента

Полученные сейсмические данные (сейсмограммы) представлены на рис. 3а. Результат после применения алгоритма фильтрации показан на рис 3.б. Дальнейшая обработка данных заключалась в исследовании частотно-временных представлений (псевдосейсмограмм полученных при помощи S-преобразования) на различной частоте. На достаточно высоких частотах (см. рис.4.) хорошо прослеживается аномалия распределения спектральных амплитуд в области ямы с супесью, что позволяет выделить данную аномалию на практике.

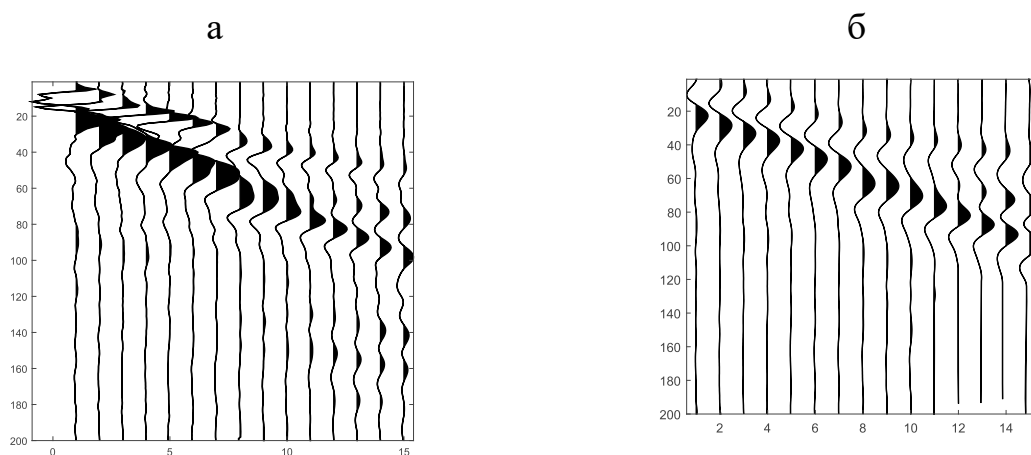


Рис. 3. Исходные данные (а) и после применения фильтрации (б)

Заключение

Проведенные эксперименты демонстрируют возможность надёжного выявления зоны промерзания в толще грунта. Таким образом, полученные результаты подтверждают перспективность метода поверхностных волн для мониторинга сезонного промерзания при планировании и ведении горных работ, что способствует снижению рисков и повышению безопасности эксплуатации инженерных и транспортных объектов в зимний период.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-20055, <https://rscf.ru/project/25-27-20055/> и финансовой поддержки Правительства Новосибирской области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Ершов Э. Д. Общая геокриология. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 682 с.
2. Трофимов В. Т., Бадю Ю. Б., Дубиков Г. И. Криогенное строение и льдистость многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты. – М.: Наука, 1983. – 245 с.
3. Park C. B., Miller R. D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves // *Geophysics*. – 1999. – Vol. 64, No. 3. – P. 800–808.
4. Castellanos A., Santamarina J. C. Time-frequency analysis of surface waves: enhancing dispersion curve extraction // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2005. – Vol. 10, No. 2. – P. 137–146.
5. Serdyukov A. S., Yablokov A. V., Duchkov A. A., Azarov A. A., Baranov V. D. Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data // *Geophysics*. – 2019. – Vol. 84, No. 1. – P. A19–A24.

© А. С. Сердюков, Т. В. Шилова, Н. Е. Сердюков, 2026

И. В. Тищенко^{1✉}, В. В. Червов¹

Универсальный грунтопроходческий комплекс

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: ighor.tishchienko.70@mail.ru

Аннотация. В статье дано краткое описание способов проходки скважин в грунтовом массиве с использованием пневматических машин ударного действия. Проанализированы сферы их применения с указанием ограничений и недостатков. Показаны специфические особенности технологий проходки скважин как с полным уплотнением грунта, так и с его разработкой и последующим частичным извлечением. На основе этого предложено объединить их реализацию в едином универсальном грунтопроходческом комплексе, имеющем в своем составе пневмоударный привод, набор рабочих органов и силовой тяговый механизм двустороннего действия. Такая комплектация позволяет получать скважины диаметром 159 – 530 мм, с требуемой ориентацией по проектной трассе перехода.

Ключевые слова: тяговый орган, грунтопроходчик, скважина, усилие подачи, коррекция траектории, грунтовый керн, пневмопривод

I. V. Tishchenko^{1✉}, V. V. Chervov¹

Universal ground-penetrating complex

¹Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia
e-mail: ighor.tishchienko.70@mail.ru

Annotation. The article provides a brief description of the methods of drilling wells in the ground using pneumatic impact machines. The fields of their application are analyzed, indicating the limitations and disadvantages. The specific features of well drilling technologies are shown, both with complete soil compaction and with its development and subsequent partial extraction. Based on this, it is proposed to combine their implementation in a single universal ground-penetrating complex, which includes a pneumatic shock drive, a set of working bodies and a two-way traction mechanism. This configuration makes it possible to obtain wells with a diameter of 159-530 mm, with the required orientation along the design transition route.

Keywords: traction equipment, tunneling machine, hole, force of the power draft unit, trajectory correction, soil core, air-powered drive

Бестраншейная прокладка подземных коммуникаций нашла широкое распространение в гражданском и промышленном строительстве [1]. Этому способствовало широкое развитие современных мегаполисов и целых агломераций со сложной транспортной инфраструктурой. В этих условиях сооружение технологических каналов в грунтовом массиве закрытым методом зачастую является безальтернативным. Кроме того, такое ведение работ позволяет снизить их себестоимость за счет уменьшения затрат на последующее восстановление природного ландшафта и рекультивацию территорий.

Свойство грунтового массива сжиматься позволило реализовать способ проходки с перемещением вытесняемого объема грунта и его уплотнением в поперечной от оси скважины плоскости. Для этого используется разнообразная номенклатура технических средств, в том числе и созданные в Институте горного дела СО РАН самодвижущиеся механизмы - пневмопробойники [2]. Их принцип действия основан на преобразовании потенциальной энергии сжатого воздуха в механическую работу возвратно-поступательного движения ударника, периодически наносящего удары по корпусу, являющемуся формователем скважины.

Таблица 1. Технические характеристики пневмопробойников.

Параметры пневмопробойника	СО144	ИП4605	ИП4603	СО134
Диаметр проходки (без расширителя), мм	70	95	130	150
Энергия удара, Дж	65	80	220	500
Частота ударов, Гц	5,5	5,4	6,2	4,2
Давление сжатого воздуха, МПа	0,6	0,6	0,6	0,6
Скорость проходки, м/ч	5,5 - 55	1 - 50	1 - 40	5 - 55
Длина, мм	1350	1500	1550	1720
Диаметр, мм	70	95	130	152
Масса, кг	28	50	100	150

Среди основных недостатков таких устройств и способа в целом можно выделить ограничения по размеру сечения образуемых каналов и отсутствие возможностей по повышению точности проходки. Результаты испытаний на полигоне и в реальных производственных условиях позволили рекомендовать ограничить предельный диаметр скважин на уровне 325 мм [3].

Для образования каналов большего сечения необходимо осуществлять разработку грунта в забойной зоне и его извлечение в один из рабочих приемков [4]. Это позволяет снизить энергоемкость проходки и уменьшить зону деформации прилегающего к скважине массива, что немаловажно в условиях его насыщения различными коммуникациями. Реализация такого подхода может быть осуществлена и с использованием пневмоударной техники [5, 6].

Представленная на рис. 1 проходческая установка непрерывного действия состоит из базовой машины – пневмопробойника 1, на носовой части которого смонтирован формователь скважины. Его конструкция включает центральную втулку 2 с продольными ребрами 3, на которых закреплены конусный рабочий орган 4 и цилиндрическая обечайка 5. Кольцевые ножи 6 разрезают поступающий внутрь грунт на отдельные стружки, что облегчает их дальнейшее удаление через переднее сопло 7. Задний фланец 8 с предохранительным клапаном 9 создают внутреннюю герметичную полость, в которую подается сжатый воздух от компрессорной установки. Его поток подхватывает и вытесняет разработанный

грунт, поступающий в пройденный ранее пионерный канал, по которому он впоследствии доставляется в выходной приямок. Таким образом формируется технологическая скважина 11.

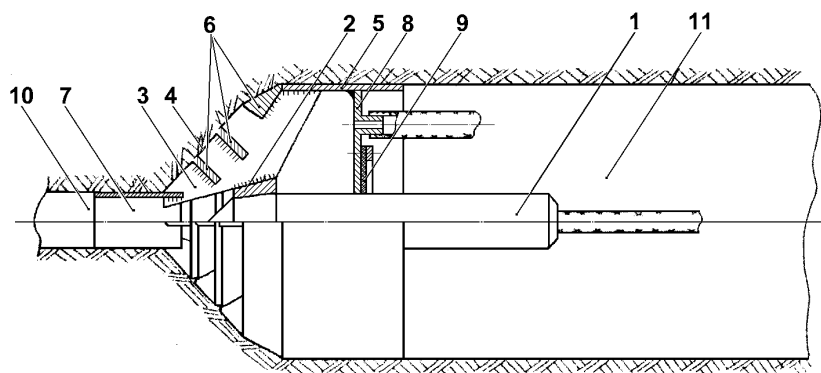


Рис. 1. Грунтопроходчик с пневмотранспортированием грунта:

- 1 – пневмопробойник; 2 – втулка; 3 – ребро; 4 – рабочий орган; 5 – обечайка;
6 – кольцевые ножи; 7 – сопло; 8 – фланец; 9 – предохранительный клапан;
10 – пионерный канал; 11 – скважина

Такие устройства не получили широкого практического применения ввиду наличия комплекса недостатков. Так недостаточная функциональная надежность системы пневмотранспортирования приводит к частому зависанию грунта в пионерном канале с образованием грунтовой пробки, что создает аварийную ситуацию. Кроме того часто наблюдается чрезмерное зарезание формователя в боковую поверхность забоя, сопровождающееся уводом грунтопроходчика от проектной трассы перехода.

Для компенсации отмеченных выше недостатков предложен способ проходки с частичным уплотнением и экскавацией грунта и разделением технологического цикла на последовательные операции, выполняемые отдельными механизмами, входящими в комплект оборудования [7] (табл. 2).

Таблица 2. Циклическая проходка скважины.

№	Схема операции	Комментарий
1		Прокладка подающей гибкой связи 4 в пионерную скважину 3 из входного приямка 1 в выходной приямок 2
2		Образование нового связующего канала при отклонении пионерной скважины от трассы перехода

№	Схема операции	Комментарий
3		Доставка до забоя грунторазрабатывающего устройства 8 основным тяговым органом 5 и подающей гибкой связью 4
4		Перемещение забоя грунторазрабатывающим устройством 8 при постоянном усилии подачи основного тягового органа 5
5		Извлечение грунторазрабатывающего устройства 8 с грунтом из скважины 9 дополнительным тяговым органом 6 и возвращающей гибкой связью 7

Его основной отличительной особенностью является наличие гибких связей между грунторазрабатывающим устройством, разрабатывающим забой и силовыми тяговыми органами, осуществляющими его доставку и извлечение. Такой подход позволяет управлять траекторией движения проходчика, ориентируя ее по направлению приложения вектора тягового усилия и в случае необходимости осуществлять коррекцию оси проходки в соответствии с проектной трассой перехода.

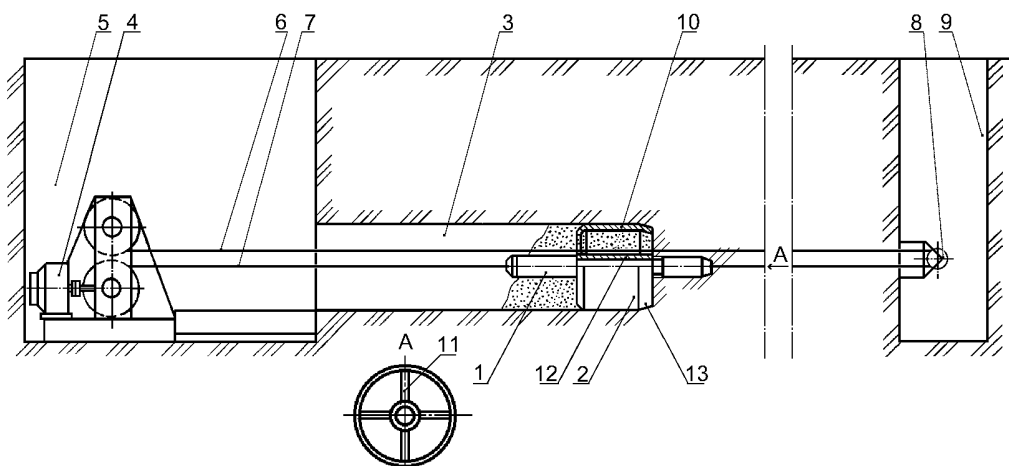


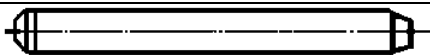
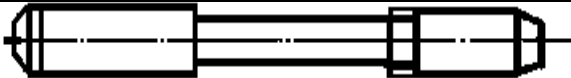
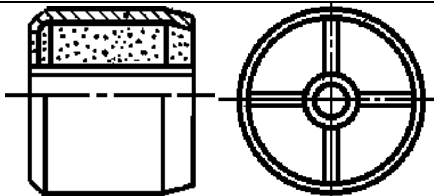
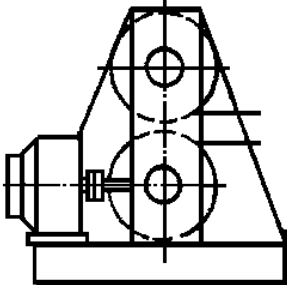
Рис. 2. Схема проходческой установки циклического действия:

1 – пневмоударный механизм; 2 – рабочий орган; 3 – скважина; 4 – тяговое устройство; 5 – рабочий котлован; 6 – подающий канат; 7 – извлекающий канат; 8 – обводной блок; 9 – выходной прямик; 10 – обечайка; 11 – ребро; 12 – втулка; 13 – уплотняющий конус

Предложенная идея реализована в конструкции проходческой установки циклического действия (рис. 2). Грунтопроходчик, состоящий из пневмоударного механизма 1 с перепускным рабочим органом 2 доставляется в скважину 3 объединенным силовым тяговым органом 4, установленным в рабочем котловане 5. Его исполнение выполнено в единой компактной двухбарабанной конструкции с подающим 6 и извлекающим 7 канатами и пневматическим приводом. Такой тяговый орган позволяет осуществлять как транспортирование грунтопроходчика, так статическое силовое воздействие на забой, что повышает эффективность его разработки. Для запасовки подающего каната предназначен обводной блок 8, смонтированный в выходном приямке 9.

Для расширения функциональных возможностей и повышения конкурентоспособности оборудования для сооружения подземных каналов с использованием пневмоударной техники целесообразно объединить возможности двух способов проходки как с полным, так и с частичным уплотнением и экскавацией грунта в едином универсальном грунтопроходческом комплексе. Его составные структурные элементы представлены в табл. 3.

Таблица 3. Состав грунтопроходческого комплекса

Схема элемента	Комментарий
	Пневмопробойник СО 144 для образования пионерного канала
	Привод грунтопроходчика на базе пневмопробойника ИП 4603 с измененным корпусом
	Перепускной рабочий орган диаметром 377, 426, 530 мм
	Двухбарабанная тяговая лебедка с усилием 32 кН

Проведенные исследования как на моделях, так и на натурных образцах устройств показали, что для эффективного воздействия на забой и надежного извлечения грунтопроходчика с набранным грунтом из скважины тяговый механизм должен обладать усилием, равным 32 кН [8, 9]. Кроме того, при проходке каналов в грунтовом массиве с полным уплотнением приложение дополнительной статической силы, ориентированной по направлению способствует повышению точности проходки.

Выводы

На основе анализа способов проходки скважин в грунтовом массиве с использованием пневмоударной техники обоснована концепция создания универсального грунтопроходческого комплекса. В его основе заложена возможность образования подземных технологических каналов как с полным уплотнением грунта, так и с частичным его извлечением, что позволяет значительно расширить возможности реализуемых технологий. Представленный комплект оборудования, входящего в грунтопроходческий комплекс, позволяет производить работы с использованием широкого набора рабочих органов диаметром от 159 до 530 мм. Наличие силового тягового устройства с гибкими канатными связями управляет траекторией движения грунтопроходчика, ориентируя его по трассе перехода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рыбаков А. П. Основы бестраншейных технологий (теория и практика) / А. П. Рыбаков. – М.: ПрессБюро, 2005. – 304 с.
2. Гурков К. С. Пневмопробойники / К. С. Гурков, В. В. Климашко, А. Д. Костылев и др. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1990. – 215 с.
3. Костылев А. Д. Пневмопробойники в строительном производстве / А. Д. Костылев, В. А. Григорашенко, В. А. Козлов, В. П. Гилета, Ю. Б. Рейфисов. – Новосибирск: Наука, 1987. – 142 с.
4. Кюн Г. Закрытая пркладка непроходных трубопроводов / Г. Кюн, Л. Шойбле, Х. Шлик. – М.: Стройиздат, 1993. – 168 с.
5. Ткач Х. Б. Исследование способа и устройства для пробивания скважин с частичным удалением грунта: дис. ...канд. техн. наук / Х. Б. Ткач. – Новосибирск, 1973. – 241 с.
6. Ткач Х. Б. Технология и механизация расширения скважин с частичным удалением грунта. – Ярославль: Изд-во Института ОМТПС Минстроя СССР, 1976. – 2 с.
7. Пат. 2181816 Российская Федерация. Способ образования скважин в грунте и пневмоударное устройство для его осуществления / Гилета В. П., Смоляницкий Б. Н., Леонов И. П., Тищенко И. В.; опубл. 8. 08. 2002., Бюл. № 12 – 8 с.
8. Воронцов Д. С. Обоснование принципиальной схемы и конструктивных параметров грунтопроходчика: дис. ...канд. техн. наук / Д. С. Воронцов. – Новосибирск, 2005. – 123 с.
9. Тищенко И. В. Создание оборудования для проходки скважин с частичным уплотнением и экскавацией грунта: дис. ...канд. техн. наук / И. В. Тищенко. – Новосибирск, 2006. – 124 с.

© И. В. Тищенко, В. В. Червов, 2026

Ю. П. Харламов^{1✉}, А. А. Абдуллин¹, Д. О. Чещин¹

Стенд для экспериментальной проверки расчета параметров шламо-воздушной смеси во вращающемся горизонтальном трубопроводе

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: harlamov.igd@mail.ru

Аннотация: В статье рассмотрены особенности транспортирования шламо-воздушной смеси при RC-бурении горизонтальных и наклонных скважин с обратной циркуляцией очистного агента. Проведен анализ факторов, влияющих на устойчивость движения частиц разрушенной породы во вращающемся горизонтальном трубопроводе, имитирующем центральный шламотранспортный канал двойной буровой колонны. Представлены расчетные зависимости для определения параметров пневмотранспортной системы. Описана конструкция экспериментального стенда, разработанного для проверки расчетных данных в условиях, приближенных к реальному процессу бурения. Приведена методика проведения экспериментов с использованием видеорегистрации движения окрашенных частиц шлама в прозрачном вращающемся трубопроводе. Обоснована необходимость экспериментального определения скорости движения частиц и ее сопоставления с расчетными значениями для подтверждения адекватности математической модели пневмотранспортирования. Установлено, что превышение скорости транспортирования частиц над скоростью образования шлама является одним из основных условий предотвращения зашламовывания канала и обеспечения надежной работы системы очистки скважины. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и оптимизации режимов работы пневмоударных комплексов для бурения горизонтальных и наклонных скважин в сложных горно-геологических условиях.

Ключевые слова: RC-бурение, бурение с обратной циркуляцией, пневмотранспорт, шламо-воздушная смесь, шламотранспортный канал, горизонтальная скважина, двойная буровая колонна, пневмоударник, скорость транспортирования частиц, вращающийся трубопровод, параметры пневмотранспортной системы

Yu. P. Harlamov^{1✉}, A. A. Abdullin¹, D. O. Cheshchin¹

Test bench for experimental verification of calculations of parameters of a sludge-air mixture in a rotating horizontal pipeline

¹N. A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: harlamov.igd@mail.ru

Abstract: The article examines the specific features of transporting a sludge-air mixture during RC drilling of horizontal and inclined wells with reverse circulation of the cleaning agent. An analysis is performed of the factors affecting the stability of broken rock particle movement in a rotating horizontal pipeline that simulates the central sludge-transport channel of a dual drill string. Calculation dependencies for determining the parameters of a pneumatic transport system are presented. The design of an experimental test bench is described; it was developed to verify the calculated data under conditions close to the actual drilling process. A methodology for conducting experiments is provided, involving video recording of the movement of coloured sludge particles in a transparent

rotating pipeline. The necessity of experimentally determining the particle movement speed and comparing it with calculated values is justified — this is required to confirm the adequacy of the mathematical model of pneumatic transportation. It has been established that exceeding the particle transportation speed over the sludge generation speed is one of the key conditions for preventing channel clogging and ensuring reliable operation of the well cleaning system. The obtained results can be used in designing and optimising the operating modes of pneumatic percussion drilling systems for drilling horizontal and inclined wells in complex mining and geological conditions.

Keywords: RC drilling, reverse circulation drilling, pneumatic transport, sludge-air mixture, sludge transport channel, horizontal well, dual drill string, down-the-hole hammer, particle transportation speed, rotating pipeline parameters of the pneumatic transport system

Введение

Освоение месторождений в арктических регионах сопровождается рядом специфических факторов: наличие многолетнемёрзлых пород, низкие температуры, сложная логистика и экологические ограничения. В этих условиях традиционные методы бурения (колонковое, шнековое) часто оказываются недостаточно эффективными. Одним из перспективных решений является технология RC-бурения (Reverse Circulation) [1-3], основанная на использовании двойной бурильной колонны и пневмоударника (рис.1).

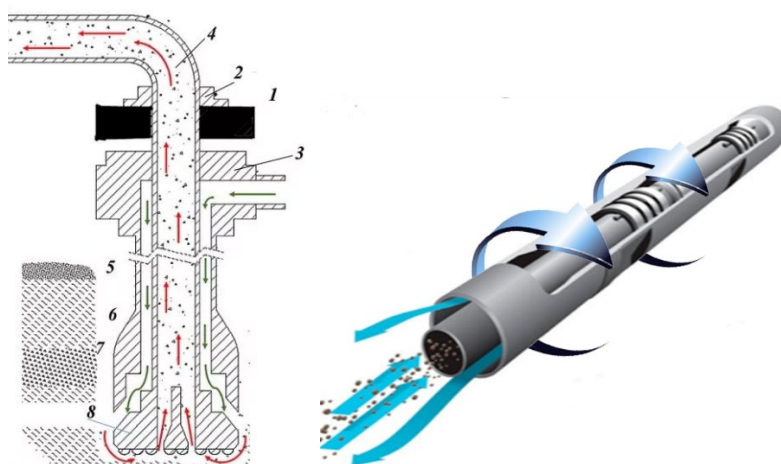


Рис. 1. Схема бурения с обратной циркуляцией очистного агента и схема движения воздушного потока в двойной буровой колонне [3]

1 – вращатель; 2 – дефлектор линии сброса; 3 – нагнетательный сальник; 4 – шламоводная линия; 5 – внутренняя бурильная труба; 6 – наружная бурильная труба; 7 – кольцевой пневмоударник; 8 – долото.

Одним из ключевых преимуществ этой технологии является минимальная потребность в воде. В условиях Арктики это критично, поскольку водоисточники могут быть замёрзшими, а транспортировка воды экономически нецелесообразна. К тому же экологические требования могут ограничивать использование буровых растворов. А применение только сжатого воздуха в RC-бурении исключает данные проблемы.

Его особенность заключается в том, что отработанный материал с забоя посредством энергоносителя (сжатого воздуха) поступает в центральный канал (осевой шламопровод), предусмотренный как в пневмоударнике, так и в буровых штангах. Обеспечение благоприятных условий для транспортирования продуктов бурения достигается за счет конструкции бурового инструмента, подразумевающей наличие гладкого шламопровода постоянного сечения (рис.1) [4-6].

Проблема транспортирования частиц

Бурение горизонтальных и наклонных скважин является еще одним перспективным направлением применения данного метода [7]. При проходке горизонтальной скважины классическим методом (с выносом шлама через затрубное пространство) длина бурения ограничена. Вызвано это тем, что в процессе выноса шлама воздушным потоком из горизонтальной скважины вектор силы тяжести направлен перпендикулярно к направлению движения транспортирующего потока (рис.2 а).

Таким образом в процессе транспортирования происходит оседание частиц шлама на дно скважины, из-за чего часть отработанной породы выносятся наружу, а некоторая часть подвергается многократному переизмельчению и вдавливаю в стенки скважины. Из осевших на дно скважины частиц образуется подстилающий слой различной толщины по длине канала. В процессе бурения этот слой может стабилизироваться и образовать пробку, закупоривающую шламотранспортную магистраль, что приводит к аварийной ситуации и остановке проведения работ (Рис. 2 б).

Бурение с обратной циркуляцией очистного агента позволяет увеличить диапазон технических возможностей пневмоударного бурения горизонтальных и наклонных скважин, повышая эффективность процесса бурения, а также дальность их транспортирования воздушным потоком. Это обусловлено сущностью движения породных частиц во вращающейся пневмотранспортной системе.

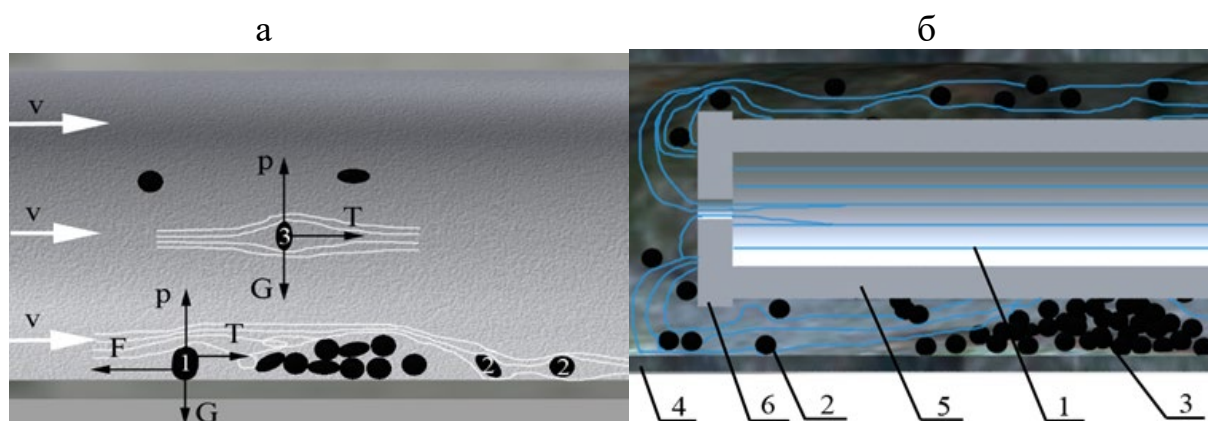


Рис. 2. Схема движения потока воздуха и частиц шлама при бурении пневмоударником:

- 1 – поток воздуха; 2 – частица шлама; 3 – осевшие частицы; 4 – скважина;
5 – буровая колонна; 6 – буровая коронка

При вращении шламопровода частицы породы находятся во взвешенном состоянии или соскальзывают со стенок трубы, благодаря чему могут транспортироваться при существенно меньшей скорости воздушного потока (рис.3) [8]. Такой характер движения частиц затрудняет образование подстилающего слоя из неподвижных фрагментов породы на дне трубопровода. Вследствие чего существенно повышается надежность транспортирования.

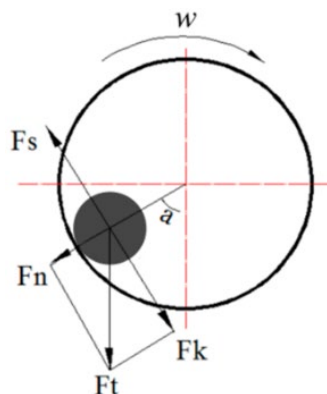


Рис. 3. Схема действия сил на частицу во вращающемся трубопроводе:
 F_s – сила трения; F_t – сила тяжести; F_n – сила нормального давления;
 F_k – касательная составляющая силы тяжести; w – скорость вращения трубопровода; α – угол поворота трубы.

Вращающийся шламопровод – это техническое решение, которое является значительным фактором обеспечивающим эффективную работу шламотранспортной системы, однако не единственным. В этой связи актуальной становится определение и других факторов, обеспечивающих надежное и эффективное транспортирование разрушенной породы по горизонтальному трубопроводу. Факторы, влияющие на эффективность транспортирования разрушенной породы определяются расчетным путем. Для решения этой задачи произведен расчет пневмотранспортной установки на основе методик, разработанных сотрудниками Томского политехнического университета и Оренбургского государственного университета [9, 10].

Расчет параметров центральной шламо-транспортной магистрали

Исходными данными для выполнения расчета являются следующие параметры: диаметр буримой скважины D_c , м; радиус центрального канала r , м; плотность разрабатываемой породы ρ , кг/м³; средний расход воздуха системы V_v , м³/ч. На основании этих величин определяются параметры пневмотранспортной системы:

1. Теоретическая скорость потока воздуха в центральном канале:

$$v = Q_v / A_{сеч}, \quad (1.1)$$

где: Q_v – расход воздуха,

$A_{\text{сеч}}$ – площадь поперечного сечения центрального канала:

$$A_{\text{сеч}} = \pi \cdot r^2 \quad (1.2)$$

где r – радиус центрального канала, м.

2. Техническая производительность бурения:

$$Q_m = V_m \cdot \rho_m, \quad (1.3)$$

где: V_m – производительность бурения, м³/ч;

ρ_m – плотность разрабатываемой породы, кг/м³.

$$V_m = 3600 \cdot \pi \cdot D_c^2 \cdot \vartheta / 4, \quad (1.4)$$

где D_c – диаметр скважины, м;

ϑ – скорость потока воздуха в центральном канале, м/с (см. формула 1.1).

3. Секундный расход воздуха:

$$Q_v = V_v \cdot \rho_v, \quad (1.5)$$

где V_v – средний расход воздуха системы м³/ч;

ρ_v – плотность воздуха, кг/м³, принято $\rho_v = 1,2$ кг/м³.

4. Весовая концентрация смеси:

$$\mu = Q_m / Q_v, \quad (1.6)$$

где Q_m – техническая производительность бурения (см. формула 1.3);

Q_v – секундный расход воздуха (см. формула 1.5).

5. Объемная доля твердой фазы определим из выражения:

$$\beta = 1 / (1 + \rho / \mu \cdot \rho_v) \quad (1.7)$$

где: μ – весовая концентрация смеси, кг/кг (см. формула 1.6);

ρ – плотность разрабатываемой породы, кг/м³;

ρ_v – плотность воздуха, кг/м³.

Также расчетным путем определяется скорость воздуха, необходимая для обеспечения бесперебойной работы пневмотранспортной магистрали. Ее расчет ведется следующим образом:

$$v_v = Re \frac{v}{d} \quad (1.8)$$

$$Re = Ar \cdot (1 - \beta)^{4.75} / (18 + 0.61 \sqrt{Ar (1 - \beta)^{4.75}}) \quad (1.9)$$

$$Ar = d^3 g (\rho - \rho_v) \quad (1.10)$$

$$v = \frac{\mu^*}{\rho_v} \quad (1.11)$$

где: v_v – скорость витания частицы в вертикальном участке трубопровода, м/с;
 ν – кинематическая вязкость газа при температуре транспортирования, м²/с;
 μ^* – динамическая вязкость газа при температуре транспортирования, кг/м с;
 d – эквивалентный диаметр частиц, м;
 Ar, Re – критерии Архимеда и Рейнольдса;
 β – объёмная доля твёрдой фазы;
 g – ускорение силы тяжести; м/с²;
 ρ_v – плотность газа при температуре транспортирования, кг/м³ (для воздуха $\rho = 1,2$ кг/м³).

Разработка стенда для проведения эксперимента

Для проверки полученных расчетных данных экспериментальным путем в ИГД СО РАН путем модернизации ранее используемого исследовательского оборудования [11] создан специальный стенд. Стенд предназначен для измерения параметров движения шламо-воздушной смеси во вращающемся горизонтальном трубопроводе, выполненном из прозрачного материала, а именно из стекла. Для придания трубопроводу вращения вся его конструкция монтируется на токарный станок 1К62 (Рис.4).

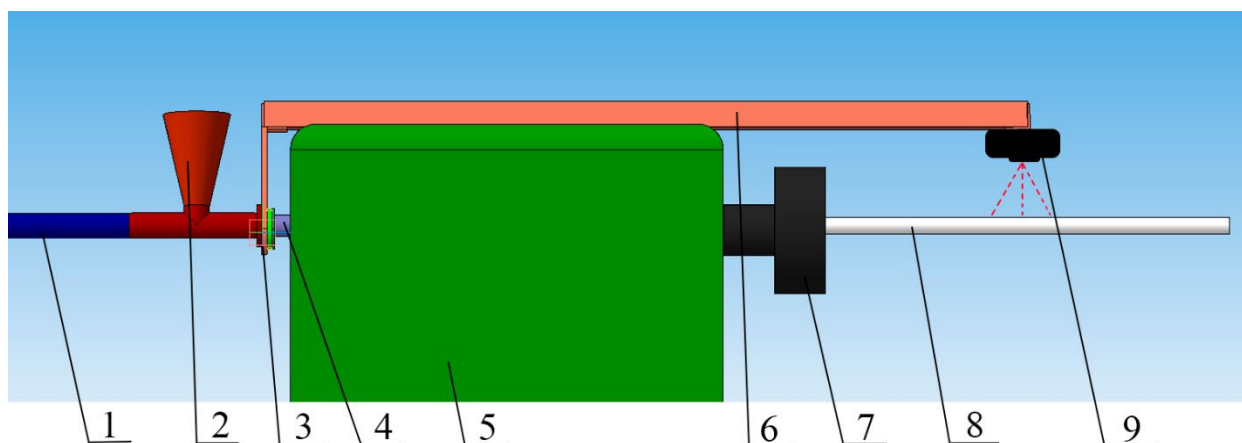


Рис. 4. Стенд для измерения параметров движения шламо-воздушной смеси в горизонтальном вращающемся трубопроводе

- 1 – рукав; 2 – воронка бункера; 3 – сальник-вертлюг; 4 – резиновая трубка;
 5 – передняя бабка токарного станка; 6 – опорная рама 7 – шпиндель станка;
 8 – стеклянная трубка; 9 – устройство видеофиксации.

Рама 6 стенда опирается на переднюю бабку 5 токарного станка. Имитатором центрального шламотранспортного канала служит стеклянная трубка 8, зажимаемая в шпиндель станка 7 посредством резиновой муфты. Стеклянная трубка посредством резиновой трубки 4 подвижно соединена с сальником-вертлюгом 3. Подвод энергоносителя (сжатый воздух) осуществляется по рукаву 1. Подача имитатора бурового шлама происходит через воронку бункера 2. Помимо этого в комплект необходимого оборудования входят: устройство видеорегистрации 9, мерная

емкость, секундомер, лабораторные весы, а также термометр для измерения температуры воздуха.

Экспериментальное определение скорости движения частиц в шламопроводе и её сравнение с расчетными данными необходимо для подтверждения адекватности разработанной математической модели пневмотранспортирования разрушенной породы в условиях вращающегося горизонтального трубопровода. Это позволяет установить соответствие между теоретически рассчитанными параметрами шламо-воздушной смеси и фактическими условиями движения частиц при бурении.

Особое значение имеет определение соотношения между скоростью движения частиц шлама и скоростью механического бурения. Скорость транспортирования разрушенной породы должна превышать скорость образования шлама на забое. В противном случае происходит накопление частиц в шламотранспортном канале, формирование подстилающего слоя и последующее зашламовывание трубопровода. Это может привести к снижению эффективности очистки забоя, повторному переизмельчению выбуренной породы, увеличению гидравлических потерь и возникновению аварийных ситуаций, связанных с закупориванием центрального канала буровой колонны.

Экспериментальная проверка также необходима для определения минимальной скорости воздушного потока, обеспечивающей устойчивое транспортирование твердых частиц без их осаждения. Полученные данные позволяют уточнить расчетные зависимости, определить влияние вращения трубопровода на характер движения частиц и установить рациональные режимы работы пневмотранспортной системы при бурении горизонтальных и наклонных скважин с обратной циркуляцией очистного агента.

Методика проведения экспериментов

Методика проведения экспериментов на описанном стенде выглядит следующим образом. По рукаву 1 (рис.4) подается сжатый воздух, расход которого измеряется расходомером VA400 с блоком сбора данных DS300. Через воронку 2 дозированными порциями фиксированного объема засыпается имитатор бурового шлама, различные фракции которого предварительно окрашиваются в определенные цвета. При вращении шпинделя 7 в стеклянной трубке 8 создаются условия, максимально приближенные к условиям движения выбуренной породы по осевому каналу двойной буровой трубы. Для определения скорости движения твердых частиц в шламо-воздушной смеси используется устройство видеофиксации, в качестве которого выступает камера DJI Osmo Action 4 с частотой видео 240 кадр./сек.

По показаниям измерительной аппаратуры экспериментально устанавливаются те же параметры шламо-воздушной смеси, что были получены в результате расчетов:

1. Скорость потока воздуха в центральном канале ϑ , рассчитываемая по формуле (1.1). Определяется по отношению показаний расходомера к площади поперечного сечения стеклянной трубки;

2. Производительность бурения V_m , рассчитанное путем высыпания порции имитатора бурового шлама заданного объема за промежуток времени, измеряемый при помощи секундомера;

3. Секундный расход воздуха Q_v .

Для проверки расчетных значений по формуле (1.5) используются показания расходомера V_v и справочное значение плотности воздуха ρ_v при температуре проведения экспериментов;

4. Весовая концентрация смеси μ , определяемая по формуле (1.6) как отношение экспериментально полученных значений технической производительности бурения Q_m к значению секундного расхода воздуха Q_v , полученных при помощи расходомера;

5. Объемная доля твердой фазы β , определяемая по формуле (1.7) путем использования значения весовой концентрации смеси μ , полученной экспериментальным путем;

6. Скорость воздуха, необходимая для обеспечения бесперебойной работы пневмотранспортной магистрали v_v проверяется путем использования в формулах (1.8), (1.9), (1.10) и (1.11) значений переменных, полученных экспериментальным путем.

С помощью постобработки кадров видеозаписи с камеры определяется скорость движения частиц в трубопроводе в зависимости от скорости воздушного потока и их взаимодействия при перемещении, а также визуальное распределение концентрации в шламопроводе.

Заключение

Таким образом, создан экспериментальный стенд, обеспечивающий моделирование движения шламо-воздушной смеси во вращающемся горизонтальном трубопроводе в условиях, приближенных к работе центрального канала двойной буровой колонны. Конструкция стенда позволяет наглядно отслеживать и фиксировать параметры движущейся по горизонтальной вращающейся трубе шламовой смеси.

Предложенная методика экспериментальных исследований позволяет определять фактическую скорость движения твердых частиц, оценивать характер их взаимодействия в потоке и сопоставлять полученные результаты с расчетными данными.

Установлено, что одним из ключевых условий надежной работы шламотранспортной системы является превышение скорости транспортирования частиц над скоростью образования шлама в процессе бурения. Соблюдение данного условия позволяет предотвратить зашламовывание канала и обеспечить непрерывный вынос разрушенной породы из скважины.

В дальнейшем результаты проведенных исследований могут быть использованы при проектировании систем РС-бурения для горизонтальных и наклонных скважин, а также при выборе рациональных режимов работы пневмоударных буровых комплексов в сложных горно-геологических условиях.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер государственной регистрации №126021217130-2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fan L., Li Z., Luo Y. Parametrical design and optimization of a reverse circulation drill bit for dust control // *Frontiers in Built Environment*. 2024. DOI: 10.3389/fbuilt.2024.1395464
2. Харламов Ю. П. Создание кольцевых пневмоударников для работы на высоком давлении энергоносителя // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2023. Т. 2. № 1. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-2-1-248-256.
3. Bo K., Ji F., Zhao Z., Fan L., Wang M. Optimum design of large-diameter reverse circulation drill bit // *Energies*. 2023. DOI: 10.3390/en16093913
4. Липин А.А. Погружные ударные машины с центральным шланготранспортом. Проблемы комплексного освоения минерального сырья Дальнего Востока: тр. научно – практич. конф. с участием иностран. ученых (16 – 18 сентября 2005 г., Хабаровск.). – Хабаровск: Ин-т горного дела ДВО РАН. 2005. – С. 170-175
5. Смоляницкий Б. Н., Липин А. А. Погружные пневмоударники для бурения скважин с центральным шланготранспортом, сб.докл. Международного горного конгресса (2008 г., Польша)
6. Харламов Ю. П., Абдуллин А. А., Чешин Д. О. Применение методов теории подобия при создании кольцевого геолого-разведочного пневмоударника // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2025. Т. 12. № 1. С. 65–71.
7. Чешин Д.О. Обоснование возможности применения способа интервальной продувки при бурении горизонтальных скважин пневмоударниками // *Проблемы недропользования*. – 2023. – № 2 (37). – С. 66-76. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.06622.06.2023
8. Данилов Б. Б. Теория и практика создания оборудования для бурения в грунте горизонтальных скважин с пневмотранспортом разрушенного материала по вращающемуся трубопроводу: дис. ...докт. техн. наук / Б. Б. Данилов. – Новосибирск, 2009. – 246 с.
9. Кантаев А.С. и др. Расчет установок пневмотранспорта: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Оборудование производств редких элементов» для студентов IV курса, обучающихся по специальности 240501 Химическая технология материалов современной энергетики / сост. Кантаев А.С., Брус И.Д., Тураев Н.С.; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2015. – 28 с.
10. Волошин Е.В. Расчет и компоновка пневмотранспортных установок: методические указания. Оренбург: Оренбургский гос. ун-т. – 2019. – 61 с.
11. Харламов Ю. П., Чешин Д. О. Стенд для определения количества твердой фазы в шламо-воздушной смеси // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2025. Т. 12. № 3. С. 79–88.

© Ю. П. Харламов, А. А. Абдуллин, Д. О. Чешин, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

1. А. С. Ельчин, И. С. Сизиков, Д. А. Носов, А. Ю. Тимиртдинов. Комплекс исследований в рамках модернизации абсолютных баллистических гравиметров типа ГАБЛ/ГБЛ.....	3
2. В. С. Захаров. Коэффициенты отражения плоской волны от пористого трехфазного слоя	12
3. А. П. Золоторенко, В. В. Лапковский. Разработка алгоритма построения 3D моделей геологических объектов с использованием адаптивной реструктуризации сеток.....	23
4. П. И. Зуев. Исследование современной геодинамики методом радонометрии.....	28
5. Н. Н. Семаков, А. Ф. Павлов, С. А. Казанцев. Феррозондовый нуль-индикатор магнитной индукции	34
6. В. А. Какуля, М. Н. Балдин, В. В. Федотов. Устранение явления «пробоя» при анализе сорберов для задач поисковой геохимии	38
7. В. В. Карстен. Итерационное определение наклона отражающей границы по данным ВСП.....	43
8. В. Л. Янчуковский, А. Ю. Белинская, А. А. Ковалев, М. А. Калюжная, В. С. Кузьменко, Р. З. Хисамов. Процессы на Солнце и возмущения в атмосфере Земли в ноябре 2025 года	52
9. Н. О. Кожевников. Суслики и археогеофизика: к истории открытия памятников древней металлургии железа в Приольхонье.....	63
10. Е. М. Лобастова. Геоэлектрическая модель осадочного чехла Мирнинского кимберлитового поля.....	71
11. О. А. Кучай, Е. А. Мельник. Структурные особенности афтершоковых процессов землетрясений Центральной Азии и Японии ($7.0 \leq M_w \leq 8.2$).....	78
12. И. В. Михайлов, М. И. Эпов, И. В. Суродина, М. Н. Никитенко. Электрокаротажные системы с тороидальными катушками для определения УЭС керна в процессе бурения: обоснование двумерным численным моделированием	87
13. Д. А. Неклюдов. Повышение качества данных до суммирования на основе частотно-временных масок в области комплексных вейвлетов.....	93

14. М. А. Новиков, В. В. Лисица. Численное решение параболического уравнения с использованием разложения матричной экспоненты по полиномам Чебышева в задачах моделирования физических процессов в многомасштабных средах.....	101
15. В. В. Плоткин. Доменный вариант магнитотеллурического зондирования	110
16. Е. В. Агеенков, В. В. Потапов, В. В. Оленченко, Е. Ю. Антонов. Результаты исследования многолетнемерзлой толщи методом ЗСБ в окрестностях р. Пур	118
17. М. И. Протасов. Модели трещиноватости и трёхмерное сверточное моделирование: возможности практического использования.....	126
18. Д. В. Рыжков, К. Г. Гадыльшин. Разработка теоретических основ метода волнового обращения времен: анализ регулярности и дифференцируемости оператора обратной динамической задачи сейсмики ...	131
19. Е. Б. Сибиряков. Новый метод решения задачи Лэмба и возможности его использования в геофизике.....	139
20. В. М. Соловьев, В. С. Селезнев, А. Ф. Еманов, А. А. Еманов, С. А. Елагин, Н. А. Галева. К использованию динамических характеристик волновых полей при вибромониторинге среды с мощными вибраторами	149
21. К. В. Сухорукова, Д. В. Касплер, О. В. Нечаев. Результаты численного моделирования сигналов электрического микрокаротажа в нефтегазовых коллекторах терригенных отложений Западной Сибири.....	158
22. В. Ю. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев, Д. Н. Голдобин. Модели строения Монголо-Байкальского региона по данным спутниковых гравиметрических миссий	165
23. А. Н. Шеин, А. А. Башкова. Влияние коммунальных аварий на тепловой режим многолетнемерзлого грунта в основании свайных фундаментов капитальных зданий в г. Салехард.....	174
24. Н. В. Штабель. Нейросетевой подход к оценке глубины залегания кровли проводящего объекта	182
25. А. Д. Штейн, М. И. Протасов. Частотно-зависимые лучевые решения: исследование на модельных примерах	190
26. Т. А. Янушенко, Н. А. Голиков. Зависимость поверхностной релаксивности от типа глинистости и удельной поверхности по данным ЯМР-релаксометрии	197
27. А. В. Азаров, А. А. Ниукканен. Моделирование гидроразрыва вблизи полостей в среде, содержащей естественные трещины	204

28. С. Е. Алексеев, Б. Кубанычбек. Совершенствование конструкций погружных пневмударников высокого давления	213
29. Л. В. Городилов, В. Г. Кудрявцев, А. И. Першин. Испытания оптического датчика для измерения предударной скорости бойка ударного устройства	224
30. И. Е. Иоанов. Преимущества использования пневмомолотов в технологии строительства горнодобывающих предприятий на Арктической территории Российской Федерации	231
31. П. В. Косых, С. С. Шевченко. Расчёт аэродинамической характеристики реверсивного осевого вентилятора с поочередно установленными на разные углы лопатками рабочего колеса	239
32. В. В. Плохих, Б. Б. Данилов, Д. О. Чецин. Обоснование структуры системы управления для реализации адаптивной технологии проходки скважин пневматической ударной машиной	250
33. И. М. Сердюк, С. В. Сердюков, Л. А. Рыбалкин. Лабораторная установка для моделирования воздействия на угольный пласт	258
34. И. М. Сердюк, Т. В. Шилова, Л. А. Рыбалкин, А. В. Азаров, Е. А. Понамарева. Исследование влияния свойств углей на параметры спектра ЯМР-релаксометрии.....	262
35. А. С. Сердюков, Т. В. Шилова, Н. Е. Бирючков. Исследование сезонного промерзания грунтов методом поверхностных сейсмических волн	267
36. И. В. Тищенко, В. В. Червов. Универсальный грунтопроходческий комплекс	272
37. Ю. П. Харламов, А. А. Абдуллин, Д. О. Чецин. Стенд для экспериментальной проверки расчета параметров шламо-воздушной смеси во вращающемся горизонтальном трубопроводе	278

CONTENTS

1. A. S. Elchin, I. S. Sizikov, D. A. Nosov, A. Yu. Timirtdinov. Researches within the modernization of absolute ballistic gravimeters of the GABL/GBL type	3
2. V. S. Zakharov. Plane wave reflection coefficients from a porous three-phase layer.....	12
3. A. P. Zolotorenko, V. V. Lapkovskiy. Development of an algorithm for constructing 3D models of geological objects using adaptive grid restructuring.....	23
4. P. I. Zuev. Study of present-day geodynamics using radonometry	28
5. N. N. Semakov, A. F. Pavlov, S. A. Kazantsev. Fluxgate magnetic induction zero-indicator	34
6. V. A. Kakulya, M. N. Baldin, V. V. Fedotov. Eliminating the “breakthrough” phenomenon in the analysis of sorbents for exploration geochemistry	38
7. V. V. Karsten. Iterative reflector dip angle resolving from offset VSP data	43
8. V. L. Yanchukovsky, A. Yu. Belinskaya, A. A. Kovalev, M. A. Kalyuzhnaya, V. S. Kuzmenko, R. Z. Khisamov. Processes on the sun and disturbances in the Earth's atmosphere in november 2025	52
9. N. O. Kozhevnikov. Ground squirrels and archaeogeophysics: on the history of the ancient iron production sites discovery in the Olkhon region.....	63
10. E. M. Lobastova. Geoelectric model of the sedimentary cover of the Mirny kimberlite field	71
11. O. A. Kuchai, E. A. Melnik. Structural features of aftershock processes of earthquakes in Central Asia and Japan ($7.0 \leq M_w \leq 8.2$).....	78
12. I. V. Mikhaylov, M. I. Epov, I. V. Surodina, M. N. Nikitenko. Resistivity logging systems with toroidal coils for determining core resistivity while drilling: substantiation through 2D numerical modeling	87
13. D. A. Neklyudov. Prestack data enhancement using time-frequency masks in the complex wavelet domain.....	93
14. M. A. Novikov, V. V. Lisitsa. Numerical solution of the parabolic equation using Chebyshev polynomial decomposition for the matrix exponent for the modeling of physical phenomena in multi-scale media.....	101

15. V. V. Plotkin. Domain version of magnetotelluric sounding	110
16. E. V. Ageenkoy, V. V. Potapov, V. V. Olenchenko, E. Y. Antonov. The results of the study of permafrost strata by the TEM method in the vicinity of the Pur river.....	118
17. M. I. Protasov. Fracture models and 3D convolutional modeling: practical application capabilities	126
18. D. V. Ryzhkov, K. G. Gadylyshin. Theoretical foundations of the wave- equation traveltime inversion: regularity and differentiability of the seismic inverse dynamic problem operator.....	131
19. E. B. Sibiriakov. A new method for solving the Lamb problem and the possibilities of its use in geophysics	139
20. V. M. Solovyev, V. S. Seleznev, A. F. Emanov, A. A. Emanov, S. A. Elagin, N. A. Galeva. On the use of dynamic characteristics in vibration monitoring of environments with powerful vibrators	149
21. K. V. Sukhorukova, D. V. Kaspler, O. V. Nechaev. Results of numerical modeling of electrical microlog data in oil and gas reservoirs of western siberian clastic deposits.....	158
22. V. Yu. Timofeev, D. G. Ardyukov, A. V. Timofeev, D. N. Goldobin. Models of Mongolia-Baikal region by space gravity mission data	165
23. A. N. Shein, A. A. Bashkova. The impact of municipal accidents on the thermal regime of permafrost at the base of pile foundations of capital buildings in Salekhard.....	174
24. N. V. Shtabel. Neural network approach to estimating the depth of the roof of a conducting object.....	182
25. A. D. Stein, M. I. Protasov. Frequency dependent ray solutions: investigation on model examples	190
26. T. A. Yanushenko, N. A. Golikov. Dependence of surface relaxivity on the type of clay content and specific surface area according to NMR relaxometry data	197
27. A. V. Azarov, A. A. Niukkanen. Modeling of hydraulic fracturing near cavities in a medium containing natural fractures.....	204
28. S. E. Alekseev, B. Kubanychbek. Design improvement of high air pressure DTH hammers	213
29. L. V. Gorodilov, V.G. Kudryavsev, A. I. Pershin. Testing of an optical sensor for measuring the pre-impact velocity of the impact device	224

30. I. E. Ioanov. The advantages of using pneumatic hammers in mining construction technology in the Arctic region of the Russian Federation.....	231
31. P. V. Kosykh, S. S. Shevchenko. Calculation of the aerodynamic characteristics of a reversible axial fan with impeller blades set at different angles.....	239
32. V. V. Plokhikh, B. B. Danilov, D. O. Cheshchin. Substantiation of control system structure for implementation of adaptive technology of well drilling with pneumatic percussion machine.....	250
33. I. M. Serdyuk, S. V. Serdyukov, L. A. Rybalki. Laboratory installation for modeling the impact on the coal seam	258
34. I. M. Serdyuk, T. V. Shilova, L. A. Rybalkin, A. V. Azarov, E. A. Ponamareva. Study of the Influence of coal properties on NMR relaxometry spectrum parameters.....	262
35. A. S. Serdyukov, T. V. Shilova, N. E. Biruchkov. Study of seasonal soil freezing using surface seismic waves.....	267
36. I. V. Tishchenko, V. V. Chervov. Universal ground-penetrating complex	272
37. Yu. P. Harlamov, A. A. Abdullin, D. O. Cheshchin. Test bench for experimental verification of calculations of parameters of a sludge-air mixture in a rotating horizontal pipeline	278

Научное издание

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XXII Международный научный конгресс

Сборник материалов в 9 т.

Т. 2

Международная научная конференция

**«НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ. ГОРНОЕ ДЕЛО.
НАПРАВЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА,
РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. ЭКОНОМИКА.
ГЕОЭКОЛОГИЯ»**

№ 2

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *А. Бочарникова*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 05.08.2026. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 17,03. Тираж 25 экз. Заказ 140.

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Издательско-полиграфический центр СГУГиТ

630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 10.

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре СГУГиТ

630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 8