

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонов Ю.В. Высокочастотные колебания неприливных сейсмо-гравитационных пульсаций // Вестник ВГУ. Сер. Геология. – 2022. – № 3. – С. 66-75. – DOI: 10.17308/geology/1609-0691/2022/3/66-75.
2. Геник И.В. Об обработке долговременных записей гравиметра Autograv // Горное эхо. – 2023. – № 4 (93). – С. 56-61. – DOI: 10.7242/echo.2023.4.8.
3. Геник И.В. Применение статистических методов для прогнозирования результатов региональных гравиметрических работ // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 15 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2017. – С. 150-153.
4. Никитин А.А., Петров А.В. Теоретические основы обработки геофизической информации: учеб. пособие. – 3-е изд. доп. – М. ВНИИГеосистем, 2013. – 117 с.: ил.
5. Никитин А.А., Петров А.В., Зиновкин С.В. Развитие статистических приемов обработки и интерпретации геофизических полей в компьютерной технологии КОСКАД 3D // Изв. вузов. Геология и разведка. – 2007. – № 6. – С. 68-74.
6. Хайндман Р., Атанасопулос Д. Прогнозирование: принципы и практика. – М.: ДМК Пресс, 2023. – 458 с.
7. Mills T.C. Applied Time Series Analysis: A Practical Guide to Modeling and Forecasting. – Elsevier, 2019. – 354 p.
8. Nielsen A. Practical Time Series Analysis: Prediction with Statistics and Machine Learning. – Sebastopol: O'Reilly Media, 2019. – 504 p.

УДК 550.834.05

DOI:10.7242/echo.2025.1.7

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ АТТРИБУТОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРОЕНИЯ МАССИВА ЛЕДЯНОЙ ГОРЫ

И.Ю. Герасимова

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Представлены результаты анализа сейсмических атрибутов, проведенного с целью локализации ослабленных зон в массиве Ледяной горы, включающем Кунгурскую пещеру. Оценка распределений суммарного коэффициента, сформированного на основе данных многопараметрического моделирования и анализе динамических параметров упругих волн позволяет на качественном уровне выделить участки проявления подземного карста.

Ключевые слова: динамические атрибуты, Кунгурская ледяная пещера, верхняя часть разреза, карстовая полость.

Массив Ледяной горы, включающий Кунгурскую пещеру, используется как естественный полигон для геофизических исследований с середины XX века. Опытнометодические работы направлены на решение разнообразных задач, связанных как с оптимизацией методик и технологий проведения полевых наблюдений, так и с повышением результативности данных, получаемых на этапах обработки и интерпретации. Одним из изучаемых вопросов является локализация полостей Кунгурской пещеры в регистрируемых полях. В статье представлены материалы, полученные в рамках решения указанной задачи, базирующиеся на изменении динамических характеристик упругих волн.

Территория отличается расчлененным рельефом, сложным геологическим и структурно-тектоническим строением [1, 4], а также развитием карстовых и карстово-суффозионных процессов, способствующих образованию провалов и воронок на поверхности массива и формированию в толще пород на разных гипсометрических уровнях пустот размерами от нескольких миллиметров до значительных по объемам пещер. По данным топографического плана Кунгурской ледяной пещеры [2] средняя ширина гrotтов и галерей составляет 7,8 м, а средняя высота – 2,6 м. Подземные полости перекры-

ты переслаивающейся сульфатно-карбонатной толщей горных пород и отложениями неоген-четвертичной коры выветривания [3]. С учетом средней глубины залегания кровли гротов пещеры, равной значению 65,1 м, задача локализации подземных пустот не является тривиальной.

На рис. 1 представлен суммарный временной разрез, сформированный по данным сейсморазведочных исследований, проведенных вдоль одной из экспериментальных профильных линий с параметрами расстановки, соответствующими инженерным наблюдениям. Волновая картина подтверждает сложное строение изучаемого массива – отсутствуют выдержанные оси синфазности, регистрируются кратные волны, наблюдается выклинивание отражающих горизонтов, выделяются области дифракции, отмечается потеря корреляции записи. Подобные осложнения типичны для всех зарегистрированных данных. По результатам интерпретации толща, включающая основные галереи пещеры, соответствует диапазону времен 80-100 мс и не характеризуется существенными отличиями в волновом поле.

В подобных условиях изменения динамических характеристик, инициированные наличием пустот в изучаемом интервале разреза, могут быть определены на основании многопараметрического моделирования, позволяющего с высокой степенью точности имитировать сейсмические эффекты распространения волновых полей.

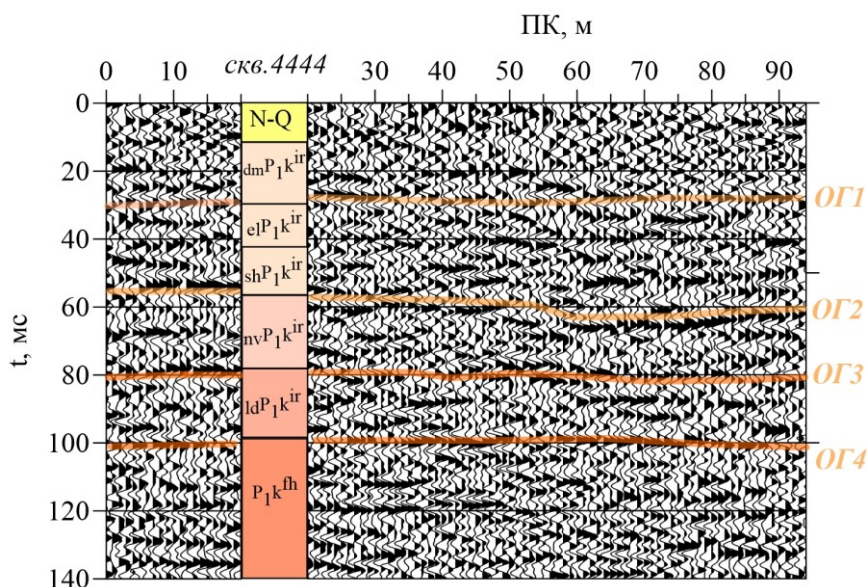


Рис. 1. Экспериментальная профильная линия. Пример суммарного временного разреза (корреляция отражающих горизонтов ОГ выполнена с учетом данных бурения скважины [3])

Для максимального приближения к реальности по данным бурения скважины [3] сформирована тестовая модель среды, представленная чередованием тонкослоистых однородных прослоев с плоскопараллельными границами раздела и включающая компонент, эквивалентный реальной части пещеры (рис. 2а). Скоростная характеристика модели подбиралась на основании анализа данных, определенных для экспериментальных профильных линий.

Полученные при моделировании результаты, в т.ч. визуально фиксируемые эффекты, связанные с наличием полости (рис. 2в), позволяют оперировать трансформантами динамических атрибутов для изучения сейсмического отклика и выявления параметров, наиболее восприимчивых к изменению структуры и свойств изучаемого разреза.

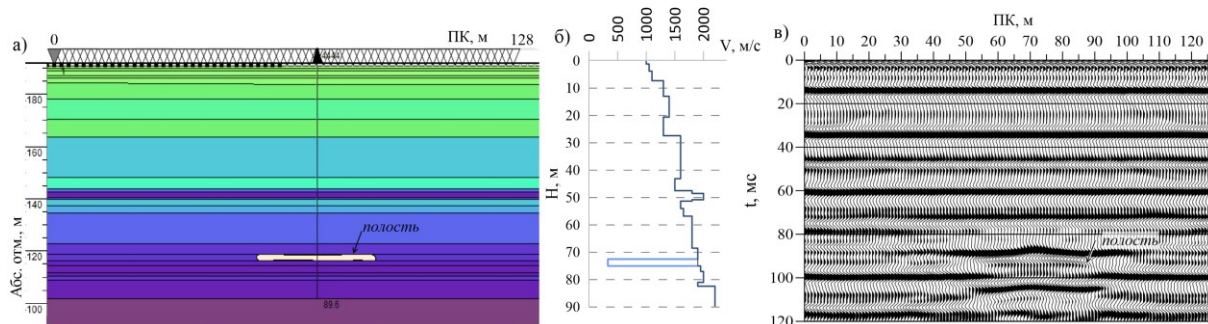


Рис. 2. Сейсмогеологическая модель разреза (а), скоростная характеристика (б), синтетический временной разрез (в)

По итогам качественного анализа значительного количества сейсмических характеристик, направленного на изучение участков, отличающихся от вмещающего массива пород, установлено, что наиболее значимыми для случая тонкослоистой низкоскоростной модели среды являются следующие: мгновенная частота, мгновенная фаза и гибридные атрибуты, использующие комбинации вышеперечисленных показателей с вариантами дополнений, позволяющих подчеркнуть локальные особенности того или иного фактора, влияющего на сейсмическую запись.

Следующим этапом анализа являлся подбор количественных характеристик динамических свойств, позволяющих сформировать базовый набор показателей для локализации неоднородности в синтетическом поле. Согласованность негативных изменений атрибутов представлена на рис. 3 в виде распределения нормированного суммарного коэффициента, представляющего собой формализованную количественную оценку вероятности наличия в разрезе участка, ограниченного заданной при моделировании полостью пещеры.

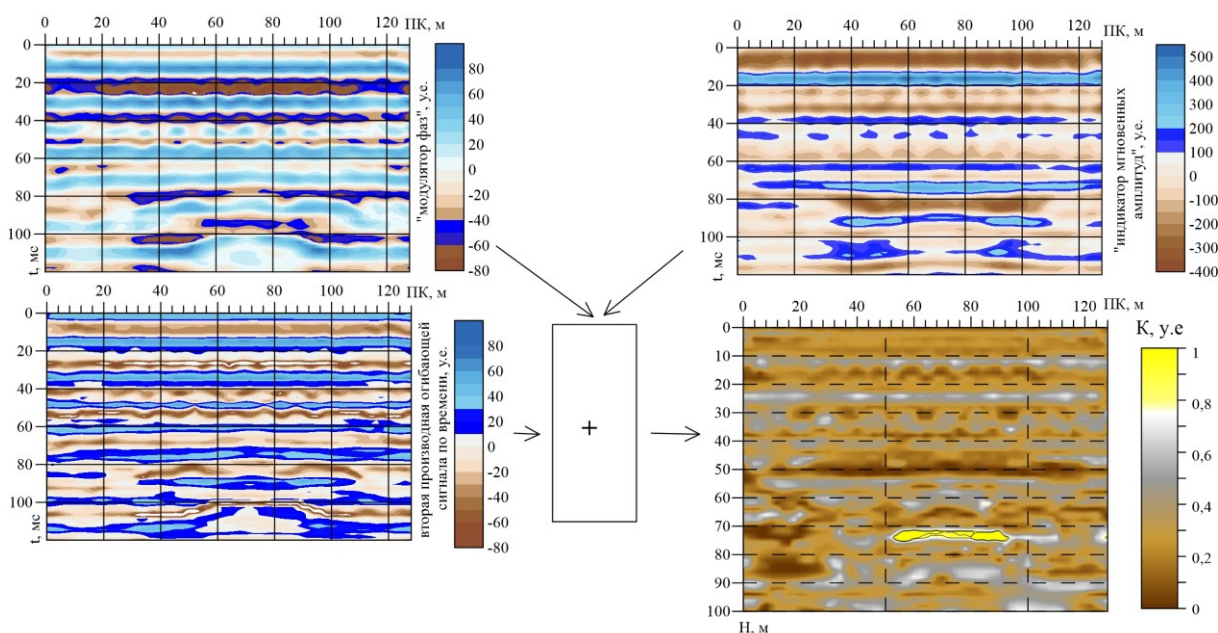


Рис. 3. Схема формирования распределения нормированного коэффициента

Полученные при анализе характеристики динамических атрибутов использованы для оценки реальных данных. Как указывалось ранее, экспериментальные временные разрезы указывают на сложное распределение упругих свойств горных пород, составляющих массив Ледяной горы. Неоднородность структуры и состояния различных участ-

ков массива изменяют свойства проходящих сейсмических волн и влияют на волновую картину в целом, дополняя, усложняя и дифференцируя заданные при моделировании параметры. С целью интеграции результатов моделирования и данных, зарегистрированных в реальных условиях, потребовался этап коррекции количественных диапазонов сейсмических атрибутов, позволяющих выделить области, предположительно обусловленные наличием в разрезе карстовых полостей.

Рассмотрим в качестве примера две линии экспериментальных наблюдений. Линия профиля 8 в начальной части проложена над областью Кунгурской пещеры, включающей гроты Колизей и Центральный, а линия профиля 1 – в конечной части – над гротом Метеорный (рис. 4а).

На суммарных разрезах (рис. 4б, в) влияние пещеры на упругие параметры прослеживается в диапазоне времен, значительно превышающем целевой интервал и может быть определено по изменению волновой картины на основе опыта исследований в пределах территорий интенсивного развития карста [6].

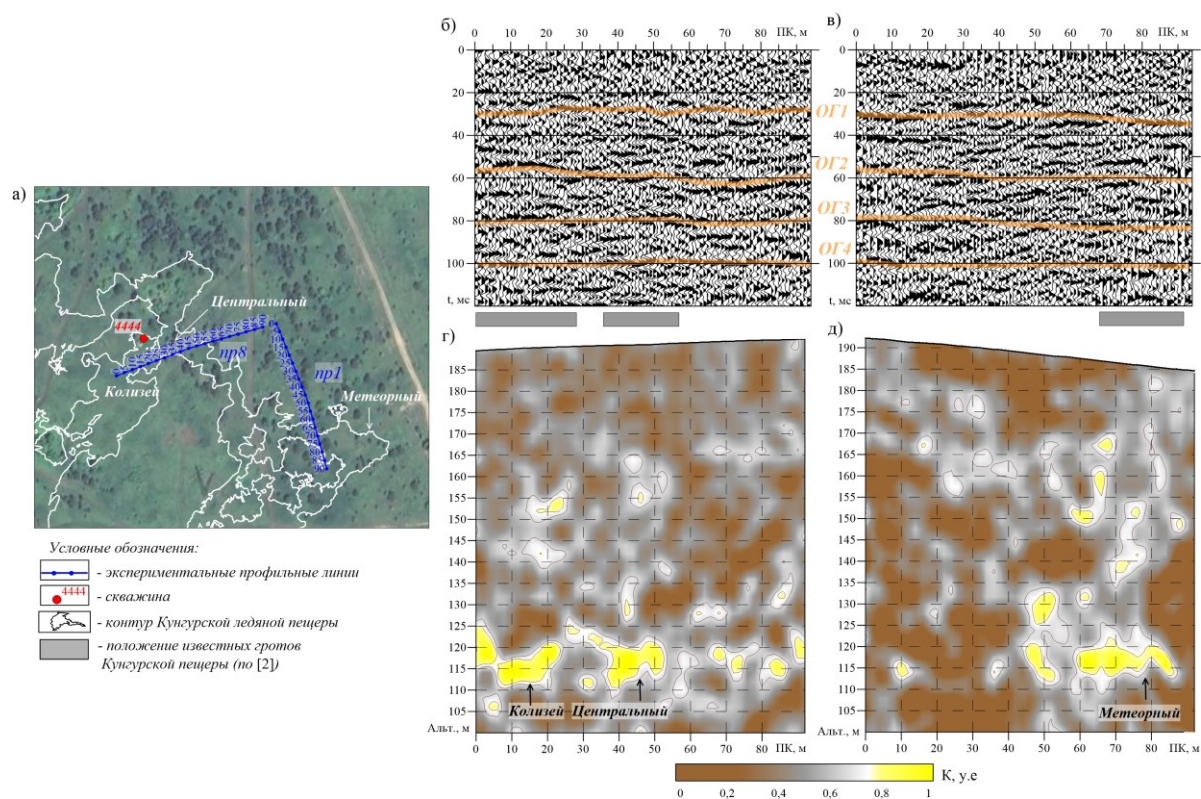


Рис. 4. Схема участка работ (а); временные разрезы (б, в) и распределения нормированного коэффициента (г, д) для профилей № 8 (б, г) и № 1 (в, д)

Участки, предположительно соответствующие положению гротов в топографическом плане, выделяются и на разрезах нормированного коэффициента (рис. 4г, д). Конфигурация отмеченных фрагментов несколько превышает морфометрические показатели подземной полости [2], что может быть связано с выделением по данным сейсморазведки более значимых объемов, обусловленных понижением упругих свойств в массиве пород. Дополнительные области, так же прослеживаемые на разрезах, могут быть подобным образом связаны с потенциально ослабленными участками в массиве Ледяной горы. В частности, в результате комплексного решения обратной задачи гравиразведки [5] в средней части профиля 1 предполагается наличие локальной подземной карстовой полости, расположенной в массиве горы выше уровня и вне контура изученной части пещеры.

Таким образом, учитывая сложность локализации известных карстовых полостей в пределах массива Ледяной горы (глубина, размеры, мощность покрывающих пород и др.), для решения обратной задачи дополнительно использованы данные анализа сейсмических атрибутов. Применение неформализованных подходов, основанных на принципах динамической интерпретации, позволило детализировать сейсмогеологический разрез. Полученные результаты не противоречат ожидаемым геологическим представлениям. Уточним, что алгоритм решения обратной задачи в условиях сложнопостроенной тонкослоистой среды в обязательном порядке должен включать этап сопоставления полевых материалов и результатов предварительного многопараметрического моделирования с учетом анализа природы выявляемых искажений волнового поля. При этом для интеграции результатов моделирования к реальным условиям может потребоваться несколько итераций.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер 124020500029-1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Катаев В.Н., Кадебская О.И. Геология и карст города Кунгура: монография. / ПГУ, ГИ УрО РАН. – Пермь, 2010. – 249 с.: ил.
2. Красиков А.В. Уточнение морфометрических показателей гротов и галерей Кунгурской Ледяной пещеры по результатам топографо-геодезических работ // Изв. вузов. Горн. журн. – 2022. – № 4. – С. 76-89. – DOI: 10.21440/0536-1028-20212-4-76-89.
3. Красиков А.В., Трапезников Д.Е. Новые данные о литологическом разрезе массива Ледяной горы // Горное эхо. – 2020. – № 4 (81). – С. 24-30. – DOI: 10.7242/echo.2020.4.5.
4. Кунгурская ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / ГИ УрО РАН; под ред. В.Н. Дублянско-го; [отв. ред. А.И. Кудряшов]. – Екатеринбург, 2005. – 376 с.: ил.
5. Пугин А.В., Мичурин А.В., Симанов А.А., Хохлова В.В., Новикова П.Н. Опыт-но-методические геофизические работы на территории историко-природного комплекса «Ледяная гора и Кунгурская Ледяная пещера» // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. – 2014. – № 2, Вып. 21. – С. 191-197.
6. Санфиоров И.А., Ярославцев А.Г., Бабкин А.И., Фаткин К.Б., Бобров В.Ю. Малоглубинная сейсмостратиграфия // Геофизика. – 2016. – № 5. – С. 11-18.

УДК 550.834

DOI:10.7242/echo.2025.1.8

ПОДБОР МОДЕЛИ СРЕДЫ ПРИ МОНИТОРИНГОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

С.О. Горкунов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Скоростной анализ сейморазведочных работ – необходимый этап интерпретации сейморазведочных данных. Применение при цифровой обработке процедур, направленных на повышение регулярности сейсмической записи, что необходимо при проведении работ на урбанизированных территориях, приводит к сглаживанию латеральной изменчивости анализируемых кинематических параметров упругих волн. Оценить диапазон их отклонений на участках с аномальными особенностями геологического строения, выделяемыми по другим параметрам волнового поля, в процессе проведения мониторинговых наблюдений, представляется возможным на основании итерационного решения прямой задачи или подбора модели среды.

Ключевые слова: подбор модели среды, полноволновое моделирование, цифровая обработка, интерпретация, мониторинговые наблюдения.